

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA
ESPECIALIZAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS
ELETRÔNICOS**

RODRIGO DOS SANTOS MARTINS

AQUECIMENTO DE ÁGUA USANDO CICLOS INTEIROS

SANTA CATARINA
2009

RODRIGO DOS SANTOS MARTINS

AQUECIMENTO DE ÁGUA USANDO CICLOS INTEIROS

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina para obtenção do Título de especialista em desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Santa Catarina
2009

BANCA EXAMINADORA

Professor Doutor: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Professor Doutor: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Professor Doutor: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Aprovado em

DEDICATÓRIA

A meus pais, sem os quais nada disso seria possível, aos professores e coordenação por tornarem possível a realização deste curso.

A meu irmão Luciano, o qual foi um dos grandes responsáveis pela escolha da minha carreira profissional.

E um agradecimento em especial, ao amigo e colega de turma, Carlos Jason, que tive a felicidade de reencontrar, após muitos anos, neste curso de especialização. Agradeço pelo apoio e paciência quando garoto, ao me auxiliar a entender princípios básicos de eletrônica e incentivar a realização de experiências didáticas.

AGRADECIMENTOS

A Deus e minha família.

A toda coordenação e pessoal de apoio, que tornaram possível a realização deste curso com a qualidade e excelência típicos do IFSC.

Ao Professor Mauro Tavares Peraça, na orientação e finalização deste trabalho.

Ao bolsista Lucas Groposo, pelos excelentes trabalhos e empenho na montagem do protótipo e auxílio dos ensaios experimentais.

Ao professor Fernando Luiz Rosa Mussoi, que iniciou a orientação deste trabalho.

RESUMO

A qualidade da energia elétrica vem sendo alvo de inúmeras discussões, especialmente no que tange a distorções harmônicas de tensão e corrente. Em especial esta última, pois provoca a maioria dos distúrbios e problemas nos sistemas elétricos. Nas residências, um dos maiores consumidores de energia, sem sombra de dúvida, são os chuveiros elétricos, devido à alta potência dos mesmos, necessária para aquecer uma quantidade razoável de água em um curto intervalo de tempo, assim como nas indústrias que também necessitam de aquecimento elétrico de água. Usualmente o controle para estes circuitos é feito com sistemas *ON/OFF*, ou com controle da tensão eficaz no elemento resistivo por meio de variação no ângulo de disparo em tiristores. Uma das desvantagens do controle *ON/OFF* é a perceptível mudança de temperatura entre os períodos *ON* e períodos *OFF*, o que os torna impraticáveis para processos que exijam estabilidade de temperatura, ou mesmo para conforto do usuário. O método de controle por variação no ângulo de disparo em tiristores tem excelente estabilidade de temperatura, porém para grandes potências, mesmo sendo estas puramente resistivas, o recorte da tensão, e conseqüentemente da corrente elétrica, gera fortes distorções harmônicas de tensão e corrente, que podem gerar diversos efeitos prejudiciais a sistemas da mesma rede elétrica e até mesmo prejudicar o funcionamento do próprio controle de aquecimento. Assim, como opção a estes controles citados, existe o controle por ciclos inteiros, que teoricamente une o melhor dos dois métodos citados acima, pois tem estabilidade e não gera distorção harmônica, pois efetua a comutação da carga na passagem por zero, não produzindo desta forma distorções harmônicas. A presente monografia tem como objetivo discutir para uso residencial um método de controle muito conhecido academicamente, e que vem se tornando a cada dia mais viável em virtude da redução drástica do custo dos microcontroladores. O controle proposto é o de ciclos inteiros para cargas resistivas em equipamentos de aquecimento de água, especialmente em chuveiros e torneiras elétricas. Porém, o controle por ciclos inteiros pode provocar o efeito "*Flicker*", ou cintilação, que é a variação da tensão da rede de energia, que pode provocar alguns inconvenientes, como a oscilação na luminosidade em lâmpadas incandescentes. Para minimizar ou eliminar estes efeitos técnicas de modulação e desenvolvimento de software são essenciais.

Palavras Chave: qualidade de energia elétrica; aquecimento de água; controle de aquecimento.

