UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MICHEL RODRIGUES ISERHARDT

MODULAÇÃO DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS: TÉCNICAS DE ATENUAÇÃO DE FLICKER

Alegrete

2014

MICHEL RODRIGUES ISERHARDT

MODULAÇÃO DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS: TÉCNICAS DE ATENUAÇÃO DE FLICKER

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jumar Luís Russi

Alegrete

2014

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

IIS78m Iserhardt, Michel Rodrigues
Modulação de Potência por Ciclos Inteiros: Técnicas de Atenuação de Flicker / Michel Rodrigues Iserhardt.
87 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2014.
"Orientação: Jumar Luis Russi".

1. modulação de potêmcia. 2. controle por ciclos inteiros. 3. aquecimento resistivo de água. 4. flicker. I. Título.

MICHEL RODRIGUES ISERHARDT

MODULAÇÃO DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS: TÉCNICAS DE ATENUAÇÃO DE FLICKER

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrônica

Dissertação defendida e aprovada em: 20 de agosto de 2014.
Banca examinadora:

Prof. Dr. Jumar L. Russi
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos
UFSM

Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon
UNIPAMPA

"Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos." (Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, pelas preces atendidas; aos meus pais Quinha e Jorge, pelo carinho; à minha irmã Mirela, meu cunhado Kico e meu sobrinho Pedro Henrique, pela amizade e companheirismo; aos professores do PPGEE da UNIPAMPA, em especial ao meu orientador prof. Jumar Russi, pela dedicação e lealdade durante estes dois anos de trabalho; aos colegas do laboratório de eletrotécnica Antônio, Cleiton e Gerson, pela imprescindível ajuda durante as atividades práticas; aos professores do curso de Engenharia de Computação da UNIPAMPA Erico, Milton e Sandro, pelo apoio durante as atividades de estágio docência; aos meus colegas de trabalho; e a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste sonho. A vocês, muito obrigado.

RESUMO

Atualmente as técnicas não lineares de modulação de potência aplicadas ao aquecimento resistivo de água, principalmente em redes elétricas mal projetadas, podem gerar vários problemas no ambiente onde estão instaladas. É o caso dos chuveiros eletrônicos que, dependendo da técnica utilizada para executar o processo de modulação de potência, podem ocasionar efeitos indesejáveis na rede elétrica e ambiente. Um exemplo típico é o Controle por Ciclos Inteiros, foco deste trabalho, que apresenta baixa probabilidade de geração de harmônicas e interferência eletromagnética (IEM). Em contrapartida, é praticamente inevitável o surgimento de *flicker* na rede elétrica decorrente de sua utilização, principalmente devido às altas potências dos equipamentos de aquecimento resistivo, agravadas pelos longos intervalos entre condução e não condução de corrente. Considerando que a geração de *flicker* é a principal desvantagem proveniente do Controle por Ciclos Inteiros, o presente trabalho tem por objetivo propor outras técnicas a fim de atenuar este efeito indesejável e, ao mesmo tempo, possibilitar a utilização de vários níveis de potência.

Palavras chave: modulação de potência, controle por ciclos inteiros, aquecimento resistivo de água, *flicker*.

ABSTRACT

Currently the non-linear power modulation techniques applied to resistive water heating, mainly on not properly designed electric installations, can generate various problems in the environment where they are present. This is the case of electronic showers that depending on the power modulation technique may result in undesirable effects in the power grid and environment. A typical example is the zero-crossing AC power control, focus of this work, which has low probability of generating harmonics and electromagnetic interference (EMI). On the other hand, it is almost inevitable the emergence of Flicker on the power grid resulting from its use, mainly due to high electrical power consumed by heating equipment, compounded by long conducting and non-conducting power intervals. Whereas the flicker generated is the main drawback from the zero-crossing power control, this work aims to propose other techniques to reduce this undesirable effect allowing several output power levels.

Keywords: *power modulation, zero-crossing power control, water resistive heating, flicker.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Flutuação de tensão 18
Figura 2 – Curva Cenelec 19
Figura 3 – Curva IEC 61000-3-3 20
Figura 4 - Modelo de circuito 21
Figura 5 - Operação de Controle por Ciclos Inteiros 22
Figura 6 – Operação de Controle de Fase 23
Figura 7 – Operação de Controle AC Chopper 24
Figura 8 - Obtenção de 1/3 da potência total 25
Figura 9 - Obtenção de 2/3 da potência total 25
Figura 10 - Chuveiro elétrico 30
Figura 11 - Potencial economia de energia - Corona Gorducha 32
Figura 12 - Potencial economia de energia - Corona Duchassa 33
Figura 13 - Potencial economia de energia – Thermosystem 8T 33
Figura 14 - Diagrama elétrico de chuveiro eletrônico 35
Figura 15 - Fluxograma para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável 38
Figura 16 - Modulação padrão para Ciclos Inteiros 39
Figura 17 - 1ª etapa de otimização 39
Figura 18 - 2ª etapa de otimização 39
Figura 19 - Implementação em linguagem de programação C 40
Figura 20 - Circuito para duas resistências 43
Figura 21 - Implementação em linguagem de programação C para duas resistências 46
Figura 22 – R_1 e R_2 trabalhando alternadamente 47
Figura 23 - Circuito proposto para três resistências 49
Figura 24 - Fluxograma para Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável 55
Figura 25 - Semiciclos Inteiros Otimizados com 7 níveis de potência 57
Figura 26 - Forma de onda para potência de 1,5 57
Figura 27 - Forma de onda para potência de 1,66 58
Figura 28 - Resultados: Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável 63
Figura 29 - Resultados: Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável 64
Figura 30 - Resultados: Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis) 64
Figura 31 - Circuito de simulação 66
Figura 32 - Variação de tensão para resistência única 67
Figura 33 - Variação de tensão para duas resistências 68
Figura 34- Variação de tensão para três resistências 68
Figura 35 - Circuito para simulação de flutuação de tensão 69
Figura 36 - Simulador de Flutuação de Tensão 71
Figura 37 - Ambiente de testes 72
Figura 38 - Sinal estável 73
Figura 39 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (nível 3 de pot.) 73
Figura 40 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (nível 3 de pot.) 74
Figura 41 - Ciclos Inteiros (nível 3 de pot.) 74

Figura 42 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (nível 5 de pot.) 74
Figura 43 - Ciclos Inteiros (nível 5 de pot.) 75
Figura 44 - Resultados finais da Análise Quantitativa por Percepção Humana..... 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de potência em função da quantidade de elementos aquecedores 26
Tabela 2 - Características do controle por ciclos inteiros..... 27
Tabela 3 - Características do controle de fase 27
Tabela 4 - Características do controle AC Chopper 28
Tabela 5 - Características do controle por semiciclos inteiros otimizados..... 28
Tabela 6 - Tabela de economia de energia para vazão de 3,0 L/min 30
Tabela 7 - Tabela de economia de energia para vazão de 3,0 L/min 34
Tabela 8 - Período T para cada nível de potência..... 41
Tabela 9 - Valores correspondentes a um chuveiro 6000W com duas resistências 44
Tabela 10 - Comportamento da otimização para duas resistências 45
Tabela 11 - Potências de R1 e R2 para potência total de 2600W..... 48
Tabela 12 - Potências de R1 e R2 para potência total de 5000W..... 48
Tabela 13 - Valores correspondentes a um chuveiro de 3500W com três resistências 50
Tabela 14 - Comportamento da otimização para três resistências..... 50
Tabela 15 - Limites para geração de flicker 60
Tabela 16 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável..... 60
Tabela 17 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável 61
Tabela 18 - Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência) 62
Tabela 19 - Ciclos Inteiros (Tradicional) 62
Tabela 20 - Resistência natural do meio condutor 66
Tabela 21 - Valores de resistências para simulação 67
Tabela 22 - Tabela para resistor variável..... 70
Tabela 23 - Medições 1 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5) 75
Tabela 24 - Medições 1 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9) 75
Tabela 25 - Medições 1 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5)..... 76
Tabela 26 - Medições 1 – Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9) 76
Tabela 27 - Medições 1 – Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 1 a 5) 76
Tabela 28 - Medições 1 - Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 6 a 9) 77
Tabela 29 - Medições 2 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5) 77
Tabela 30 - Medições 2 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9) 77
Tabela 31 - Medições 2 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5)..... 78
Tabela 32 - Medições 2 – Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9) 78
Tabela 33 - Medições 2 – Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 1 a 5) 78
Tabela 34 - Medições 2 - Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 6 a 9) 78
Tabela 35 - Perfil dos voluntários..... 79
Tabela 36 - Análise para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável 80
Tabela 37 - Análise para Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável 81
Tabela 38 - Análise para Ciclos Inteiros (Tradicional) 81

LISTA DE ABREVIATURAS

ΔV/V – Variação de tensão
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
DIAC – *Diode for Alternating Current*
GND - *Gorund*
IEC - *International Electrotechnical Commission*
IEM – Interferência Eletro Magnética
LDR - *Light Dependent Resistor*
MDC – Máximo Divisor Comum
PWM - *Pulse-Width Modulation*
RC – Resitor-Capacitor
SCR - *Silicon Controlled Rectifier*
THD - *Total Harmonic Distortion*
TRIAC - *Triode for Alternating Current*
UIE - *International Union for Electricity Applications*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA 14
1.2 JUSTIFICATIVA 15
1.3 OBJETIVOS 15
1.3.1 Objetivo Geral 15
1.3.2 Objetivos Específicos 15
1.4 METODOLOGIA 15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 FLICKER 17
2.1.1 Medição de Flicker 18
2.2 TÉCNICAS NÃO LINEARES DE MODULAÇÃO DE POTÊNCIA 20
2.2.1 Controle por Ciclos Inteiros 21
2.2.2 Controle de Fase 23
2.2.3 AC Chopper 24
2.2.4 Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados 25
2.2.5 Quadro Comparativo das Técnicas 26
2.3 AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL 29
2.3.1 Chuveiro Elétrico 29
2.3.2 Chuveiro Eletrônico 34
3 TÉCNICAS PROPOSTAS 36
3.1 CICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL 36
3.1.1 Potência na Carga 42
3.2 CICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL – OTIMIZAÇÃO PARA DUAS RESISTÊNCIAS 43
3.2.1 Algoritmo para: Potência Selecionada < 1/3 45
3.2.2 Algoritmo para: 1/3 < Potência Selecionada < 2/3 45
3.2.2 Algoritmo para: Potência Selecionada > 2/3 47
3.2.4 Potência na Carga 48
3.3 CICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL - OTIMIZAÇÃO PARA TRÊS RESISTÊNCIAS 49

3.3.1 Algoritmo para: 1/7 < Potência Selecionada < 2/7 51
3.3.2 Algoritmo para: 3/7 < Potência Selecionada < 4/7 52
3.3.3 Algoritmo para: 5/7 < Potência Selecionada < 6/7 53
3.4 SEMICICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL 54
3.5 SEMICICLOS INTEIROS OTIMIZADOS (7 NÍVEIS DE POTÊNCIA)... 56
4 ANÁLISE DE FLICKER PARA AS TÉCNICAS PROPOSTAS 59
4.1 ANÁLISE - CURVAS CENELEC, IEC 61000-3-3 E MEDIDOR UIE..... 59
4.1.2 Resultados 63
4.2 ANÁLISE POR VARIAÇÃO DE LUMINOSIDADE 65
4.2.1 Análise de ΔV/V através de Equacionamento Matemático 65
4.2.2 Simulador de Flutuação de Tensão 69
4.2.3 Ambiente de Testes 71
4.2.4 Resultados 72
4.3 ANÁLISE QUANTITATIVA POR PERCEPÇÃO HUMANA 79
4.3.1 Resultados 79
5 CONCLUSÃO 83
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 85
REFERÊNCIAS 86

1 INTRODUÇÃO

O processo de aquecimento de água no âmbito residencial tem sofrido mudanças significativas com o passar do tempo. Juntamente com o advento da eletricidade veio a concepção do chuveiro elétrico linear, com resistências de tamanho fixo. Este se mantém como o padrão mais utilizado nas residências brasileiras até os dias de hoje [1].

A desvantagem na utilização do chuveiro elétrico convencional vem do fato de este entregar poucas opções de regulagem de temperatura (potência). Os mais comuns trazem apenas dois valores de resistência, que resultam nas regulagens desligado (sem aquecimento), morno e quente. Como consequência, muitas vezes para se chegar à temperatura ideal deve-se posicionar o chuveiro na temperatura "quente" e aumentar a vazão de água, o que acarreta em um desperdício conjunto de energia e água.

Para resolver este problema foram criados os chuveiros eletrônicos. Estes, utilizando circuitos elétricos comutados e controlados através de técnicas de modulação de potência, fornecem uma regulagem não linear e mais precisa da potência. Como desvantagem, se instalados em uma rede elétrica mal dimensionada, podem acabar gerando alguns efeitos indesejáveis à rede elétrica e ambiente, tais como: Interferências Eletromagnéticas (IEM), harmônicas, *flicker*, entre outros.

Ao longo dos anos, várias técnicas de modulação de potência foram desenvolvidas e algumas delas são utilizadas comercialmente em chuveiros eletrônicos. Porém, as diferenças existentes entre elas fazem com que existam vários efeitos decorrentes de sua utilização, dependendo do ambiente no qual estão inseridas. Um exemplo típico é o Controle por Ciclos Inteiros, foco deste trabalho, que apresenta baixa probabilidade de geração de harmônicas e IEM. Em contrapartida, é praticamente inevitável o surgimento de *flicker* na rede elétrica decorrente de sua utilização.

Considerando que a geração de *flicker* é a principal desvantagem proveniente do Controle por Ciclos Inteiros, o presente trabalho tem por objetivo propor outras técnicas de modulação para atenuar este efeito indesejável. São elas: Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência).

Segundo [2], a intensidade do *flicker* depende basicamente de três fatores físicos, entre eles o nível de flutuação de tensão (amplitude) e a frequência com que a flutuação de tensão ocorre. As técnicas de modulação propostas neste trabalho atuam diretamente nestes dois

fatores. Através da utilização de algoritmos de dimensionamento automático dos períodos de comutação é possível aumentar a frequência com que estes intervalos ocorrem. É o caso dos controles de Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e de Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável. Já o nível de flutuação de tensão pode ser reduzido através do uso de múltiplos elementos aquecedores, conforme as técnicas de otimização que utilizam duas ou três resistências em paralelo.

Somado a isso, duas das técnicas propostas (Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável) também caracterizam-se por serem escalonáveis, ou seja, possíveis de serem aplicadas a qualquer quantidade de níveis de potência.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

- Introdução, onde é apresentada uma ideia geral do trabalho;
- Revisão Bibliográfica, onde são conceituados os principais temas envolvidos no trabalho e o estado da arte;
- Técnicas Propostas, onde são apresentadas as técnicas e suas aplicações;
- Análise de *Flicker* para Novas Técnicas Propostas, onde são apresentados os métodos utilizados para testar o sucesso da aplicação, bem como os resultados obtidos com cada um deles;
- Conclusão, onde constam as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente as técnicas não lineares de modulação de potência aplicadas ao aquecimento resistivo de água, principalmente em redes elétricas mal projetadas, podem gerar vários problemas no ambiente onde estão instaladas. É o caso dos chuveiros eletrônicos que, dependendo da técnica de modulação de potência, podem acarretar em efeitos indesejáveis à rede elétrica, tais como: IEM, harmônicas, *flicker*, entre outros.

O Controle por Ciclos Inteiros apresenta baixa probabilidade de geração de harmônicas e IEM. Em contrapartida, é praticamente inevitável o surgimento de *flicker* na rede elétrica decorrente de sua utilização. Desenvolver técnicas de modulação de potência que diminuam esses efeitos é algo fundamental, visto que no Brasil os chuveiros elétricos e eletrônicos ainda são largamente utilizados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A importância desta investigação está no fato de tratar-se de um equipamento presente em boa parte das residências. No Brasil, a substituição de chuveiros elétricos por eletrônicos tem aumentado consideravelmente. Isto representa um passo importante para um melhor aproveitamento de água e energia. Porém, isso demanda um cuidado especial com a técnica de modulação de potência empregada, pois os diferentes métodos de comutação usados podem acarretar em efeitos indesejáveis à rede. É o caso do Controle por Ciclos Inteiros, onde é praticamente inevitável o surgimento de *flicker* na rede elétrica, principalmente quando esta não for dimensionada de forma correta.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Otimizar a técnica tradicional de Controle por Ciclos Inteiros para aquecimento resistivo de água visando atenuar o efeito *flicker* na rede elétrica, propiciando uma boa quantidade de níveis de potência.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar as técnicas de modulação de potência disponíveis através de revisão bibliográfica;
- Propor novas técnicas de modulação de potência com referência no Controle por Ciclos Inteiros tradicional, com foco na diminuição do efeito *flicker*;
- Adaptar novas técnicas para uso com dois e três elementos resistores em paralelo.

1.4 METODOLOGIA

Este projeto foi desenvolvido utilizando os métodos citados abaixo:

- Pesquisa bibliográfica;
- Desenvolvimento de um ambiente de testes utilizando a estrutura e os recursos disponíveis nos laboratórios da UNIPAMPA;

- Testes das soluções utilizando aproximações teóricas, simulador de flutuação de tensão e entrevista com voluntários.

A pesquisa caracteriza-se por ser exploratória descritiva, visto que busca o desenvolvimento e posterior análise de uma possível solução para um problema proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A eletrônica de potência tem tido grande importância na evolução dos chuveiros elétricos tradicionais, que cada vez mais estão cedendo espaço para os modelos eletrônicos.

Os chuveiros convencionais operam de forma linear, com resistências de tamanho fixo (normalmente duas) e poucas possibilidades de variação de potência. Os mais comuns possuem apenas três níveis de temperatura: desligado, morno (potência média) e quente (potência máxima). Como desvantagem, neste caso, muitas vezes para se chegar à temperatura ideal posiciona-se o chuveiro na temperatura "quente" e aumenta-se a vazão de água, acarretando em um desperdício conjunto de energia e água.

Diferente do que ocorre com os chuveiros elétricos, os eletrônicos operam de forma não linear, modulando a potência entregue através de chaves comutadas. Dessa forma, pode-se ampliar os níveis de temperatura e, por consequência, ter um melhor aproveitamento de energia e água.

As principais técnicas eletrônicas de modulação de potência aplicadas em Corrente Alternada (CA) são: Controle por Ciclos Inteiros, Controle de Fase e AC Chopper.

As três técnicas citadas anteriormente apresentam boa qualidade no processo de aquecimento da água, mas podem gerar problemas na rede elétrica. As modulações por Controle de Fase e AC Chopper são as que mais deformam o sinal elétrico (forma de onda), gerando efeitos como harmônicas e IEM. Já o Controle por Ciclos Inteiros tende a não apresentar tais problemas, visto que não deforma o sinal. Porém, apresenta um efeito chamado cintilamento, também conhecido como *flicker* (em inglês), que ocasiona oscilação na tensão da rede elétrica, alternando a intensidade de iluminação das lâmpadas instaladas no mesmo ambiente.

Dessa forma, este capítulo, que tem como objetivo apresentar um panorama geral sobre as técnicas de modulação de potência aplicadas ao aquecimento resistivo em corrente alternada, está dividido em três partes: *flicker*; técnicas não lineares de modulação de potência; e, aquecimento de água residencial.

2.1 FLICKER

Cintilamento, ou *flicker*, é um sintoma de flutuação de tensão que causa variação cíclica da intensidade de luz de lâmpadas. Este fenômeno pode ser causado por perturbações

introduzidas durante a geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica, bem como pelo uso de cargas com elevada taxa de variação de potência ligadas na mesma rede onde estão instaladas as lâmpadas de iluminação [3].

Figura 1 - Flutuação de tensão

Do ponto de vista fisiológico, o *flicker* afeta o processo de visão e a reação do cérebro humano, causando fadiga, desconforto e redução dos níveis de concentração dos indivíduos presentes no ambiente onde há oscilações da intensidade de iluminação, sendo mais dominante na periferia do campo visual do que naquelas áreas nas quais a atenção do observador é focalizada [4]. Daí a maior preocupação com os sistemas de iluminação.

De acordo com [2], a intensidade do *flicker* depende basicamente de três fatores físicos:

– nível da flutuação de tensão (amplitude);

– frequência com que a flutuação de tensão ocorre;

– tipo de lâmpada.

Somado a estes fatores, a percepção do *flicker* também pode ser determinada pelas condições do ambiente, bem como pelo estado físico e psicológico do indivíduo exposto ao fenômeno.

2.1.1 Medição de Flicker

Em [4] é apresentada uma pesquisa que resultou no medidor de cintilamento UIE (*International Union for Electricity Applications*), onde demonstrou-se que a resposta do olho humano tem característica semelhante à de um filtro passa-faixa entre 0,5Hz e 35Hz, ou seja, valores acima de 2100 variações de tensão por minuto não são percebidas pela visão humana.

A Figura 2 apresenta o gráfico publicado por [2] com o limiar de percepção do *flicker* em relação ao percentual de variação de tensão (eixo y), neste momento definido como $\Delta U/\hat{U}$, e a quantidade de comutações por minuto (eixo x). Onde a intensidade e a frequência das

variações situam-se acima da curva, é provável que o efeito esteja perturbando um observador humano, enquanto que, abaixo da curva, é provável que o efeito seja imperceptível. Este gráfico, também chamado de curva Cenelec, foi obtido através de testes com lâmpadas incandescentes de 60W, 230V.

De acordo com a Figura 2, variações de tensão acima de cerca de 1800 comutações por minuto não são percebidas pela visão humana.

Figura 2 – Curva Cenelec
Fonte: Schlabbach, Blume, Stephanblome

Um gráfico semelhante é apresentado por [5] e pela norma 61000-3-3 [6]. Neste caso, em relação ao gráfico da Figura 2, existe uma diferença com relação ao número mínimo de comutações por minuto não percebidas pela visão humana, que agora é 2800, conforme Figura 3.

Figura 3 – Curva IEC 61000-3-3

2.2 TÉCNICAS NÃO LINEARES DE MODULAÇÃO DE POTÊNCIA

Grande parte dos equipamentos utilizam atuadores lineares, com queda de tensão proporcional à sua impedância. Estes métodos, ainda que de fácil implementação, apresentam alta dissipação de energia.

Uma forma de mitigar este problema é através do uso de chaves semicondutoras. Dessa forma, as chaves atuarão conforme a carga sobre elas, caracterizando um filtro com função similar aos atuadores lineares, com a vantagem de não apresentarem perdas de energia devido à dissipação de calor.

Atualmente, as principais técnicas de modulação de potência utilizadas em CA são: Controle por Ciclos Inteiros [7], Controle de Fase [7] e AC Chopper [8].

Estas técnicas podem ser implementadas utilizando um circuito conforme Figura 4, que faz uso de tiristores do tipo SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) S_1 e S_2, ou através do uso de TRIAC (*Triode for Alternating Current*).

Figura 4 - Modelo de circuito

Assim, esta seção apresenta as principais técnicas de modulação de potência utilizadas em CA, bem como o Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados [9]. Ao final também é apresentado um quadro comparativo das técnicas, enfatizando as vantagens e desvantagens provenientes do uso de cada uma delas.

2.2.1 Controle por Ciclos Inteiros

O Controle por Ciclos Inteiros parte do uso de chaveamento síncrono. Diferente do que ocorre com o chaveamento comum, o chaveamento síncrono atua em períodos pré-determinados. Neste caso, existe uma relação entre intervalo de tempo e quantidade de semiciclos, de forma que o tempo estabelecido não interrompa um semiciclo.

Para evitar que um semiciclo seja interrompido, a comutação deve ocorrer apenas se a corrente ou tensão forem nulas, o que caracteriza o fim de um semiciclo e início de outro. Dessa forma, para uma frequência de 60Hz, cada segundo possui 120 semiciclos, ou seja, 120 instantes para comutação. Definido um período T, a chave ficará parte dele em estado de condução e parte em estado de bloqueio, o que caracterizará a modulação [7].

A Figura 5 ilustra um exemplo desta técnica. A forma de onda mostrada corresponde à tensão aplicada à carga. T é o período de tempo de referência. Já T_{ON} é o período durante o qual a chave está acionada e se transfere energia à carga.

Uma das vantagens desta técnica de modulação é a redução de problemas de IEM em alta frequência. De acordo com [10], testes com modulação de potência utilizando Controle por Ciclos Inteiros mostram que, em condições ideais, também não há geração significativa de harmônicas.

Figura 5 - Operação de Controle por Ciclos Inteiros

O primeiro teste foi executado utilizando-se como referência 40% da potência total do sistema e um período T de 12 ciclos. A componente fundamental obteve 43,7A, e a de 3ª ordem (segunda mais alta) 0,057A. Já para um segundo teste, foi utilizado como referência 80% da potência total do sistema e um período T de 30 ciclos. Dessa vez, a componente fundamental obteve 45,5A, e a de 3ª ordem (segunda mais alta) 0,076A.

Os testes de THD (do inglês *Total Harmonic Distortion*) de corrente resultaram em 0,078% e 0,076% para 40% e 80% da potência, respectivamente. Já para THD de tensão, os resultados foram 0,022% e 0,04% para 40% e 80% da potência, respectivamente.

Os bons resultados se devem, principalmente, ao fato de o Controle por Ciclos Inteiros não deformar a forma de onda, visto que executa as comutações sempre durante a passagem da corrente por zero.

Em contrapartida, podem haver problemas decorrentes de flutuação na tensão (*flicker*) da rede, devido às comutações de carga (cargas com variações rápidas de demanda). A norma internacional IEC 6100-3-3 [6] estabelece limites de flutuações em baixa frequência.

A Tensão (V_o) e Corrente (I_o) na carga podem ser calculadas, respectivamente, pelas equações eq.(1) e eq.(2) [7]:

$$V_o = V_{in}\sqrt{\frac{T_{ON}}{T_{OFF}}} \tag{1}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} \tag{2}$$

onde V_{in} corresponde à tensão de entrada e R corresponde à resistência.

A potência final entregue pelo circuito (P_o) pode ser extraída através da eq.(3) [7].

$$P_o = {I_o}^2 R \tag{3}$$

2.2.2 Controle de Fase

O Controle de Fase consiste em acionar a chave em um determinado ângulo, de forma que a passagem de corrente ocorra em um período igual ou menor que um semiciclo. A Figura 6 ilustra a forma de onda resultante na carga.

Figura 6 – Operação de Controle de Fase

Para o caso de uma carga resistiva, o desligamento da chave ocorrerá quando a tensão cair a zero. A partir deste momento começa-se a contagem do ângulo de disparo para o novo acionamento desta.

A desvantagem é que esta técnica produz uma saída com amplo conteúdo espectral e em baixas frequências, dificultando uma eventual filtragem, caso necessário, devido aos elevados valores de indutância e capacitância necessários. Porém, existe uma menor flutuação de tensão, quando comparado ao Controle por Ciclos Inteiros [11].

No caso da implementação desta técnica deve-se ter um cuidado especial com o tratamento das harmônicas, principalmente devido às inevitáveis distorções de corrente que são geradas pela modulação por Controle de Fase. Conforme [12], quanto maior o ângulo de disparo, maior será a amplitude da harmônica gerada.

De acordo com [10], testes com modulação de potência por Controle de Fase mostram que, em condições ideais, há geração significativa de harmônicas. O primeiro teste foi executado utilizando-se como referência 40% da potência total do sistema. A componente fundamental obteve 22,97A, e as de 3ª e 5ª ordem (segunda e terceira mais alta) 13,71A e 4,84A, respectivamente. Já para um segundo teste, foi utilizado como referência 80% da potência total do sistema. Dessa vez, a componente fundamental obteve 36,59A, e as de 3ª e 5ª ordem (segunda e terceira mais alta) 10,52A e 6,02A, respectivamente.

Os testes de THD de corrente resultaram em 70,14% e 36,56% para 40% e 80% da potência, respectivamente. Já para THD de tensão, os resultados foram 0,000385% e 0,00117% para 40% e 80% da potência, respectivamente.

A Tensão (V_o) na carga pode ser calculada pela equação eq.(4) [7]:

$$V_o = V_{in}\left[\frac{1}{2\pi}\left(2\pi - \alpha + \frac{sin\ 2\alpha}{2}\right)\right]^{1/2} \tag{4}$$

onde V_{in} corresponde à tensão de entrada e α corresponde ao ângulo de disparo.

A Corrente na carga (I_o) e Potência final entregue pelo circuito (P_o) podem ser calculadas, respectivamente, pelas equações eq.(2) e eq.(3) [7].

2.2.3 AC Chopper

Em [8] apresenta-se a técnica chamada AC Chopper, que possui como característica principal a execução de várias comutações por semiciclo da frequência de alimentação. A Figura 7 mostra a forma de onda resultante.

No controle AC Chopper a largura de cada período de condução dentro de um semiciclo define a potência a ser entregue pelo circuito. Esta técnica, aplicada à CA, é inspirada na técnica PWM (*Pulse Width Modulation*), muito utilizada em Corrente Contínua (CC), principalmente em conversores CC-CC para ativação de chaves eletrônicas.

Figura 7 – Operação de Controle AC Chopper

A Potência final entregue pelo circuito (P_o) pode ser extraída através da eq.(5):

$$P_o = \frac{{V_{in}}^2}{R} \tag{5}$$

onde V_{in} corresponde à tensão de entrada e R corresponde à resistência. Neste caso a resistência tem valor fixo e a variação ocorre na tensão de entrada [7].

2.2.4 Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados

O Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados apresentado em [9] busca atenuar o *flicker* através de uma comutação por ciclos inteiros modificada, que permite o aumento da frequência de oscilação. Dessa forma, é definido um período T igual a três ciclos, de forma que a frequência de comutação seja sempre maior que 30Hz e o nível de CC seja sempre nulo (cada semiciclo positivo é compensado por um semiciclo negativo sucessivo). As Figuras 8 e 9, somadas à condução total ou bloqueio total, definem as quatro possibilidades de potência possíveis deste método sem a percepção de *flicker*.

Figura 8 - Obtenção de 1/3 da potência total
Preto: forma de onda de tensão na resistência; Cinza: forma de onda da rede; Vermelho: acionamento do TRIAC.
Adaptado de: Cláudio José de Oliveira Júnior (2006)

Figura 9 - Obtenção de 2/3 da potência total
Preto: forma de onda de tensão na resistência; Cinza: forma de onda da rede; Vermelho: acionamento do TRIAC.
Adaptado de: Cláudio José de Oliveira Júnior (2006)

Para ampliar a quantidade de níveis de potência é necessário que sejam adicionados mais elementos aquecedores. O pré-requisito neste caso é que cada elemento aquecedor adicionado apresente o dobro da potência do anterior para que os níveis sejam igualmente distribuídos. A Tabela 1 apresenta um panorama de quantidade de níveis de potência por número de elementos aquecedores.