ABSTRACT

The quality of the electric energy comes being white of innumerable quarrels, especially in what it refers to the harmonic distortions of tension and chain. In special this last one, therefore it provokes the majority of the riots and problems in the electrical systems. In the residences, one of the consuming greater of energy, without the shadow of a doubt is the electric shower, due to high power of same, the necessary one to heat a reasonable amount of water in a short interval of time, as well as in the industries that also need water heating. Usually the control for these circuits is made with systems ON/OFF, or control of the RMS voltage in the resistive element by means of variation in the angle of detonation in thyristors. One of the disadvantages of control ON/OFF is the perceivable change of temperature between periods ON and periods OFF, what it becomes them impracticable for processes that demand temperature stability, or same for comfort of the user. The method of control for variation in the angle of detonation in thyristors has excellent stability of temperature, however for great powers, exactly being these purely resistive, the clipping of the tension, and consequently of the electric chain, generates forts harmonic distortions of tension and chain, that can generate diverse harmful effect the systems of the same electric net and even though to harm the functioning of the proper control of heating. Thus, as option to these cited controls, the control for entire cycles, that joins above optimum of the two cited methods, however with electronic control in high frequency exists, to perfectly synchronize the beginning of each cycle with the detonation of thyristors, not producing in such a way distortions harmonic. The present monograph has as objective academically to consider for residential use a method of control very known, and that it comes if becoming each more viable day in virtue of the drastic reduction of the controlling cost of micron. The considered control is of entire cycles for resistive loads in equipment of water heating, especially in shower and electric taps. However, control for cycles entire can to provoke effect "Flicker", or twinkle, that is the variation of the tension of the energy net, that can provoke some inconveniences, as the oscillation in the luminosity in incandescent light bulbs. To minimize or to eliminate these effect techniques of modulation and development of software they are essential.

Words Key: electric energy quality; water heating; controllers of heating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distúrbios da rede	19
Figura 2: Distorções na tensão da rede	23
Figura 3: Distorções na corrente	24
Figura 4: Exemplo de controle ON/OFF	31
Figura 5: Controle com diversos elementos resistivos	31
Figura 6: Tiristor e sua estrutura interna	33
Figura 7: Diagrama básico de controle de ângulo de fase	35
Figura 8: Gráfico da potência x ângulo de disparo	35
Figura 9: Forma de onda para 40% de carga, $\alpha=99^\circ$	36
Figura 10: Forma de onda para 40% de carga, $\alpha=99^\circ$	36
Figura 11: Ciclos inteiros	37
Figura 12: Degraus de potência usando ciclos inteiros	39
Figura 13: Controle analógico utilizando CI T2117	41
Figura 14: Circuito básico utilizado PIC 10F204	42
Figura 15: Circuito comum, para controle de ângulo de fase	43
Figura 16: Simulação 40% de 6600W, controle por fase	44
Figura 17: Fourier para 40% de 6600W, controle por ângulo fase	45
Figura 18: Comparação 40% com a IEC, controle por ângulo fase	46
Figura 19: Simulação 80% de 6600W, controle por ângulo fase	46
Figura 20: Fourier para 80% de 6600W, controle por ângulo fase	47

Figura 21: Comparação 80% com norma a IEC-61000, ângulo de fase	48
Figura 22: Circuito básico para simulações	49
Figura 23: Simulação 40% de 6600W, ciclos inteiros	49
Figura 24: Fourier para 40% de 6600W, controle por ciclos inteiros	50
Figura 25: Comparação 40% com a IEC-61000	51
Figura 26: Simulação 80% de 6600W, ciclos inteiros	51
Figura 27: Fourier para 80% de 6600W, controle por ciclos inteiros	53
Figura 28: Comparação 80% com a IEC, controle por ciclos inteiros	53
Figura 29: Circuito para simulação com impedância de $0,4+j0,3\Omega$	54
Figura 30: Simulação 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$, ângulo de fase	55
Figura 31: Fourier para 40% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	56
Figura 32: Comparação 40% com a IEC, ângulo de fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	56
Figura 33: Simulação, 80% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	57
Figura 34: Fourier para 80% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	58
Figura 35: Comparação 80% com a IEC, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	59
Figura 36: Detalhe do efeito da comutação	60
Figura 37: Comutação para 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$	61
Figura 38: Fourier para 40% de 6600W, controle por ciclos, rede $0,4+j0,3\Omega$	62
Figura 39: 80% de 6600W, controle por ciclos inteiros, rede $0,4+j0,3\Omega$	63
Figura 40: Análise da comutação para 80%, ciclos inteiros, rede $0,4+j0,3\Omega$	64
Figura 41: Flicker para 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$, método 1	65
Figura 42: Flicker para 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$, método 2	66