Tabela 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

Fonte: Claudio José de Oliveira Júnior (2006)

De acordo com [9], a técnica de Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados não gera componentes harmônicos múltiplos inteiros de 60Hz, apenas algumas inter-harmônicas múltiplas de 20Hz. Também não foram identificadas harmônicas ímpares comuns (180Hz e 300Hz).

Para calcular a potência final entregue pelo circuito (P_o), pode-se utilizar a eq.(6) [9]:

$$P_o = P_{máx} \frac{T_{ON}}{T} \tag{6}$$

onde $P_{máx}$ corresponde à potência máxima do sistema.

2.2.5 Quadro Comparativo das Técnicas

Nesta seção são analisadas as principais técnicas de modulação de potência, com aplicações voltadas ao aquecimento de água, sob diversos quesitos, como: IEM, *flicker*, harmônicas, eficiência e precisão no gerenciamento da temperatura. Trata-se de uma análise superficial, visto que para obtenção de valores mais precisos faz-se necessário o uso de recursos mais sofisticados, como: modelagem computacional, simulação, teste em laboratório, etc.

As análises foram feitas utilizando como referência as técnicas de modulação de potência Controle por Ciclos Inteiros, Controle de Fase, AC Chopper e Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados.

Tabela 2 - Características do controle por ciclos inteiros

Controle por Ciclos Inteiros	
IEM	Devido ao fato de as comutações ocorrerem sempre no estado zero de corrente, bem como trabalhar com uma frequência relativamente baixa (quando comparada a outras técnicas), praticamente não há geração de IEM.
Flicker	A baixa frequência de trabalho faz com que exista grande probabilidade de geração de *flicker* na rede elétrica.
Harmônicas	Em condições ideais, praticamente não há geração de harmônicas [10].
Eficiência	Eficiência energética média de 96,3% [8].
Precisão (temperatura)	Temperatura selecionada é estabelecida após 10 segundos [8].

Fonte: Iserhardt (2014)

Como pode ser visto na Tabela 2, o Controle por Ciclos Inteiros apresenta pouca probabilidade de geração de harmônicas e IEM. Em contrapartida, é praticamente inevitável o surgimento de *flicker* na rede elétrica.

Tabela 3 - Características do controle de fase

Controle de Fase	
IEM	As altas taxas de variação de corrente e de tensão, somadas à deformação dos semiciclos, aumenta a probabilidade de geração de IEM.
Flicker	A alta frequência de trabalho faz com que não haja geração de *flicker* na rede elétrica.
Harmônicas	Em condições ideais há geração significativa de harmônicas [10].
Eficiência	Eficiência energética média de 96% [8].
Precisão (temperatura)	Temperatura selecionada é estabelecida após 6 segundos [8].

Fonte: Iserhardt (2014)

Como pode ser visto na Tabela 3, o Controle de Fase apresenta grande probabilidade de geração de harmônicas e IEM. Como ponto positivo, não há existência de *flicker* decorrente de sua utilização.

Tabela 4 - Características do controle AC Chopper

AC Chopper	
IEM	A alta frequência de trabalho, somada à deformação dos semiciclos, aumenta a probabilidade de geração de IEM.
Flicker	A alta frequência de trabalho faz com que não haja geração de *flicker* na rede elétrica.
Harmônicas	Em condições ideais há geração significativa de harmônicas [8].
Eficiência	Eficiência energética média de 92,7% [8].
Precisão (temperatura)	Temperatura selecionada é estabelecida após 10 segundos [8].

Fonte: Iserhardt (2014)

Como pode ser visto na Tabela 4, a exemplo do que ocorre com o Controle de Fase, o Controle AC Chopper não gera *flicker* na rede, mas apresenta grande probabilidade de geração de harmônicas e IEM. Também nota-se uma menor eficiência energética quando comparado às demais técnicas, possivelmente devido à grande quantidade de comutações por semiciclo.

Tabela 5 - Características do controle por semiciclos inteiros otimizados

Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados	
IEM	Devido ao fato de as comutações ocorrerem sempre no estado zero de corrente, bem como trabalhar com uma frequência relativamente baixa (quando comparada a outras técnicas), praticamente não há geração de IEM [9].
Flicker	Este controle propõe comutações na faixa de 40Hz, um valor acima do limiar de desconforto de olho humano, não gerando *flicker* [9].
Harmônicas	Em condições ideais não há geração significativa de harmônicas [9].
Eficiência	Eficiência energética média entre 96% e 96,3%.
Precisão (temperatura)	A pouca variedade de níveis de potência fornecida por este método pode acarretar em dificuldade para se chegar à temperatura ideal.

Fonte: Iserhardt (2014)

Como pode ser visto na Tabela 5, o Controle por Semiciclos Inteiros Otimizados corrige o problema de *flicker* aplicado ao Controle por Ciclos Inteiros, bem como diminui a probabilidade de geração de harmônicas e IEM. Em contrapartida, utilizando apenas um

elemento aquecedor fornece apenas quatro níveis de potência, um valor bem abaixo do suficiente para se obter um controle preciso de temperatura.

2.3 AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL

Atualmente, existem diversos métodos utilizados para aquecimento de água residencial. Inicialmente os aquecedores de água podem ser classificados em dois grupos: instantâneos e de acumulação.

Os instantâneos aquecem a água no instante em que é utilizada. Dessa forma, é imprescindível que equipamentos com esta característica tenham potência suficiente para gerar o aquecimento necessário em tempo real.

Os aquecedores de acumulação podem trabalhar com menor potência nominal. Isso é possível devido ao fato de o processo de aquecimento ocorrer de forma mais lenta, visto que a água aquecida será estocada em um reservatório (com propriedades de conservação térmica) para uso posterior.

Um importante representante de aquecedor instantâneo é o chuveiro elétrico. Como exemplo de aquecedor de acumulação pode-se citar o aquecimento de água através de sistemas solares.

2.3.1 Chuveiro Elétrico

O baixo custo aliado à praticidade de instalação fez do chuveiro elétrico o padrão mais utilizado nas residências brasileiras. Atualmente, calcula-se que o chuveiro consome de 6,2% a 8,7% do total de energia elétrica produzida no país, sem contar que sua maior incidência de uso ocorre nos horários entre 18h e 20h, quando o consumo geral de energia é consideravelmente mais alto [13].

Outro fator que também contribui para os altos índices de consumo é a evolução da potência dos chuveiros elétricos. Enquanto os equipamentos comercializados nos anos 60 tinham potência elétrica em torno de 2,5kW, os atuais atingem potências de 7,5kW. Segundo [14] o consumo instantâneo médio de energia de uma residência é de 0,5kW. Após ligar o chuveiro elétrico, este valor passa a ser de 5,0kW.

A Figura 10 apresenta o esquemático de um chuveiro elétrico com três regulagens de temperatura. Alguns fabricantes, como a Thermosystem [15], fabricam chuveiros elétricos com até oito opções de temperatura.

Figura 10 - Chuveiro elétrico

A Tabela 6 apresenta os índices de economia de energia obtidos em cada estágio de temperatura utilizando este modelo de chuveiro, onde a posição 0 representa potência zero (desligado) e 7 representa potência máxima [15].

Tabela 6 - Tabela de economia de energia para vazão de 3,0 L/min

Nível de Potência	**Potência**		**Economia**	
	127V	**220V**	**127V**	**220V**
0	0	0	100%	100%
1	900W	1000W	85%	85%
2	1500W	2000W	71%	71%
3	2400W	3000W	57%	56%
4	3100W	3800W	44%	44%
5	4000W	5000W	28%	27%
6	4600W	6000W	17%	12%
7	5500W	6800W	0%	0%

Fonte: Thermosystem (2013)

2.3.1.1 Funcionamento do Chuveiro Elétrico

O chuveiro elétrico possui quatro componentes básicos: o diafragma, o misturador, a resistência elétrica e o espalhador.

Sua operação é basicamente a seguinte: a capacidade de vazão de água que entra no chuveiro é maior que a capacidade de vazão que sai, pois a saída é dificultada pelo espalhador (pequenos furos localizados na parte inferior do misturador). Esta oposição à saída, além de tornar o banho mais agradável, faz com que o misturador (também chamado de câmara quente) encha de água. Neste momento a pressão da água que sobe internamente no misturador empurra para cima o diafragma, que aciona os contatos elétricos que ligam o chuveiro. No momento em que o fornecimento de água é interrompido (desligamento do chuveiro), a água localizada no misturador desce, baixando o diafragma e, por consequência, desconectando os contatos elétricos que mantém o chuveiro em funcionamento [9].

A resistência elétrica, que é composta por um fio de metal enrolado por onde circula a corrente elétrica, fica localizada no interior do misturador. Sua função é aquecer a água. O tamanho (valor) da resistência é inversamente proporcional à temperatura de saída da água, ou seja, quanto menor a resistência, maior a temperatura. Esta afirmação é satisfeita pela eq.(5).

Partindo do princípio de que a Tensão V_{in} é constante, quanto menor a Resistência R, maior será a Potência P. O cálculo da resistência pode ser feito através da eq.(7):

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \tag{7}$$

onde ρ representa a resistividade, correspondente ao material do qual é construído o fio. Como os fios de resistências de chuveiros normalmente são construídos de níquel-cromo, segundo [16], para este material a resistividade ρ = 1,37 Ω. Ainda na eq.(10), L representa o comprimento do fio e A a área da seção transversal. No caso específico do chuveiro elétrico, tanto A quanto ρ são constantes. Logo, o comprimento do fio L é que determina a resistividade.

Normalmente os chuveiros elétricos apresentam ao menos 3 regulagens de temperatura: inverno (resistência pequena), verão (resistência grande) e desligado (água com temperatura natural, sem aquecimento).

Como já mencionado anteriormente, existem chuveiros elétricos que apresentam 8 regulagens de temperatura. Segundo [15], estes modelos de chuveiro possuem três resistências: uma de 1000W, uma de 2000W e outra de 3800W. Através da combinação destas se torna possível a obtenção dos 8 níveis de temperatura.

2.3.1.2 Potencial de Economia de Energia do Chuveiro Elétrico

Entre os vários modelos de chuveiros elétricos disponíveis no mercado, os mais facilmente encontrados são os de 3, 4 ou 8 opções de temperatura. Para análise do potencial de economia de energia, um produto de cada modelo foi avaliado. Os resultados mostram que quanto maior a quantidade de opções de temperatura disponíveis, melhor é o aproveitamento de energia.

Nas figuras 11, 12 e 13 variou-se a potência desejada na saída de 0 até a potência nominal da ducha. Por exemplo, na Figura 11 somente se pode obter dois níveis de potência na saída. Dessa forma, considera-se como potência desperdiçada a diferença entre a potência real consumida e a potência ideal consumida (a potência que se deseja consumir). Isso ocorre porque o usuário que deseja obter um nível intermediário de potência (em função da temperatura) irá aumentar a vazão de água de forma a compensar essa diferença entre as potências.

Figura 11 - Potencial de economia de energia - Corona Gorducha
Fonte: Corona (2014)

Figura 12 - Potencial de economia de energia - Corona Duchassa
Fonte: Corona (2014)

Figura 13 - Potencial de economia de energia – Thermosystem 8T
Fonte: Thermosystem (2013)

2.3.2 Chuveiro Eletrônico

Os chuveiros elétricos convencionais, por possuírem poucas opções de variação de temperatura, frequentemente forçam os usuários a utilizarem a potência máxima do equipamento e controlar a temperatura através do aumento ou diminuição da vazão de água. Por consequência, há um desperdício de energia. Os chuveiros eletrônicos, por possuírem um controle fino de potência, otimizam o uso de energia e apresentam uma precisão maior no ajuste da temperatura, o que torna desnecessário a regulagem através do controle de vazão da água.

A Tabela 7 apresenta os índices de economia de energia obtidos com o uso de chuveiro eletrônico [15].

Tabela 7 - Tabela de economia de energia para vazão de 3,0 L/min

Posição	**Potência**	**Economia**
	7700W	**7700W**
Faixa Verde	0 a 500W	100 a 91%
Faixa Amarela	500 a 3800W	91 a 50%
Faixa Vermelha	3800 a 7700W	50 a 0%

Fonte: Thermosystem (2014)

2.3.2.1 Funcionamento do Chuveiro Eletrônico

No chuveiro eletrônico a técnica de modulação mais comum é o Controle de Fase, onde o controle da potência é feito através de um TRIAC, que determina o ângulo de disparo nos semiciclos da corrente alternada da rede de energia. Cada ampère de corrente conduzida por um TRIAC dissipa em média 2W sob a forma de calor [17].

No gate do TRIAC é ligado o DIAC, do inglês *DIode for Alternating Current*, um diodo que conduz corrente apenas após a tensão de disparo ser atingida, e uma rede RC (Resistor-Capacitor) de retardo que determina o ponto de disparo do semicondutor em cada semiciclo da tensão alternada da rede de energia. Dessa forma, na subida do semiciclo da rede de energia, o capacitor C_1 começa a se carregar pelo potenciômetro R_{POT} e pelo resistor em série R_1 até que seja atingido o ponto de disparo do DIAC [17]. Ou seja, o potenciômetro determina o ajuste da resistência que, quando esta for pequena, o capacitor carregará rapidamente e logo o TRIAC será disparado. Neste caso o chuveiro atuará com uma potência

alta. Se a resistência no potenciômetro for grande, o capacitor demorará a carregar e, por consequência, o TRIAC será disparado mais ao final do semiciclo, de forma que o chuveiro atuará com uma potência mais baixa. A Figura 14 mostra um diagrama elétrico de chuveiro eletrônico, com destaque para o uso de capacitores e tiristores (TRIAC).

Figura 14 - Diagrama elétrico de chuveiro eletrônico

2.3.2.2 Potencial de Economia de Energia do Chuveiro Eletrônico

Ainda que sejam registradas perdas nos processos de comutação, os chuveiros eletrônicos possuem um bom potencial de economia de energia, visto que possibilitam um ajuste fino da temperatura, evitando que esta seja forçadamente regulada através do fluxo de água. Pode-se dizer que o índice de economia de energia está diretamente ligado ao nível de precisão na regulagem da temperatura, que, por sua vez, está diretamente ligado à eficiência do circuito elétrico, guardadas as devidas características de cada técnica empregada.

Por exemplo, para os chuveiros que utilizam Controle de Fase ou AC Chopper, a precisão está em conformidade com a quantidade de pontos de ângulo que podem ser utilizados para o disparo do TRIAC. Quanto maior a quantidade destes pontos, em mais partes poderão ser “quebrados” os semiciclos e, por consequência, melhor será a precisão da temperatura selecionada.

Para os chuveiros que utilizam Controle por Ciclos Inteiros, o nível de precisão corresponde ao tamanho definido para o período T. Quanto maior o período T, maior será o nível de precisão da temperatura.