Figura 43: Flicker para 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$, método 3	67
Figura 44: Diagrama de blocos do protótipo	68
Figura 45: Circuito utilizado na execução do experimento	69
Figura 46: Diagrama de blocos do algoritmo	70
Figura 47: Disparos para 40% da carga, com ângulo de fase	71
Figura 48: Distorção para 40% da carga, com ângulo de fase	72
Figura 49: Ciclos inteiros para 40% de carga	72
Figura 50: Distorção para 40% da carga usando ciclos inteiros	73
Figura 51: Disparos para 80% da carga, com ângulo de fase	74
Figura 52: Distorção para 80% da carga, com ângulo de fase	74
Figura 53: Disparos para 80% da carga, com ciclos inteiros	75
Figura 54: Distorção harmônica usando ciclos inteiros para 80% de carga	76
Figura 55: Aquisição, à 10% de potência, $\alpha=133^\circ$, $M=10$ $m=1$	76
Figura 56: Aquisição à 20% de potência, $\alpha=120^\circ$, $M=5$ $m=1$	77
Figura 57: Aquisição à 30% de potência, $\alpha=108^\circ$, $M=10$ $m=3$	77
Figura 58: Aquisição à 40% de potência, $\alpha=99^\circ$, $M=5$ $m=2$	77
Figura 59: Aquisição à 50% de potência, $\alpha=90^\circ$, $M=2$ $m=1$	78
Figura 60: Aquisição à 60% de potência, $\alpha=81^\circ$, $M=5$ $m=3$	78
Figura 61: Aquisição à 70% de potência, $\alpha=71^\circ$, $M=10$ $m=7$	78
Figura 62: Aquisição à 80% de potência, $\alpha=60^\circ$, $M=5$ $m=4$	79
Figura 63: Aquisição à 90% de potência, $\alpha=45^\circ$, $M=10$ $m=9$	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Normas das distorções harmônicas	27
Tabela 2: Norma IEC 61000-3-4 para correntes acima de 16A	28
Tabela 3: Resultado da simulação, 40% de 6600W, controle por ângulo de fase	44
Tabela 4: Resultado da simulação, 80% de 6600W, controle por ângulo de fase	47
Tabela 5: Resultado da simulação, 40% de 6600W, ciclos inteiros	50
Tabela 6: Resultado da simulação, 80% de 6600W, ciclos inteiros	52
Tabela 7: 40% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	55
Tabela 8: 80% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$	58

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	16
2.1 DISTÚRBIOS RELACIONADOS COM A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	18
2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS	20
2.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO	22
2.4 DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE	23
2.5 EFEITOS DAS DISTORÇÕES NOS SISTEMAS ELÉTRICOS	24
2.6 SOBREAQUECIMENTO DOS CONDUTORES	24
2.7 PERDAS EM TRANSFORMADORES	25
2.8 SOBRECORRENTE EM CAPACITORES DE CORREÇÃO	25
2.9 EFEITOS EM GERADORES E MOTORES	25
2.10 MÉTODOS PARA MINIMIZAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	26
2.11 NORMAS PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS	27
3. NECESSIDADE DE AQUECIMENTO DE ÁGUA	29
3.1 AQUECIMENTO INDUSTRIAL E COMERCIAL	29
3.2 AQUECIMENTO RESIDENCIAL	29
3.3 CONTROLES PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE ÁGUA	30
3.3.1 CONTROLE <i>ON/OFF</i>	30
3.3.2 CONTROLE COM DIVERSOS ELEMENTOS RESISTIVOS	31
3.3.3 CONTROLE COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE DE TIRISTORES	32
3.4 CONTROLE COM CICLOS INTEIROS	37
3.4.1 O QUE SÃO CICLOS INTEIROS	37
3.4.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA UTILIZANDO CICLOS INTEIROS	38
3.5 CIRCUITOS DE CONTROLE DE CICLOS INTEIROS	39
3.5.1 CIRCUITOS DE CONTROLE ANALÓGICOS	40
3.5.2 CIRCUITOS DE CONTROLE MICROCONTROLADOS	41
4. ANÁLISE DE HARMONICAS	43
4.1 ANÁLISE DE CONTROLE POR ÂNGULO DE FASE CONSIDERANDO FONTE IDEAL	43
4.2 ANÁLISE DE CONTROLE COM CICLOS INTEIROS CONSIDERANDO FONTE IDEAL	48
4.3 ANÁLISE DE CONTROLE POR ÂNGULO DE FASE CONSIDERANDO FONTE REAL	54
4.4 ANÁLISE DA COMUTAÇÃO NO CONTROLE DE DISPARO CONSIDERANDO FONTE REAL	59
4.5 ANÁLISES DE CONTROLE COM CICLOS INTEIROS CONSIDERANDO FONTE REAL	60
4.6 ANÁLISES DA COMUTAÇÃO NO CONTROLE POR CICLOS INTEIROS CONSIDERANDO FONTE REAL	63
4.7 PROBLEMAS DO USO DE CONTROLE POR CICLOS INTEIROS	64

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	68
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	84
ANEXO I	85

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro, assim como o de outros países, vem sofrendo cada vez mais com a baixa qualidade dos dispositivos por ele alimentados, devido ao crescente uso de tecnologia de chaveamento eletrônico e falta de normas rígidas e legislação clara sobre os limites tolerados para introdução de harmônicos no sistema.