3 TÉCNICAS PROPOSTAS

Esta seção apresenta as técnicas propostas neste trabalho, resultado de um projeto de otimização do Controle por Ciclos Inteiros tradicional. O objetivo principal destas técnicas é atenuar o efeito *flicker* na rede elétrica, que vem a ser a principal desvantagem no uso do Controle por Ciclos Inteiros.

Ainda que o foco principal seja prover vários níveis de potência utilizando apenas um elemento aquecedor (resistência), também são apresentadas adaptações das técnicas para uso com dois e três elementos aquecedores em paralelo.

3.1 CICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL

A técnica aqui proposta é direcionada a equipamentos com aquecimento resistivo que necessitem de uma combinação de vários níveis de potência utilizando apenas um elemento aquecedor. Trata-se de um algoritmo que objetiva diminuir o *flicker* em Controle por Ciclos Inteiros através de um dimensionamento automático do tamanho do período T, de forma que seja utilizado o mínimo tamanho possível deste para se obter o nível de potência desejado. Com isso, aumenta-se o número de comutações e, por consequência, diminui-se o *flicker*.

No sistema tradicional de modulação por Ciclos Inteiros, se, por exemplo, for definido um período T de 1 segundo (60 ciclos) e a modulação selecionada for de 50%, metade do período T será de condução de corrente e a outra metade será de bloqueio. Isso, na prática, resultará em um *flicker* com oscilação de luminosidade a cada meio segundo, nitidamente perceptível à sensibilidade da visão humana.

Com a técnica proposta, o mesmo valor de 50% de potência objetivada é automaticamente dimensionado para um período T de dois ciclos (2/60 segundos, considerando-se uma frequência de 60Hz). Durante o primeiro ciclo, com duração de 1/60 segundos, haverá condução de corrente; durante o segundo ciclo (1/60 segundos) a chave estará bloqueada; durante o terceiro, acionada; durante o quarto, bloqueada; e assim sucessivamente. Isso proporcionará um intervalo máximo entre uma comutação e outra de 1/60 segundos, provavelmente imperceptível à sensibilidade da visão humana.

Além de otimizar o período T, utilizando o menor tamanho possível para alcançar a potência desejada, o algoritmo também executa os ciclos correspondentes aos períodos T_{ON} e T_{OFF} de forma espaçada (sequência intercalada), a fim de evitar que os menores intervalos

entre condução e não condução de corrente sejam maiores que um ciclo. Considerando que uma das maiores causas de geração de *flicker* está nos longos intervalos de condução e não condução de corrente em sequência. Essa funcionalidade proporcionada pelo algoritmo passa a ser extremamente relevante na solução deste problema.

A Figura 15 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto. A definição do período T é feita através do Máximo Divisor Comum (MDC) entre a potência máxima (*Max*) e a potência selecionada (*Sel*).

$$T = \frac{Max}{MDC(Sel,Max)} \tag{8}$$

Um exemplo prático da eq.(8) seria considerar uma potência máxima de 60W e uma potência selecionada (objetivada) de 26W. Como MDC(60,26)=2; logo T=60/2, ou seja T=30.

O MDC é parte fundamental para definição das variáveis T, T_{ON} e T_{OFF}. A variável T serve para definir o menor tamanho possível de período T para a potência selecionada.

Já a variável T_{ON} é a porção de T em que o circuito ficará em estado de condução, enquanto a variável T_{OFF} é a porção de T em que o circuito ficará aberto.

$$T_{ON} = \frac{Sel}{MDC(Sel,Max)} \tag{9}$$

$$T_{OFF} = T - T_{ON} \tag{10}$$

As variáveis *Div* e *Resto* correspondem, respectivamente, ao quociente e resto das divisões de T_{OFF} por T_{ON} (para $T_{OFF} > T_{ON}$) ou T_{ON} por T_{OFF} (para $T_{ON} >= T_{OFF}$).

Na Figura 16 pode ser visto detalhadamente o processo de otimização, utilizando como exemplo um período T de 10 ciclos (T=10) e potência selecionada de 40%. Esta figura mostra o resultado para o modelo tradicional de Controle por Ciclos Inteiros onde, dos 10 ciclos que compõem o período T, 4 são destinados a T_{ON} (referentes à condução de corrente) e 6 destinados a T_{OFF}.

O modelo tradicional apresentado na Figura 16 entregará uma potência final correspondente a 40% da potência total, onde certamente haverá geração de *flicker* devido aos longos intervalos entre condução e não condução de corrente.

Figura 15 - Fluxograma para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Figura 16 - Modulação padrão para Ciclos Inteiros
Preto: T_{ON}; Cinza: T_{OFF}

O algoritmo proposto pelo controle Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, em uma primeira etapa de otimização, buscará o menor tamanho possível para o período T sem afetar a potência final objetivada. Isto pode ser visto na Figura 17, em que o período T é reduzido de 10 para 5 ciclos, onde 2 ciclos são destinados ao T_{ON} e 3 ciclos destinados ao T_{OFF}. A potência final continua sendo 40% da potência total, porém há uma atenuação do efeito *flicker* devido ao aumento da frequência de trabalho.

Figura 17 - 1ª etapa de otimização
Preto: T_{ON}; Cinza: T_{OFF}

Em uma segunda etapa de otimização, os ciclos de T_{ON} e T_{OFF} são distribuídos de forma intercalada, garantindo que os menores intervalos não sejam maiores que um ciclo. A Figura 18 mostra os menores intervalos (ciclos de T_{ON}) separados por ciclos de T_{OFF}. Dessa forma têm-se um aumento da frequência (a fim de atenuar o *flicker*), sem deixar de entregar os 40% da potência final objetivada.

Figura 18 - 2ª etapa de otimização
Preto: T_{ON}; Cinza: T_{OFF}

O algoritmo proposto na Figura 15 foi implementado em linguagem C, simulando um chuveiro eletrônico com variação de potência de 0 a 6000W, onde apresentou resultados condizentes com o objetivo da aplicação, conforme Figura 19. Nota-se que para cada potência selecionada são estabelecidos os períodos T, T_{ON}, T_{OFF} e sequência de execução dos ciclos.

Para as duas potências selecionadas para o teste (3600W e 4200W), o algoritmo cumpriu com os dois principais objetivos: minimizar o período T; e, não permitir que os menores intervalos sejam maiores que um ciclo.

Figura 19 - Implementação em linguagem de programação C

A Tabela 8 apresenta o resultado do algoritmo implementado para 61 níveis de potência (0 a 60), onde 0 representa a potência mínima e 60 representa a potência máxima do sistema. Para cada nível de potência é possível verificar o (novo) período T, quantidade de ciclos de condução (T_{ON}), quantidade de ciclos de não condução (T_{OFF}) e percentual de potência gerada, evidenciando a primeira etapa de otimização do algoritmo, que é reduzir o período T ao menor tamanho possível.

Tabela 8 - Período T para cada nível de potência

Nível Potência	T (ciclos)	T_{ON} (ciclos)	T_{OFF} (ciclos)	% Potência
0	1	0	1	0
1	60	1	59	1
2	30	1	29	3
3	20	1	19	5
4	15	1	14	6
5	12	1	11	8
6	10	1	9	10
7	60	7	53	11
8	15	2	13	13
9	20	3	17	15
10	6	1	5	16
11	60	11	49	18
12	5	1	4	20
13	60	13	47	21
14	30	7	23	23
15	4	1	3	25
16	15	4	11	26
17	60	17	43	28
18	10	3	7	30
19	60	19	41	31
20	3	1	2	33
21	20	7	13	35
22	30	11	19	36
23	60	23	37	38
24	5	2	3	40
25	12	5	7	41
26	30	13	17	43
27	20	9	11	45
28	15	7	8	46
29	60	29	31	48
30	2	1	1	50
31	60	31	29	51
32	15	8	7	53
33	20	11	9	55
34	30	17	13	56

35	12	7	5	58
36	5	3	2	60
37	60	37	23	61
38	30	19	11	63
39	20	13	7	65
40	3	2	1	66
41	60	41	19	68
42	10	7	3	70
43	60	43	17	71
44	15	11	4	73
45	4	3	1	75
46	30	23	7	76
47	60	47	13	78
48	5	4	1	80
49	60	49	11	81
50	6	5	1	83
51	20	17	3	85
52	15	13	2	86
53	60	53	7	88
54	10	9	1	90
55	12	11	1	91
56	15	14	1	93
57	20	19	1	95
58	30	29	1	96
59	60	59	1	98
60	1	1	0	100

Fonte: Iserhardt (2014)

Conforme pode ser visto na Tabela 8, para cada nível de potência selecionado é dimensionado um período T, composto por ciclos de condução (T_{ON}) e/ou de não condução (T_{OFF}) de corrente. Com esta otimização, possivelmente algumas potências gerem um índice, ainda que baixo, de *flicker* e outras consigam eliminá-lo totalmente.

3.1.1 Potência na Carga

Para o cálculo de potência deve-se utilizar a eq.(3), também utilizada no modelo tradicional de Controle por Ciclos Inteiros, visto que no resultado final, ainda que com o

dimensionamento do período T, este algoritmo manterá a mesma proporção de ciclos para T_{ON} e T_{OFF}. A distribuição intercalada dos ciclos de T_{ON} e T_{OFF} também não altera o valor final de potência na carga, apenas devendo ser considerado, neste caso, um índice de eficiência ligeiramente menor, visto que haverá uma maior quantidade de comutações em relação à técnica tradicional de Controle por Ciclos Inteiros.

3.2 CICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL – OTIMIZAÇÃO PARA DUAS RESISTÊNCIAS

Esta técnica propõe a utilização de dois elementos aquecedores (resistências) em paralelo, R_1 e R_2, sendo que a potência máxima de R_1 deverá ser o dobro da potência máxima de R_2. Cada uma das resistências é ligada em série com um componente de chaveamento (TRIAC), conforme apresentado simplificadamente na Figura 20.

Figura 20 - Circuito para duas resistências

Dependendo da potência selecionada, as comutações são executadas de forma distribuída entre as duas resistências, fazendo com que a modulação ocorra através da alternância de chaveamento entre R_1 e R_2. O objetivo é diminuir a queda de tensão e, por consequência, o *flicker* gerado na rede.

Abaixo, alguns parâmetros para a aplicação da técnica:

- como já comentado anteriormente, um dos pré-requisitos da técnica afirma que a potência máxima de R_1 deverá ser o dobro da potência máxima de R_2. Neste caso, R_1 e R_2 devem corresponder a 2/3 e 1/3 da potência total considerada, respectivamente;

- o período T inicial para ambos os elementos aquecedores (R_1 e R_2) deve ser o mesmo, de forma que cada ciclo de R_2 terá uma potência correspondente a meio ciclo de R_1. Se, por exemplo, cada ciclo ligado de R_1 corresponde a 1W de potência, cada ciclo ligado de R_2 corresponderá a 0,5W de potência.

A Tabela 9 apresenta possíveis valores para aplicação da técnica, considerando um chuveiro eletrônico com potência máxima de 6000W, obedecendo aos pré-requisitos estabelecidos acima. Estes valores serão utilizados como parâmetro para apresentação de exemplos no decorrer desta seção.

Tabela 9 - Valores correspondentes a um chuveiro 6000W com duas resistências

Grandeza	**Valor**
Período T	40 ciclos
Potência máxima em R_1	4000W
Potência máxima em R_2	2000W
Potência por ciclo ON em R_1	100W/ciclo
Potência por ciclo ON em R_2	50W/ciclo
Potência máxima total do sistema	6000W

Fonte: Iserhardt (2014)

Utilizando como exemplo os valores da Tabela 9, o objetivo da técnica é atuar de forma que não haja comutação com queda de potência acima de 50W de um ciclo para outro. Ou seja, quando do uso alternado das resistências, no momento em que R_1 for desligado, R_2 deverá ser ligado em sequência, evitando uma queda brusca de potência instantânea de 100W para 0W. O mesmo vale para os casos em que R_1 e R_2 estiverem ligados concomitantemente, gerando potência total de 150W por ciclo (resultado da soma das potências de R_1 e R_2). Neste caso, é aceitável apenas que seja desligado R_2, com R_1 continuando em estado de ligado, garantindo uma queda de potência não superior a 50W.

Para que o objetivo de limitar as quedas de potência durante o período T seja alcançado, é necessário que o algoritmo utilizado na aplicação da técnica satisfaça algumas condições. A Tabela 10 apresenta um resumo do comportamento da aplicação para cada nível de potência selecionado.

Tabela 10 - Comportamento da otimização para duas resistências
X - resistência não utilizada; T - resistência com uso total (potência máxima); A - algoritmo Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seção 3.1); A_2 - algoritmo Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável – Otimização para duas Resistências (seção 3.2).

Pot. Selecionada	**R_1**	**R_2**	**Períodos T_{ON}**
$Pot.Sel. = 0$	X	X	
$Pot.Sel < \frac{1}{3}$	X	A	
$Pot.Sel. = \frac{1}{3}$	X	T	
$\frac{1}{3} < Pot.Sel. < \frac{2}{3}$	A_2		$T_{ON}(R_1) = \left(Pot.\ Sel.\ - \left(Pot.Total\left(\frac{1}{3}\right)\right)\right)2$ $T_{ON}(R_2) = T - T_{ON}(R1)$
$Pot.Sel. = \frac{2}{3}$	T	X	
$\frac{2}{3} < Pot.Sel. < 1$	T	A	$T_{ON}(R_2) = \left(Pot.\ Sel.\ - \left(Pot.Total\left(\frac{2}{3}\right)\right)\right)$
$Pot.Sel. = 1$	T	T	

Fonte: Iserhardt (2014)

A seguir é apresentada uma explicação mais detalhada das principais regras do algoritmo.

3.2.1 Algoritmo para: Potência Selecionada < 1/3

Para este caso, como R_1 tem potência máxima de 2/3 da potência total e R_2 tem potência máxima de 1/3 da potência total, utiliza-se apenas R_2 para atingir a potência selecionada. Assim R_1 permanece constantemente desativado e para R_2 é aplicado o mesmo algoritmo utilizado na técnica de Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seção 3.1).

3.2.2 Algoritmo para: 1/3 < Potência Selecionada < 2/3

Neste caso, deve haver uma alternância entre R_1 e R_2, de forma a evitar quedas bruscas de potência, conforme já dito anteriormente. Devido à necessidade de sincronia entre as duas resistências, o período T deve ter a mesma duração para R_1 e R_2, ou seja, não é necessário o seu dimensionamento.

Tendo como dado de entrada a potência selecionada (neste caso maior que 1/3 e menor que 2/3 da potência total), o primeiro passo é definir os valores de T_{ON} para R_1 e R_2, que podem ser obtidos através das equações abaixo:

$$T_{ON}(R_1) = \left(Pot.Sel. - \left(Pot.Total\left(\frac{1}{3}\right)\right)\right)2 \tag{11}$$

$$T_{ON}(R_2) = T - T_{ON}(R_1) \tag{12}$$

onde $T_{ON}(R_1)$ e $T_{ON}(R_2)$ representam a quantidade de ciclos em que o TRIAC ficará ativado para R_1 e R_2, respectivamente. Já *Pot.Sel.* representa a potência selecionada, neste caso um valor entre 1/3 e 2/3 da potência total.

A Figura 21 apresenta o resultado do algoritmo implementado em linguagem C, utilizando como referência os níveis de potência da Tabela 9.

Figura 21 - Implementação em linguagem de programação C para duas resistências

Como pode ser visto na Figura 21, tendo 2600W como valor de potência selecionada (valor entre 0W e 6000W), o algoritmo executou comutações em R_1 e R_2 de forma alternada,

evitando quedas bruscas de potência acima de 50W. Nota-se que, nesse caso específico, não há em momento algum desligamento total do sistema, validando o objetivo principal deste algoritmo, que é diminuir o *flicker* na rede elétrica.

A Figura 22 mostra, em um intervalo de 6 ciclos, como ocorrem as comutações entre as resistências R_1 e R_2, considerando o resultado da Figura 21 (potência=2600W). O eixo y corresponde à potência de cada resistência em função do tempo.

Figura 22 – R_1 e R_2 trabalhando alternadamente

3.2.2 Algoritmo para: Potência Selecionada > 2/3

Para este caso, como R_1 tem potência máxima de 2/3 da potência total, esta deve ficar ativada, o que garante que a potência mínima do sistema será de 2/3 da potência total. Já para R_2, é aplicado o algoritmo de Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seção 3.1), a fim de fornecer a potência restante, conforme eq.(13):

$$T_{ON}(R_2) = \left(Pot.Sel. - \left(Pot.Total\left(\frac{2}{3}\right)\right)\right) \tag{13}$$

onde $T_{ON}(R_2)$ representa a quantidade de ciclos em que o TRIAC deverá permanecer ativado para R_2. Já *Pot.Sel.* representa a potência selecionada, neste caso um valor maior que 2/3 da potência total.

3.2.4 Potência na Carga

Para o cálculo da potência na carga pode-se utilizar a eq.(3). Porém, como neste caso utilizam-se dois elementos de aquecimento (R_1 e R_2), executa-se o cálculo separadamente para cada elemento, sendo a potência final o resultado da soma das potências de R_1 e R_2, conforme eq.(14).

$$P_o = P_o(R_1) + P_o(R_2) \tag{14}$$

Utilizando como exemplo prático o mesmo chuveiro empregado anteriormente, com tensão 220V e potência máxima de 6000W, a potência máxima para R_1 será de 4000W e para R_2 será de 2000W. Se for selecionada uma potência de 2600W, uma parte do período T será dissipada por R_1 e outra parte por R_2, alternadamente, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Potências de R_1 e R_2 para potência total de 2600W

	Pot. Máxima (W)	**Período T (ciclos)**	**Ciclos ON**	**Pot. Final (W)**
R_1	4000	40	12	1200
R_2	2000	40	28	1400
			Total:	2600

Fonte: Iserhardt (2014)

Nota-se que na Tabela 11 o período T é igual para as duas resistências (T=40), visto que este é um dos pré-requisitos do algoritmo para os casos em que a potência selecionada é maior que 1/3 e menor que 2/3 da potência total.

Selecionando-se uma potência de 5000W, R_1 estará em estado de condução (R_1=4000W) e R_2 utilizará o algoritmo utilizado na técnica de Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seção 3.1) para fornecer a potência restante (R_2=1000W), conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Potências de R_1 e R_2 para potência total de 5000W

	Pot. Máxima (W)	**Período T (ciclos)**	**Ciclos ON**	**Pot. Final (W)**
R_1	4000	40	40	4000
R_2	2000	2	1	1000
			Total:	5000

Fonte: Iserhardt (2014)

A seção 4.2.1 (Análise de ΔV/V através de Equacionamento Matemático) mostra o quanto pode-se reduzir a variação de tensão na rede através do uso de dois elementos aquecedores.

3.3 CICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL - OTIMIZAÇÃO PARA TRÊS RESISTÊNCIAS

Esta técnica propõe a utilização de três elementos aquecedores (resistências), R_1, R_2 e R_3, onde a potência máxima para R_1 deverá ser o dobro da potência máxima para R_2, que por sua vez deverá ser o dobro da potência máxima para R_3. Ou seja, $P_{R1}=2P_{R2}$ e $P_{R2}=2P_{R3}$. Por consequência, $P_{R1}=4P_{R3}$.

Figura 23 - Circuito proposto para três resistências

Neste caso, a fim de evitar quedas bruscas de potência, que viriam a intensificar o *flicker* na rede, estabelecem-se algumas regras para o trabalho alternado entre as três resistências. Partindo do pressuposto que $P_{R1}=2P_{R2}$, $P_{R2}=2P_{R3}$ e $P_{R1}=4P_{R3}$, deve-se dividir a potência máxima total do sistema ($P_{R1}+P_{R2}+P_{R3}$) em sete partes, onde $P_{R1}=4/7$, $P_{R2}=2/7$ e $P_{R3}=1/7$ da potência total do sistema.

A Tabela 13 apresenta possíveis valores para aplicação da técnica considerando um chuveiro eletrônico com potência máxima de 3500W, obedecendo aos pré-requisitos estabelecidos. Estes valores serão utilizados como parâmetro para apresentação de exemplos no decorrer desta seção.

Tabela 13 - Valores correspondentes a um chuveiro de 3500W com três resistências

Grandeza	Valor
Período T	20 ciclos
Potência máxima em R_1	2000W
Potência máxima em R_2	1000W
Potência máxima em R_3	500W
Potência por ciclo ON em R_1	100W/ciclo
Potência por ciclo ON em R_2	50W/ciclo
Potência por ciclo ON em R_3	25W/ciclo
Potência máxima total do sistema	3500W

Fonte: Iserhardt (2014)

Assim como na eq.(14), a potência total do sistema com três elementos aquecedores é obtida através do somatório das potências individuais de R_1, R_2 e R_3, conforme eq.(15).

$$P_o = P_o(R_1) + P_o(R_2) + P_o(R_3) \tag{15}$$

A Tabela 14 apresenta um resumo do comportamento da aplicação para cada nível de potência selecionado.

Tabela 14 - Comportamento da otimização para três resistências
X - resistência não utilizada; T - resistência com uso total (potência máxima); A - algoritmo Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seção 3.1); A_2 - algoritmo Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável – Otimização para duas Resistências (seção 3.2).

Pot. Selecionada	R_1	R_2	R_3	Períodos T_{ON}
$Pot.Sel. = 0$	X	X	X	
$Pot.Sel. < \frac{1}{7}$	X	X	A	
$Pot.Sel. = \frac{1}{7}$	X	X	T	
$\frac{1}{7} < Pot.Sel. < \frac{2}{7}$	X	A_2		$T_{ON}(R2) = \left(Pot.Sel. - Pot.Total\left(\frac{1}{7}\right)\right)4$ $T_{ON}(R3) = T - T_{ON}(R2)$
$Pot.Sel. = \frac{2}{7}$	X	T	X	
$\frac{2}{7} < Pot.Sel. < \frac{3}{7}$	X	T	A	
$Pot.Sel. = \frac{3}{7}$	X	T	T	

$\frac{3}{7} < Pot.Sel. < \frac{4}{7}$	A_2		X	$T_{ON}(R1) = \left(Pot.Sel. - \left(Pot.Total\left(\frac{2}{7}\right)\right)\right)2$ $T_{ON}(R2) = T - T_{ON}(R1)$
$Pot.Sel. = \frac{4}{7}$	T	X	X	
$\frac{4}{7} < Pot.Sel. < \frac{5}{7}$	T	X	A	
$Pot.Sel. = \frac{5}{7}$	T	X	T	
$\frac{5}{7} < Pot.Sel. < \frac{6}{7}$	T	A_2		$T_{ON}(R2) = \left(Pot.Sel. - \left(Pot.Total\left(\frac{4}{7}\right)\right) - \left(Pot.Total\left(\frac{1}{7}\right)\right)\right)4$ $T_{ON}(R3) = T - T_{ON}(R2)$
$Pot.Sel. = \frac{6}{7}$	T	T	X	
$\frac{6}{7} < Pot.Sel. < 1$	T	T	A	
$Pot.Sel. = 1$	T	T	T	

Fonte: Iserhardt (2014)

Abaixo são apresentadas detalhadamente as principais regras do algoritmo, com exemplos práticos baseados nos valores constantes na Tabela 13.

3.3.1 Algoritmo para: 1/7 < Potência Selecionada < 2/7

Para os casos em que a potência selecionada for maior que 1/7 e menor que 2/7 da potência total do sistema, deve-se manter R_1 desativado e utilizar a técnica Ciclos Inteiros - Otimização para Duas Resistências (seção 3.2) para realizar a alternância entre R_2 e R_3. Nessa hora, durante todo o período T, alternadamente, ou R_2 ou R_3 estará em estado de condução, evitando quedas bruscas de potência.

A quantidade de ciclos de T_{ON} para R_2 e R_3 é definida através das equações abaixo:

$$T_{ON}(R_2) = \left(Pot.Sel. - Pot.Total\left(\frac{1}{7}\right)\right)4 \tag{16}$$

$$T_{ON}(R_3) = T - T_{ON}(R_2) \tag{17}$$

3.3.1.1 Exemplo Prático

Utilizando como referência os valores da Tabela 13, tendo como dado de entrada *Pot.Sel.*=800W (valor entre 1/7 e 2/7 da potência total do sistema), obtém-se o resultado a partir do seguinte cálculo.

Utilizando a eq.(16), têm-se $T_{ON}(R_2)$=12. Utilizando a eq.(17), têm-se $T_{ON}(R_3)$=8. Sabe-se que cada ciclo ON de R_2 equivale a 50W de potência por ciclo, enquanto cada ciclo ON de R_3 equivale 25W de potência. Logo, a potência total do sistema será: 12 x 50 + 8 x 25 = 800W.

As comutações de R_2 e R_3 devem ocorrer conforme a técnica Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável - Otimização para Duas Resistências (seção 3.2).

3.3.2 Algoritmo para: 3/7 < Potência Selecionada < 4/7

Para os casos em que a potência selecionada for maior que 3/7 e menor que 4/7 da potência total do sistema, deve-se manter R_3 desativado e utilizar a técnica Ciclos Inteiros Com período T Dimensionável - Otimização para Duas Resistências (seção 3.2) para realizar a alternância entre R_1 e R_2. Aqui, durante todo o período T, alternadamente, ou R_1 ou R_2 estará em estado de condução, evitando quedas bruscas de potência.

A quantidade de ciclos de T_{ON} para R_1 e R_2 é definida através das equações abaixo:

$$T_{ON}(R_1) = \left(Pot.Sel. - \left(Pot.Total\left(\frac{2}{7}\right)\right)\right)2 \tag{18}$$

$$T_{ON}(R_2) = T - T_{ON}(R_1) \tag{19}$$

3.3.2.1 Exemplo Prático

Utilizando como referência os valores da Tabela 13, tendo como dado de entrada *Pot.Sel.*=1700W (valor entre 3/7 e 4/7 da potência total do sistema), obtém-se o resultado conforme descrito a seguir.

Utilizando a eq.(18), têm-se $T_{ON}(R_1)$=14. Utilizando a eq.(19), têm-se $T_{ON}(R_2)$=6. Sabe-se que cada ciclo ON de R_1 equivale a 100W de potência, enquanto cada ciclo ON de R_2 equivale a 50W de potência. Logo a potência total do sistema será: 14 x 100 + 6 x 50 = 1700W.

As comutações de R_1 e R_2 devem ocorrer conforme a técnica Ciclos Inteiros - Otimização para Duas Resistências (seção 3.2).

3.3.3 Algoritmo para: 5/7 < Potência Selecionada < 6/7

Para os casos em que a potência selecionada for maior que 5/7 e menor que 6/7 da potência total, deve-se manter R_1 ativado constantemente, de forma a garantir que a potência máxima de R_1 (4/7 da potência total do sistema) já se faça presente. A partir daí, deve-se utilizar a técnica Ciclos Inteiros - Otimização para Duas Resistências (seção 3.2) para realizar a alternância entre R_2 e R_3. Nessa caso, durante todo o período T, alternadamente, ou R_2 ou R_3 estará em estado de condução, evitando quedas bruscas de potência.

A quantidade de ciclos de T_{ON} para R_2 e R_3 é definida através das equações abaixo:

$$T_{ON}(R_2) = \left(Pot.Sel. - \left(Pot.Total\left(\frac{4}{7}\right)\right) - \left(Pot.Total\left(\frac{1}{7}\right)\right)\right)4 \qquad (20)$$

$$T_{ON}(R_3) = T - T_{ON}(R_2) \qquad (21)$$

3.3.3.1 Exemplo Prático

Utilizando como referência os valores da Tabela 13, tendo como dado de entrada *Pot.Sel.*=2900W (valor entre 5/7 e 6/7 da potência total do sistema), obtém-se o resultado a partir do seguinte cálculo.

Utilizando a eq.(20), têm-se $T_{ON}(R_2)$=16. Utilizando a eq.(21), têm-se $T_{ON}(R_3)$=4. Como R_1 está constantemente ativado, $T_{ON}(R_1)$=20. Sabe-se que cada ciclo ON de R_1 equivale a 100W de potência, cada ciclo ON de R_2 equivale a 50W de potência e cada ciclo ON de R_3 equivale a 25W de potência. Logo, a potência total do sistema será: 20 x 100 + 16 x 50 + 4 x 25 = 2900W.

As comutações de R_1 e R_2 devem ocorrer conforme a técnica Ciclos Inteiros - Otimização para Duas Resistências (seção 3.2).

A seção 4.2.1 (Análise de ΔV/V através de Equacionamento Matemático) mostra o quanto pode-se reduzir a variação de tensão na rede através do uso de três elementos aquecedores.

3.4 SEMICICLOS INTEIROS COM PERÍODO T DIMENSIONÁVEL

Esta técnica foi inspirada no controle por Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seção 3.1), porém com a redução da distribuição dos períodos para o nível de semiciclo. Dessa forma, teoricamente, é possível aumentar a frequência de comutações e, por consequência, alcançar uma quantidade maior de níveis de potência sem a existência de *flicker*.

Seu funcionamento é o seguinte: para cada nível de potência é estabelecido um período T. Uma parcela dos semiciclos de T corresponderá ao T_{ON} que, por sua vez, deverá ser distribuído ao longo do período T.

A Figura 24 apresenta o fluxograma proposto que, em muitos pontos, lembra o fluxograma da técnica de Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável. A diferença significativa é a existência da variável lógica *Vlog*, que serve para buscar um nível CC sempre nulo. Ou seja, os semiciclos de T_{ON} são executados alternadamente, de forma a priorizar que um semiciclo positivo seja sempre seguido por um semiciclo negativo, mesmo que entre eles haja um intervalo de não condução de corrente.

Ainda assim, nesta técnica nem sempre é possível garantir um nível nulo de CC, visto que o objetivo principal deste método é o aumento da frequência. Em alguns casos a busca por um nível totalmente nulo de CC acarretaria em uma modulação similar ao controle Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, não trazendo ganhos significativos à otimização em nível de semiciclo.

Uma exceção à regra é o caso em que a potência selecionada (*Sel*) corresponde a 30% ou 70% da potência total, situação em que se tem o período T = 10. Para este caso, ainda que a variável *Div* seja ímpar, a não utilização da variável *Vlog* resultou em um sinal mais estável.

Para os casos em que T_{ON} ou T_{OFF} sejam iguais a 1, as variáveis T, T_{ON} e T_{OFF} são multiplicadas por dois. Isso serve para que, mesmo que as comutações ocorram em nível de semiciclo, a contagem final do período T_{ON} seja sempre um valor divisível por ciclos inteiros.

Figura 24 - Fluxograma para Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável

O restante das variáveis segue o mesmo princípio do fluxograma para o controle Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, onde: a definição do período T é feita através do MDC entre a potência máxima (*Max*) e a potência selecionada (*Sel*), a variável *T* serve para definir o menor tamanho possível de período T para a potência selecionada, a variável T_{ON} é a porção de T em que o circuito ficará em estado de condução e a variável T_{OFF} é a porção de T em que o circuito ficará aberto.

As variáveis *Div* e *Resto* correspondem, respectivamente, ao quociente e resto das divisões de T_{OFF} por T_{ON} (para $T_{OFF} > T_{ON}$) ou T_{ON} por T_{OFF} (para $T_{ON} >= T_{OFF}$).

Pode-se dizer que o controle Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável é consideravelmente mais eficaz aos demais propostos neste trabalho no que diz respeito à eliminação do efeito *flicker*. Porém, é o que possui implementação mais complexa e menor estabilidade.

Para aplicação da técnica Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável com dois ou três elementos aquecedores pode-se utilizar como referência as otimizações para duas e três resistências da técnica Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (seções 3.2 e 3.3).

3.5 SEMICICLOS INTEIROS OTIMIZADOS (7 NÍVEIS DE POTÊNCIA)

Conforme seção 2.2.4, em [9] é apresentada a técnica Semiciclos Inteiros Otimizados, que tem como principal característica a eliminação total do efeito *flicker* através da distribuição de semiciclos utilizando um período T de 3 ciclos. A grande desvantagem, neste caso, é o fato de prover apenas 4 níveis de potência quando utilizando um único elemento aquecedor.

Dessa forma, a próxima técnica desenvolvida neste trabalho propõe, para a técnica original de Semiciclos Inteiros Otimizados, aumentar os níveis de potência de 4 para 7. O objetivo é criar níveis intermediários de potência utilizando um período T de 6 ciclos, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 - Semiciclos Inteiros Otimizados com 7 níveis de potência

Como pode ser visto na Figura 25, cada nível intermediário será composto por um período T de 6 ciclos, sendo os primeiros 3 ciclos compostos pela modulação da potência imediatamente anterior e os 3 ciclos seguintes pela modulação da potência imediatamente posterior. Por exemplo: para alcançar a potência de 1,5 deve-se alternar 3 ciclos de potência 1 com outros 3 ciclos de potência 2, de forma sequencial, conforme Figura 26.

Figura 26 - Forma de onda para potência de 1,5
Preto: forma de onda de tensão na resistência; Cinza: forma de onda da rede; Vermelho: acionamento do TRIAC.

No exemplo da Figura 26, a média das potências 1 e 2 gerará, para um período T de 6 ciclos, uma potência final média de 1,5.

Da mesma forma, se utilizado um período T de 9 ciclos pode-se obter até 13 níveis de potência. Isso é possível dividindo o período T em 3 grupos de 3 ciclos cada, onde a potência média final (P_{med}) corresponde à soma das potências registradas individualmente em cada grupo, dividida pelo número de grupos, conforme eq.(22):

$$P_{med} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_i}{n} \tag{22}$$

onde, P_i representa a potência individual por grupo e n representa a quantidade de grupos.

Quanto mais grupos forem utilizados, maior será a quantidade de níveis de potência disponíveis. A Figura 27 mostra a forma de onda para atingir uma potência de 1,66 utilizando 3 grupos (9 ciclos).

Figura 27 - Forma de onda para potência de 1,66
Preto: forma de onda de tensão na resistência; Cinza: forma de onda da rede; Vermelho: acionamento do TRIAC.

Como pode ser visto, na Figura 27 a média das potências 1, 2 e 2 gerará, para um período T de 9 ciclos, uma potência final de 1,66.

Até um nível T de 6 ciclos é possível conseguir uma boa variedade de potências sem existência de *flicker*. Acima disso, os níveis começam a ficar muito próximos uns dos outros, tornando menos vantajosa a aplicação desta técnica.

4 ANÁLISE DE FLICKER PARA AS TÉCNICAS PROPOSTAS

Os gráficos apresentados nas Figuras 2 e 3 podem ser utilizados como parâmetro para estimar o *flicker* na maior parte das implementações. Porém, para as técnicas propostas neste trabalho, não são suficientes. Isso ocorre porque os gráficos em questão foram desenvolvidos com base em uma situação síncrona de flutuação de tensão. Portanto, não levam em consideração uma das grandes virtudes das técnicas Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, que é garantir que os menores intervalos existentes entre os períodos de T_{ON} e T_{OFF} não sejam maiores que um ciclo ou semiciclo, dependendo do caso.

Dessa forma, para estes casos, adicionalmente à utilização das curvas Cenelec, IEC 61000-3-3 e medidor UIE, houve a necessidade de utilizar outros dois métodos de análise quantitativa: por variação de luminosidade e percepção humana.

A análise completa está dividida em três partes:

- Análise pelas Curvas Cenelec, IEC 61000-3-3 e Medidor UIE, que aborda a análise de *flicker* para todas as técnicas propostas com base em métodos constantes nas principais bibliografias sobre o assunto. Esta análise caracteriza-se por ser totalmente teórica;

- Análise por Variação de Luminosidade, onde, utilizando um protótipo desenvolvido em laboratório chamado Simulador de Flutuação de Tensão, são geradas curvas de variação de luminosidade, caracterizando uma análise prática;

- Análise Quantitativa por Percepção Humana, que apresenta um teste utilizando seis voluntários que, ao ficarem expostos a vários níveis de variações de luminosidade, deverão classificá-los como: imperceptível, pouco perceptível, perceptível ou muito perceptível.

Os resultados obtidos, para cada uma das três técnicas propostas neste trabalho, em cada uma das etapas, foram comparados com resultados obtidos utilizando a técnica tradicional de controle por Ciclos Inteiros, a fim de melhor avaliar o sucesso de cada implementação.

4.1 ANÁLISE - CURVAS CENELEC, IEC 61000-3-3 E MEDIDOR UIE

Esta seção aborda os resultados obtidos por cada uma das técnicas utilizando como referência as curvas Cenelec, IEC 61000-3-3 e medidor UIE.

Inicialmente, foram desconsiderados os percentuais de variação de tensão (ΔV/V%). Dessa forma, fica estabelecido que, para cada uma das referências, as potências com valores de comutações por minuto dentro dos intervalos constantes na Tabela 15 geram o efeito *flicker*.

Tabela 15 - Limites para geração de flicker

Referência	**Comutações por minuto**	
	Mínimo	**Máximo**
Curva Cenelec	0,7	1800
IEC 61000-3-3	0,1	2800
Medidor UIE	50	2100

Fonte: J. Schlabbach, D. Blume, e T. Stephanblome (2000), IEC (2008), Z. Hanzelka e A. Bien (1996)

As Tabelas 16 a 19 mostram, para cada uma das técnicas, o número de comutações por minuto para cada nível de potência (0 a 10), utilizando como referência as curvas Cenelec, IEC 61000-3-3 e o medidor UIE, onde S (sim) significa que há geração de *flicker* e N (não) significa que não há geração de *flicker*.

Tabela 16 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Nível de Potência	**% da Potência Total**	**Comutações por Minuto**	**Geração de flicker? (S/N)**		
			Cenelec	**IEC 61000-3-3**	**UIE**
0	0,00	0	N	N	N
1	10,00	720	S	S	S
2	20,00	1440	S	S	S
3	30,00	2160	N	S	N
4	40,00	2880	N	N	N
5	50,00	3600	N	N	N
6	60,00	2880	N	N	N
7	70,00	2160	N	S	N
8	80,00	1440	S	S	S
9	90,00	720	S	S	S
10	100,00	0	N	N	N
		Total N:	**7**	**5**	**7**

Fonte: Iserhardt (2014)

Como pode ser visto na Tabela 16, utilizando como referência a curva Cenelec e medidor UIE, 7 dos 11 níveis de potência não geram o efeito *flicker*. Já utilizando como referência a curva IEC 61000-3-3, apenas 5 dos 11 níveis de potência não geram este efeito indesejável.

Tabela 17 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Nível de Potência	**% da Potência Total**	**Comutações por Minuto**	**Geração de flicker? (S/N)**		
			Cenelec	**IEC 61000-3-3**	**UIE**
0	0,00	0	N	N	N
1	10,00	1440	S	S	S
2	20,00	2880	N	N	N
3	30,00	4320	N	N	N
4	40,00	2880	N	N	N
5	50,00	3600	N	N	N
6	60,00	2880	N	N	N
7	70,00	4320	N	N	N
8	80,00	2880	N	N	N
9	90,00	1440	S	S	S
10	100,00	0	N	N	N
		Total N:	**9**	**9**	**9**

Fonte: Iserhardt (2014)

Como pode ser visto na Tabela 17, para a técnica de Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável o resultado foi o mesmo para todas as curvas, notando-se uma evolução em relação à técnica Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável.

A Tabela 18 mostra que a técnica de Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência) eliminou o efeito *flicker* em 5 dos 7 níveis de potência utilizando como referência a curva Cenelec e medidor UIE. Ou seja, a nova técnica proposta conseguiu um resultado 25% melhor que a técnica tradicional de Semiciclos Inteiros Otimizados, visto que, utilizando apenas um elemento aquecedor, aumentou de 4 para 5 a quantidade de níveis de potência sem a existência de *flicker*.

Já a curva IEC 61000-3-3 apresentou resultados inconsistentes em relação ao trabalho original [9], que afirma a inexistência de *flicker* a partir de 2400 comutações por minuto.

Tabela 18 - Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência)

Nível de Potência	% da Potência Total	Comutações por Minuto	Geração de flicker? (S/N)		
			Cenelec	IEC 61000-3-3	UIE
0	0,00	0	N	N	N
1	16,66	1200	S	S	S
2	33,33	2400	N	S	N
3	49,99	2400	N	S	N
4	66,32	2400	N	S	N
5	82,64	1200	S	S	S
6	100,00	0	N	N	N
		Total N:	**5**	**2**	**5**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 19 - Ciclos Inteiros (Tradicional)

Potência	% da Potência Total	Comutações por Minuto	Geração de flicker? (S/N)		
			Cenelec	IEC 61000-3-3	UIE
0	0,00	0	N	N	N
1	10,00	720	S	S	S
2	20,00	720	S	S	S
3	30,00	720	S	S	S
4	40,00	720	S	S	S
5	50,00	720	S	S	S
6	60,00	720	S	S	S
7	70,00	720	S	S	S
8	80,00	720	S	S	S
9	90,00	720	S	S	S
10	100,00	0	N	N	N
		Total N:	**2**	**2**	**2**

Fonte: Iserhardt (2014)

Conforme a Tabela 19, a técnica tradicional de Controle por Ciclos Inteiros não apresenta *flicker* apenas em 2 dos 11 níveis de potência testados para as curvas Cenelec, IEC 61000-3-3 e medidor UIE. São eles: potência máxima e potência mínima.

4.1.2 Resultados

Como visto nos testes com 11 níveis de potência (T=10), em qualquer das técnicas propostas nem sempre se consegue a eliminação total do efeito *flicker*, mas os resultados foram consideravelmente melhores quando comparados ao método tradicional de Controle por Ciclos Inteiros.

Abaixo são apresentados os gráficos comparativos para que os ganhos obtidos pelas técnicas propostas possam ficar mais claros em relação ao método original de Controle por Ciclos Inteiros, novamente utilizando como referência as curvas Cenelec, IEC 61000-3-3 e medidor UIE.

A Figura 28 apresenta os resultados para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, onde o eixo Y representa a quantidade de níveis de potência sem geração de *flicker*, considerando um total de 11 níveis (0 a 10).

Figura 28 - Resultados: Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Nota-se que a técnica tradicional de Ciclos Inteiros, independente da curva utilizada como parâmetro (Cenelec, IEC ou UIE), elimina o *flicker* apenas em 2 dos 11 níveis. Já a técnica proposta elimina o *flicker* em 7 níveis, conforme curva Cenelec e medidor UIE, e 5 níveis conforme norma IEC 61000-3-3.

A Figura 29 apresenta os resultados para Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, onde o eixo Y representa a quantidade de níveis de potência sem geração de *flicker*, considerando um total de 11 níveis (0 a 10).

Figura 29 - Resultados: Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Na Figura 29 nota-se que a técnica Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável alcançou um ganho expressivo, aumentando de 2 para 9 os níveis de potência sem geração de *flicker* em relação à técnica tradicional.

A Figura 30 apresenta os resultados para Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência), onde o eixo Y representa a quantidade de níveis de potência sem geração de *flicker*, considerando um total de 7 níveis (0 a 6).

Figura 30 - Resultados: Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis)

Nos resultados da Figura 30, a técnica proposta aumentou de 2 para 5 os níveis de potência sem geração de *flicker*, conforme a curva Cenelec e medidor UIE. Já utilizando como referência a curva IEC 61000-3-3, não houve ganho decorrente de sua utilização.

Destaca-se que o controle Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência) é baseado no método publicado por [9]. No trabalho original o autor considerou como referência o medidor UIE, onde alcançou 4 níveis de potência sem geração de *flicker*. Se for utilizado como referência o trabalho original, a técnica proposta aumentou de 4 para 5 os níveis de potência sem geração de *flicker*.

4.2 ANÁLISE POR VARIAÇÃO DE LUMINOSIDADE

Como pode ser visto na seção anterior, boa parte dos níveis de potência utilizados com as diferentes técnicas propostas neste trabalho não apresentaram *flicker*, reforçando que esta análise foi feita desconsiderando ΔV/V% (percentual de variação de tensão).

Nesta seção o ΔV/V% é considerado. O objetivo é gerar gráficos de variação de luminosidade em função do tempo, a fim de demonstrar a curva característica de iluminação para cada nível de potência, bem como medir a estabilidade destes.

Para isso, inicialmente são apresentadas informações referentes ao ΔV/V e, posteriormente, é apresentado o Simulador de Flutuação de Tensão, um protótipo desenvolvido em laboratório especialmente para este teste. Por fim, são analisados os resultados obtidos utilizando como referência o Critério de Nyquist.

O controle Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência) não é avaliado devido ao fato de o autor da técnica original [9] não ter publicado o fluxograma para sua aplicação.

4.2.1 Análise de ΔV/V através de Equacionamento Matemático

Através de equacionamento matemático (e posterior validação por simulação), foi possível extrair o ΔV/V% para cada uma das técnicas propostas. Para isso, foram considerados fatores como: resistência natural do meio condutor e as várias possibilidades de alternância entre as resistências (R_1, R_2 e R_3), conforme estabelecido nas especificações de cada uma das técnicas propostas.

De acordo com [18], o valor da seção nominal dos meios condutores depende do uso ao qual estão atrelados. Para instalações elétricas de iluminação a seção nominal deve ser de, pelo menos, 1,5mm^2. Já para instalação de chuveiros elétricos, este valor deve ser de 4,0 mm^2 ou 6,0 mm^2, dependendo da potência do equipamento.

A Tabela 20 apresenta a resistência elétrica máxima de condutores de cobre para diversas distâncias, considerando uma temperatura média de 20 ºC.

Tabela 20 - Resistência natural do meio condutor

Seção Nominal (mm^2)	**Resistência/Distância (Ω/m)**			
	1m	**10m**	**50m**	**100m**
1,5	0,01330	0,1330	0,6650	1,330
4,0	0,00495	0,0495	0,2475	0,495
6,0	0,00330	0,0330	0,1650	0,330

Fonte: Nambei (2014)

A grande variação de valores para resistência natural do condutor se torna relevante quando considera-se que o efeito *flicker* pode estar diretamente relacionado ao mau dimensionamento de instalações elétricas.

A Figura 31 apresenta o circuito utilizado para a simulação.

Figura 31 - Circuito de simulação

Como pode ser visto, as resistências R_1, R_2 e R_3 estão conectadas em paralelo com uma lâmpada de 60W (815Ω), mesmo modelo utilizado para o desenvolvimento das curvas Cenelec e IEC 61000-3-3. Em todos os casos foi considerado um chuveiro eletrônico de 6800W de potência, resultando nos valores equivalentes de resistência contidos na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores de resistências para simulação

Modelo	**R_1**	**R_2**	**R_3**
Resistência única	7,12 Ω	-	-
Duas resistências	21,36 Ω	10,68 Ω	-
Três resistências	49,84 Ω	24,92 Ω	12,46 Ω

Fonte: Iserhardt (2014)

A Figura 32 apresenta o gráfico com ΔV/V% resultante na lâmpada (eixo y) para valores de resistência natural do condutor que vão de 0Ω a 1Ω (eixo x), referente às técnicas que utilizam apenas um elemento aquecedor, como Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável.

Figura 32 - Variação de tensão para resistência única

A Figura 33 apresenta o gráfico com ΔV/V% resultante na lâmpada (eixo y) para valores de resistência natural do condutor que vão de 0Ω a 1Ω (eixo x), referente às técnicas que utilizam dois elementos aquecedores, como Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável - Otimização para Duas Resistências.

Figura 33 - Variação de tensão para duas resistências

A Figura 34 apresenta o gráfico com ΔV/V% resultante na lâmpada (eixo y) para valores de resistência natural do condutor que vão de 0Ω a 1Ω (eixo x), referente às técnicas que utilizam três elementos aquecedores, como Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável - Otimização para Três Resistências.

Figura 34- Variação de tensão para três resistências

Nota-se que na medida em que se aumenta a quantidade de elementos aquecedores, diminui-se o ΔV/V%, que é um dos principais causadores do efeito *flicker*.

Nas otimizações para duas e três resistências, dependendo de quais delas estão em uso, podem haver pequenas variações de valores de ΔV/V. Por exemplo, o ΔV/V quando utilizando R_1 e R_2 será diferente do ΔV/V quando utilizando R_2 e R_3. Dessa forma, nas Figuras 33 e 34, optou-se por apresentar a média geral entre os valores lidos para cada nível de resistência do condutor.

4.2.2 Simulador de Flutuação de Tensão

Para os testes em laboratório, foi confeccionado um circuito a fim de simular o ΔV/V. Este circuito, que é controlado pela placa de *hardware* Arduino®, é composto, entre outros componentes, por uma lâmpada conectada a uma das extremidades. Esta conexão é feita utilizando dois meios condutores em paralelo, cada um com uma resistência em série. Mais precisamente, um meio condutor com resistência e outro sem. Utilizando TRIACs, estes condutores são energizados de forma alternada, de acordo com a técnica utilizada para a simulação. Dessa forma, é possível simular a queda de tensão proporcional em cada um dos casos. A Figura 35 apresenta o esquemático do circuito para este experimento.

Figura 35 - Circuito para simulação de flutuação de tensão

No circuito da Figura 35, as três conexões do lado esquerdo representam a interatividade com o Arduino®. A conexão *zero-cross* utiliza uma porta digital de entrada do

Arduino®, que por sua vez recebe do circuito um sinal cada vez que a forma de onda de tensão de alimentação passa por zero. Sua função é identificar o início e fim de cada semiciclo.

Já as portas marcadas com *Dimmer* correspondem aos sinais enviados pelo Arduino® ao circuito, a fim de ativar a passagem de corrente e ligar a carga (lâmpada). Quando é ativado o *Dimmer 1*, a lâmpada é alimentada diretamente pela fonte (220V). Já quando é ativado o *Dimmer 2*, a lâmpada passa a ser alimentada pela fonte em série com o *Resistor Variável*, resultando em uma queda de tensão proporcional ao valor deste. Alternando entre *Dimmer 1* e *Dimmer 2* é possível simular uma oscilação de tensão na lâmpada, que é a origem do efeito *flicker*.

Para calcular o resistor a ser utilizado em *Resistor Variável* (R_V), deve-se utilizar a eq.(23):

$$R_V = R_{lamp}\left(\frac{V_{in}}{V_{lamp}} - 1\right) \tag{23}$$

onde R_{lamp} e V_{lamp} representam, respectivamente, resistência e tensão de saída da lâmpada. Já V_{in} representa a tensão de entrada (neste caso 220V). Utilizando a eq.(23) pode-se encontrar valores ideais de resistores para a tensão de saída desejada. Alguns deles estão na Tabela 22.

Tabela 22 - Tabela para resistor variável

Tensão de Saída (V)	**Resistor (Ω)**
215	18,76
210	38,41
205	59,02

Fonte: Iserhardt (2014)

O circuito apresentado na Figura 35 deu origem ao protótipo da Figura 36, chamado de Simulador de Flutuação de Tensão. Uma pequena alteração em relação ao projeto original foi a substituição do optoacoplador 4N25 pelo H11AA1. Este, diferente do primeiro, possui dois diodos em antiparalelo, possibilitando a condução da corrente nos dois sentidos, o que tornou desnecessário o uso de uma ponte retificadora.

Figura 36 - Simulador de Flutuação de Tensão

Os resultados preliminares de ΔV/V, obtidos através de equacionamento matemático e apresentados na seção 4.2.1, aplicados à eq.(23), foram utilizados como base para definir os valores aplicados ao *Resistor Variável* do Simulador de Flutuação de Tensão.

4.2.3 Ambiente de Testes

Com o auxílio de um sensor LDR (*Light Dependent Resistor*), que deve ser posicionado frente à lâmpada, é possível quantificar a variação de luminosidade para cada um dos níveis de potência. Para isso, o LDR deverá ser conectado a um microcontrolador. Neste trabalho optou-se por utilizar a placa Arduino®, uma solução de *hardware* livre baseada na família de microcontroladores Atmega.

O Arduino® ao qual foi conectado o LDR foi configurado para realizar, em cada nível de potência de cada uma das técnicas, 14400 leituras por minuto (superior ao mínimo exigido pelo critério de Nyquist). Assim, se o sinal obtido nas leituras for similar ao sinal obtido em uma iluminação constante (estável), há grande probabilidade de o *flicker* ser pouco perceptível ou até mesmo imperceptível.

Os testes de variação de luminosidade foram realizados em uma sala escura onde, de um lado ficou a estrutura geradora de sinal, que inclui uma lâmpada incandescente de 60W ligada ao Simulador de Flutuação de Tensão conectado ao Arduino (Arduino Leonardo®), e do outro lado foi posicionado o sensor LDR conectado a um outro Arduino (Arduino Uno Rev.3®).

O sensor LDR e a lâmpada ficaram separados por uma distância de aproximadamente 30cm. A lâmpada foi instalada sem o uso de qualquer tipo de luminária, de forma a evitar que este elemento adicional viesse a influenciar no resultado final. Todas as leituras feitas foram salvas em computador para análise posterior.

Figura 37 - Ambiente de testes

Para a realização dos testes, a exemplo do que já vinha sendo utilizado, o Simulador de Flutuação de Tensão foi configurado para utilizar um período T de 10 ciclos, totalizando 11 níveis de potência.

Todos os gráficos gerados nesta seção, bem como as tabelas de variação de luminosidade, representam a iluminância medida em Lux (E), que corresponde à quantidade de lúmens por metro quadrado.

4.2.4 Resultados

O Critério de Nyquist estabelece que para análise numérica de um sinal analógico a taxa de amostragem deve ser de pelo menos duas vezes o valor da maior frequência de interesse. Ou seja, para um sinal de 60Hz deve-se trabalhar com uma taxa mínima de 7200 leituras por minuto.

Para este teste optou-se por utilizar uma taxa de amostragem de 14400 leituras por minuto, visto que este valor está acima do mínimo estabelecido pelo teorema e em

conformidade com o desempenho do *hardware* (Arduino®). Assim como na seção anterior, o objetivo é comparar os sinais obtidos utilizando as técnicas propostas neste trabalho com sinais obtidos utilizando a técnica tradicional de Ciclos Inteiros.

Os primeiros testes foram realizados utilizando, no simulador de flutuação de tensão, um resistor variável de 56Ω, simulando um ΔV/V de aproximadamente 6,8% (220V para 205V). Este valor, apesar de considerado alto para os padrões atuais de oscilação de tensão, proporciona um melhor entendimento quanto aos ganhos reais obtidos com a técnica proposta.

A Figura 38 apresenta o resultado para a medição com o sinal estável (sem variação de tensão).

Figura 38 - Sinal estável

As Figuras 39 a 41 apresentam os resultados obtidos para o nível 3 de potência, onde nota-se que as técnicas propostas (Figuras 39 e 40) apresentaram um sinal com menor variação em comparação com o modelo tradicional de Controle por Ciclos Inteiros (Figura 41).

Figura 39 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (nível 3 de pot.)

Figura 40 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (nível 3 de pot.)

Figura 41 - Ciclos Inteiros (nível 3 de pot.)

Resultados similares também foram encontrados em testes com outros níveis de potência, como, por exemplo, para o nível 5 (50%), conforme mostram as Figuras 42 e 43.

Figura 42 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (nível 5 de pot.)

Figura 43 - Ciclos Inteiros (nível 5 de pot.)

Para 50% da potência, o comportamento da modulação é igual para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável. Dessa forma, o resultado da Figura 42 pode ser associado às duas técnicas propostas neste trabalho.

As Tabelas 23 e 24 apresentam o resumo das medições para o controle Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, considerando ΔV/V de 6,8%.

Tabela 23 - Medições 1 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5)

ΔV/V = 6,8% (de 220V para 205V)					
	Pot. 1	**Pot. 2**	**Pot. 3**	**Pot. 4**	**Pot. 5**
Máximo (Lux)	938,74	933,35	931,15	930,05	920,37
Mínimo (Lux)	909,7	905,41	902,11	902,11	895,62
Variação (Lux)	**29,04**	**27,94**	**29,04**	**27,94**	**24,75**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 24 - Medições 1 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9)

ΔV/V = 6,8% (de 220V para 205V)					
	Pot. 6	**Pot. 7**	**Pot. 8**	**Pot. 9**	**Sinal estável**
Máximo (Lux)	920,37	920,37	926,86	921,47	907,5
Mínimo (Lux)	891,44	891,33	894,63	894,63	889,24
Variação (Lux)	**28,93**	**29,04**	**32,23**	**26,84**	**18,26**

Fonte: Iserhardt (2014)

Nota-se que a variação de luminosidade, na maior parte dos níveis de potência testados, ficou bem próxima do resultado obtido para o sinal estável, o que transmite a ideia de que mesmo na ocorrência de *flicker*, este tende a ser pouco perceptível.

As tabelas 25 e 26 apresentam o resumo das medições para o controle Semiclos Inteiros com Período T Dimensionável, considerando ΔV/V de 6,8%.

Tabela 25 - Medições 1 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5)

ΔV/V = 6,8% (de 220V para 205V)					
	Pot. 1	**Pot. 2**	**Pot. 3**	**Pot. 4**	**Pot. 5**
Máximo (Lux)	926,86	926,86	930,05	926,86	920,37
Mínimo (Lux)	891,44	903,21	906,4	901,01	895,62
Variação (Lux)	**35,42**	**23,65**	**23,65**	**25,85**	**24,75**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 26 - Medições 1 – Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9)

ΔV/V = 6,8% (de 220V para 205V)					
	Pot. 6	**Pot. 7**	**Pot. 8**	**Pot. 9**	**Sinal estável**
Máximo (Lux)	917,18	911,79	913,88	913,99	907,5
Mínimo (Lux)	891,44	886,05	892,43	891,44	889,24
Variação (Lux)	**25,74**	**25,74**	**21,45**	**22,55**	**18,26**

Fonte: Iserhardt (2014)

Nota-se que o controle Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável apresentou resultados de variação de luminosidade ainda melhores em comparação com a técnica Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável.

As tabelas 27 e 28 apresentam o resumo das medições para o controle tradicional de Ciclos Inteiros, considerando ΔV/V de 6,8%.

Tabela 27 - Medições 1 – Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 1 a 5)

ΔV/V = 6,8% (de 220V para 205V)					
	Pot. 1	**Pot. 2**	**Pot. 3**	**Pot. 4**	**Pot. 5**
Máximo (Lux)	921,47	922,57	921,47	920,37	921,47
Mínimo (Lux)	891,44	884,95	880,66	879,56	877,36
Variação (Lux)	**30,03**	**37,62**	**40,81**	**40,81**	**44,11**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 28 - Medições 1 - Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 6 a 9)

ΔV/V = 6,8% (de 220V para 205V)					
	Pot. 6	**Pot. 7**	**Pot. 8**	**Pot. 9**	**Sinal estável**
Máximo (Lux)	935,44	933,35	932,25	932,25	907,5
Mínimo (Lux)	895,73	892,43	896,72	904,31	889,24
Variação (Lux)	**39,71**	**40,92**	**35,53**	**27,94**	**18,26**

Fonte: Iserhardt (2014)

Nota-se que a variação de intensidade da iluminação é consideravelmente maior no método tradicional de Controle por Ciclos Inteiros, sendo, inclusive, o que esteve mais distante dos valores obtidos na medição do sinal estável.

As Tabelas 29 a 34 apresentam os resultados obtidos em um segundo teste realizado, desta vez considerando ΔV/V de 4,5% (de 220V para 210V). Para isso, no simulador de flutuação de tensão foi conectado um resistor de 37Ω.

Tabela 29 - Medições 2 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5)

ΔV/V = 4,5% (de 220V para 210V)					
	Pot. 1	**Pot. 2**	**Pot. 3**	**Pot. 4**	**Pot. 5**
Máximo (Lux)	882,75	886,05	883,85	882,75	878,46
Mínimo (Lux)	853,71	858,11	855,91	855,91	853,71
Variação (Lux)	**29,04**	**27,94**	**27,94**	**26,84**	**24,75**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 30 - Medições 2 - Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9)

ΔV/V = 4,5% (de 220V para 210V)					
	Pot. 6	**Pot. 7**	**Pot. 8**	**Pot. 9**	**Sinal estável**
Máximo (Lux)	880,66	878,46	872,08	877,36	907,5
Mínimo (Lux)	852,72	850,52	844,14	849,42	889,24
Variação (Lux)	**27,94**	**27,94**	**27,94**	**27,94**	**18,26**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 31 - Medições 2 - Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 1 a 5)

ΔV/V = 4,5% (de 220V para 210V)					
	Pot. 1	**Pot. 2**	**Pot. 3**	**Pot. 4**	**Pot. 5**
Máximo (Lux)	886,05	887,15	884,95	883,85	878,46
Mínimo (Lux)	862,4	858,11	859,1	857,01	853,71
Variação (Lux)	**23,65**	**29,04**	**25,85**	**26,84**	**24,75**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 32 - Medições 2 – Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável (pot. 6 a 9)

ΔV/V = 4,5% (de 220V para 210V)					
	Pot. 6	**Pot. 7**	**Pot. 8**	**Pot. 9**	**Sinal estável**
Máximo (Lux)	878,46	877,47	877,47	875,27	907,5
Mínimo (Lux)	852,72	852,72	852,72	850,52	889,24
Variação (Lux)	**25,74**	**24,75**	**24,75**	**24,75**	**18,26**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 33 - Medições 2 – Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 1 a 5)

ΔV/V = 4,5% (de 220V para 210V)					
	Pot. 1	**Pot. 2**	**Pot. 3**	**Pot. 4**	**Pot. 5**
Máximo (Lux)	882,75	888,14	889,24	888,14	887,15
Mínimo (Lux)	853,71	854,81	853,71	850,52	850,52
Variação (Lux)	**29,04**	**33,33**	**35,53**	**37,62**	**36,63**

Fonte: Iserhardt (2014)

Tabela 34 - Medições 2 - Ciclos Inteiros – tradicional (pot. 6 a 9)

ΔV/V = 4,5% (de 220V para 210V)					
	Pot. 6	**Pot. 7**	**Pot. 8**	**Pot. 9**	**Sinal estável**
Máximo (Lux)	886,05	884,95	880,66	877,47	907,5
Mínimo (Lux)	848,43	849,42	847,33	849,42	889,24
Variação (Lux)	**37,62**	**35,53**	**33,33**	**28,05**	**18,26**

Fonte: Iserhardt (2014)

A exemplo dos resultados obtidos para ΔV/V de 6,8%, para ΔV/V de 4,5% a variação de luminosidade nas técnicas propostas foi consideravelmente menor em comparação com o modelo tradicional de Controle por Ciclos Inteiros.

4.3 ANÁLISE QUANTITATIVA POR PERCEPÇÃO HUMANA

A seção anterior mostrou que em alguns casos os resultados de variação de luminosidade para um nível de potência que não gera *flicker* ficaram muito próximos dos resultados obtidos para um nível que gera este efeito indesejável, considerando como parâmetro a curva IEC 61000-3-3 e Critério de Nyquist. Dessa forma, a Análise Quantitativa por Percepção Humana objetiva analisar a eficiência das técnicas propostas na atenuação do efeito *flicker*, mesmo nos casos onde não foi possível eliminá-lo totalmente, bem como validar os resultados obtidos através da norma IEC 61000-3-3, considerando que este se mostrou o mais rigoroso entre os métodos teóricos utilizados no trabalho.

Este teste tem como característica a participação de seis voluntários que deverão ficar expostos à iluminação de uma lâmpada com oscilação de luminosidade onde, para cada nível de potência selecionado para o teste, os voluntários deverão classificá-lo como imperceptível, pouco perceptível, perceptível ou muito perceptível. Este método de classificação é similar ao encontrado em [2] que, segundo o autor, serviu de base para o desenvolvimento da curva Cenelec.

4.3.1 Resultados

Para esta atividade foram descartados testes com os níveis 0 e 10 de potência, visto que para estes casos o sistema atua com potência constante, não gerando oscilação de tensão. O Resistor Variável utilizado foi de 37Ω, simulando um ΔV/V de aproximadamente 4,5% (220V para 210V). A Tabela 35 mostra o perfil dos voluntários participantes.

Tabela 35 - Perfil dos voluntários

Voluntário	Idade	Sexo
1	59 anos	Feminino
2	62 anos	Masculino
3	28 anos	Masculino
4	25 anos	Masculino
5	33 anos	Masculino
6	37 anos	Masculino

Fonte: Iserhardt (2014)

A Tabela 36 apresenta os resultados obtidos para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável, onde nota-se um bom resultado para o nível 2 de potência, classificado pela maior parte dos voluntários como Pouco Perceptível. Os níveis de potência 4 e 6, por sua vez, apresentaram resultados inconsistentes com a norma IEC 61000-3-3, que afirma que modulações de potência acima de 2800 comutações por minuto não geram *flicker*. Segundo os voluntários, ambos os níveis de potência, apesar de executarem 2880 comutações por minuto, apresentaram este efeito indesejável.

Tabela 36 - Análise para Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Nível de Potência (0 a 10)	**Nível de Percepção de Flicker**			
	Muito perceptível	**Perceptível**	**Pouco perceptível**	**Imperceptível**
1		4	2	
2	2	4		
3		4	2	
4		2	4	
5				6
6		2	4	
7		3	3	
8	1	5		
9		4	2	

Fonte: Iserhardt (2014)

A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos para Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável. Nota-se que todos os voluntários classificaram os níveis 1 e 9 de potência como Pouco Perceptível. Um resultado relevante, considerando que estes são os únicos níveis que geram *flicker* em Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, de acordo com a norma IEC 61000-3-3.

Nos testes de Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável também foi registrada uma inconsistência em relação à norma IEC 61000-3-3, visto que a maior parte dos voluntários classificou os níveis de potência 4 e 6, outrora classificados como não geradores de *flicker*, como Pouco Perceptível.

Tabela 37 - Análise para Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável

Nível de Potência (0 a 10)	**Nível de Percepção de Flicker**			
	Muito perceptível	**Perceptível**	**Pouco perceptível**	**Imperceptível**
1			6	
2				6
3				6
4			4	2
5				6
6			4	2
7				6
8				6
9		1	5	

Fonte: Iserhardt (2014)

A Tabela 38 apresenta os resultados obtidos para o método tradicional de Controle por Ciclos Inteiros, onde nota-se que para este caso o índice de *flicker* é bem maior. Este resultado está em conformidade com os obtidos nos testes teóricos.

Tabela 38 - Análise para Ciclos Inteiros (Tradicional)

Nível de Potência (0 a 10)	**Nível de Percepção de Flicker**			
	Muito perceptível	**Perceptível**	**Pouco perceptível**	**Imperceptível**
1		4	2	
2	6			
3	4	2		
4	4	2		
5	4	2		
6	4	2		
7	4	2		
8	5	1		
9		4	2	

Fonte: Iserhardt (2014)

Assim, os resultados finais para a Análise Quantitativa por Percepção Humana são resumidos na Figura 44.

Figura 44 - Resultados finais da Análise Quantitativa por Percepção Humana

5 CONCLUSÃO

A modulação de potência por Ciclos Inteiros apresenta pouca probabilidade de geração de IEM e harmônicas. Em contrapartida, é praticamente inevitável o surgimento de *flicker* na rede elétrica, principalmente quando esta não for dimensionada de forma correta. Possivelmente este tenha sido o principal fator a limitar seu crescimento no âmbito dos chuveiros eletrônicos.

As técnicas propostas neste trabalho, em especial os controles Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, conseguiram bons resultados na tentativa de atenuar o efeito *flicker*. Utilizando uma das normas mais rigorosas de medição (curva IEC 61000-3-3), o controle por Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável conseguiu uma eficiência superior a 80% na eliminação de *flicker*, enquanto a técnica tradicional de Ciclos Inteiros apresentou eficiência inferior a 20%.

O controle Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável também apresentou resultados de eficiência superiores ao método tradicional de Ciclos Inteiros, eliminando o efeito *flicker* em quase 50% dos níveis de potência, utilizando como referência a curva IEC 61000-3-3. Porém, nos teste de Análise Quantitativa por Percepção Humana (seção 4.3) este resultado baixou consideravelmente, eliminando o *flicker* apenas em pouco mais de 25% dos níveis de potência. Esta análise também mostrou uma fragilidade na curva da norma IEC 61000-3-3, visto que na prática os resultados não foram condizentes com a teoria.

A Análise Quantitativa por Percepção Humana (seção 4.3) também registrou inconsistência em relação à norma IEC 61000-3-3 para a técnica Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, onde os níveis 4 e 6 de potência apresentaram probabilidade de geração de *flicker*. Este resultado representa um risco de queda de eficiência para menos de 70%. Ainda assim, um índice 250% superior ao registrado no método tradicional de modulação por Ciclos Inteiros.

A técnica Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência), em relação ao trabalho original, aumentou em 25% (de 4 para 5) os níveis de potência sem geração de *flicker*. Mas, em comparação com o controle tradicional de Ciclos Inteiros, utilizando como referência a curva IEC 61000-3-3, não houve ganho.

Indiscutivelmente o controle Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável é o mais eficiente na eliminação do efeito *flicker*. Nos raros casos em que não se conseguiu eliminá-lo por completo, foi possível atenuá-lo de forma a deixá-lo quase imperceptível,

conforme Análise Quantitativa por Percepção Humana (seção 4.3). Em contrapartida, nesta técnica não existe 100% de garantia de que seja mantido um nível CC sempre nulo (um semiciclo positivo seja sempre seguido por um semiciclo negativo).

Dessa forma, para escolha da técnica mais apropriada devem ser consideradas as prioridades do sistema onde esta será implantada. Se a prioridade for eliminação do efeito *flicker*, o controle Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, ainda que possua implementação mais complexa e não exista uma garantia total de manter o nível CC sempre nulo, é mais indicado. Já para os casos onde a prioridade for um sistema estável e de fácil implementação, os controles Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros Otimizados (7 níveis de potência) passam a ser a melhor opção.

Contudo, possivelmente a técnica ideal poderia ser alcançada utilizando um método hibrido que combine as três técnicas. Assim poderia ser utilizado, para cada nível de potência, o controle que apresenta melhores resultados no que diz respeito à estabilidade e eliminação do efeito *flicker*.

É importante destacar, também, as vantagens obtidas com a utilização de múltiplos elementos aquecedores. À medida que estes são adicionados, há uma considerável diminuição na variação de tensão, conforme apresentado em Análise de $\Delta V/V$ através de Equacionamento Matemático (seção 4.2.1). Considerando que o nível de flutuação de tensão é um dos principais fatores que contribuem para a geração de *flicker*, a escolha da técnica de modulação ideal, combinada com o uso de múltiplos elementos aquecedores, pode melhorar ainda mais os resultados.

Com relação aos métodos de medição, foi fundamental o desenvolvimento do protótipo Simulador de Flutuação de Tensão. Através deste foi possível confrontar os resultados obtidos em aproximações teóricas com os obtidos em testes práticos, agregando valor à pesquisa. Foi através das medições de variação de luminosidade que identificou-se que, na maior parte dos níveis de potência testados, as técnicas propostas forneceram um sinal mais estável. Ou seja, em grande parte dos casos, mesmo na existência de *flicker*, este será menos perceptível em comparação com o método tradicional de controle por Ciclos Inteiros.

Com o uso do Simulador de Flutuação de Tensão também constatou-se uma pequena inconsistência nos resultados obtidos pela norma IEC 61000-3-3 para os controles Ciclos Inteiros com Período T Dimensionável e Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável, onde alguns níveis de potência, ainda que com um número de comutações por minuto acima

do mínimo estabelecido pela norma, apresentaram *flicker* na Análise Quantitativa por Percepção Humana (seção 4.3).

Por fim pode-se dizer que o presente trabalho atingiu os objetivos definidos, tendo em vista que as técnicas propostas de otimização para o controle tradicional de Ciclos Inteiros conseguiram aumentar os níveis de potência sem ocorrência de *flicker*. As adaptações para múltiplos elementos aquecedores também contribuíram significativamente na busca por eliminar este efeito indesejável.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante as atividades práticas foi desconsiderado o uso de lâmpadas fluorescentes devido a estas serem menos sensíveis à oscilações de tensão, bem como pelo fato de as normas técnicas utilizadas como parâmetro terem sido desenvolvidas com o uso de lâmpadas incandescentes. Porém, um teste rápido realizado em laboratório mostrou que as lâmpadas fluorescentes econômicas (que correspondem a uma grande fatia de mercado) apresentam resultados de geração de *flicker* bem próximos aos obtidos pelas lâmpadas incandescentes. Dessa forma, novas pesquisas com foco em testes de geração de *flicker* com o uso de lâmpadas fluorescentes seriam de grande valia.

Em relação às referências utilizadas como parâmetro neste trabalho, notou-se que há divergências entre as curvas Cenelec e IEC 61000-3-3. O Medidor UIE também apresenta resultados que divergem das duas referências anteriores. Somado a isso, a norma mais rigorosa sobre eliminação de *flicker* (IEC 61000-3-3) também se mostrou não ser 100% confiável para os casos em que a oscilação de tensão ocorre de forma assíncrona. Uma análise comparativa das três referências, confrontando dados teóricos com resultados obtidos através de testes práticos, poderia gerar uma referência mais consistente para ser utilizada em trabalhos futuros.

Por fim, notou-se uma dificuldade em alcançar um constante nível nulo de CC quando utilizando algoritmos de modulação em nível de semiciclos inteiros. Assim, um estudo direcionado em produzir algoritmos mais complexos para a técnica de Semiciclos Inteiros com Período T Dimensionável poderia torná-la ainda mais eficiente.

REFERÊNCIAS

[1] "Chuveiro Eletrico: Tipos," 2013. [Online]. Disponível em: http://chuveiro-eletrico.info/mos/view/Tipos_de_chuveiro_eletrico. [Acessado em: 20-Ago-2013].

[2] J. Schlabbach, D. Blume, and T. Stephanblome, "Voltage Quality in Electrical Power Systems." London, 2000.

[3] Z. Hanzelka and A. Bien, *Guia de aplicação de qualidade de energia. Disturbios de tensão: cintilamento*. AGH University of Science and Technology, 2006.

[4] Z. Hanzelka and A. Bien, "Disturbios de Tenão: Cintilamento." European Copper Institute (ECI), 1996.

[5] Z. Hanzelka and A. Bien, "Disturbios de Tensão: Medição de Cintilamento." European Copper Institute (ECI), 2005.

[6] IEC, "IEC 61000-3-3 - Norma Internacional." 2008.

[7] M. H. Rashid, *Power electronics: circuits, devices and applications*, 3rd ed. 2004, p. 880.

[8] I. Jahmeerbacus and C. Bhurtun, "Energy Efficiency and Power Quality Issues of AC Voltage Controllers in Instant Water Heaters," *IEEE*, 2012.

[9] C. J. de O. Júnior, "Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semi ciclos otimizados.," *teses.usp.br*. São Paulo - SP, 2006.

[10] R. dos S. Martins, "Aquecimento de água usando ciclos inteiros," *professorpetry.com.br*. Florianópolis - SC, 2009.

[11] A. Pomilio, "Eletrônica de Potência - Cap. 2." UNICAMP, Campinas - SP, 2002.

[12] L. C. Gili, R. Buerger, S. Vidal, and G. Oliveira, "Chuveiro Eletrônico: Conhecer para ter Consciência," no. Equação 1. XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém - PA, 2012.

[13] "PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica," 2014. .

[14] T. A. Racine and O. M. G. Prado, "Water Heating through Electric Shower and Energy Demand." School Polytechnic at University of São Paulo, São Paulo - SP, 1998.

[15] "Thermosystem," 2013. [Online]. Disponível em: http://www.thermosystem.com.br. [Acessado em: 18-Ago-2013].

[16] "Tabela de Resistividade dos Materiais Condutores," *Edufer Transformadores Ltda.*, 2014. [Online]. Disponível em: http://edufer.free.fr/026. [Acessado em: 11-Mai-2014].

[17] N. C. Braga, “Chuveiro Eletrônico (art. 435),” 2013. [Online]. Disponível em: http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/3206-art435.html. [Acessado em: 03-Jul-2013].

[18] Nambei fios e cabos, “Informações e Tabelas Técnicas.” p. 32, 2014.