Este tipo de carga, caracterizada pela forte não linearidade, introduz no sistema componentes harmônicos de tensão e corrente, que podem chegar a ordens muito elevadas, o que prejudica todo o sistema por causar interferências no funcionamento dos equipamentos.

Cada equipamento tolera um certo nível de harmônicos, a chamada susceptibilidade, sendo que os equipamentos mais sensíveis são aqueles que em seu projeto é levado em conta que sua alimentação seja com uma forma de onda puramente senoidal. Porém, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas no sistema, seja de tensão ou de corrente, pode ser prejudicial ou mesmo fatal para o seu perfeito funcionamento.

Com o aumento crescente do uso da eletrônica de potência para controle de cargas, há a tendência destas distorções se tornarem cada vez maiores, pois no Brasil não existe até o momento legislação regulatória ou consciência dos fabricantes sobre o prejuízo que seus equipamentos vêm causando ao sistema elétrico.

No passado não havia, por parte dos fabricantes, maiores preocupações com harmônicos, tão pouco pelos consumidores. Entretanto, os equipamentos tem se utilizado cada vez mais de eletrônica de potência em substituição das pesadas fontes de alimentação com transformadores, o que faz aumentar o conteúdo harmônico presente nos sistemas, causando uma série de efeitos indesejáveis nos mais diversos equipamentos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica.

Existem diversas formas de reduzir as distorções, tais como o uso de filtros ativos e passivos, mas a melhor forma de resolver este problema é não gerar harmônicos na rede, motivo deste trabalho, no que tange ao aquecimento de água por elementos resistivos.

Pode-se dizer que para uso residencial, o controle eletrônico predominante para equipamentos de aquecimento de água de passagem, sejam chuveiros, torneiras elétricas e similares, é o controle por ângulo de fase.

Este controle consiste em aplicar tensão no elemento de aquecimento (resistência elétrica) alguns instantes após o cruzamento do semiciclo com a tensão zero, com a variação destes instantes entre a faixa que corresponde o período entre um semiciclo e outro, a tensão eficaz na carga também se altera, provocando maior ou menor aquecimento.

Entretanto, este tipo de acionamento causa fortes distorções na forma de onda da corrente elétrica drenada da rede, pois esta torna-se totalmente distorcida em relação à forma de onda da tensão, podendo causar sérios problemas a outros equipamentos alimentados por esta mesma rede.

O controle por ciclos inteiros, para acionamento de cargas resistivas, não gera harmônicos na rede, pois a carga é conectada à rede elétrica no instante da passagem da tensão com zero, fazendo com que a forma de onda da corrente seja exatamente igual à forma de onda da tensão aplicada ao elemento.

Em contra partida, acionamentos de cargas utilizando ciclos inteiros pode causar o chamado efeito **Flicker**, que consiste na queda do valor eficaz da tensão da rede toda vez que a carga é acionada, e esta queda pode ser grande o suficiente para ser percebida através do cintilamento da iluminação local.

Análises de simulações e experimento realizado nos laboratórios do IFSC (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina), mostrarão prós e contras relacionados aos dois tipos de controle citados, que após comparação poderá ser avaliado se é possível adaptar equipamentos convencionais para o uso de controles por ciclos inteiros ou se existem limitações para tal método.

O presente trabalho será abordado primeiramente com os conceitos de qualidade de energia elétrica, apresentação de norma internacional IEC61000, simulações e resultados experimentais, onde poderá ser observado a possibilidade ou não da implementação de controle por ciclos inteiros em sistemas de aquecimento de água.

2. Qualidade da energia elétrica

A qualidade de energia pode ser definida pela concessionária como ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos, medidos no ponto de entrega da energia.

Já a visão do usuário é que a qualidade da energia é a garantia de funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas (Eletrobrás/Procel).

Em Eurelectric(2003) o produto energia elétrica tem uma característica própria, sua qualidade, que além de depender dos elementos de produção, depende também da forma como é usada a cada instante pelos vários equipamentos dos diversos consumidores conectados ao sistema elétrico.

Conforme Kennedy(2000), qualidade de energia elétrica é uma questão de perspectiva, pois observando o lado da geração, é a capacidade de produzir energia na frequência fundamental (60Hz no caso do Brasil) com a menor variação possível.

Já para a distribuição refere-se a uma variação de tensão em torno de 5% da nominal. Para o consumidor final, qualidade de energia elétrica são as características de tensão, corrente e potência dentro de valores que não causem falha ou operação inadequada dos equipamentos de sua instalação.

A qualidade da energia elétrica (Dugan, 2002), é algo muito difícil de mensurar, e para isso existem diversos padrões para a tensão que devem ser seguidos, assim como outros critérios técnicos. Mas o indicador determinante para a qualidade da energia elétrica é a performance e produtividade dos equipamentos do consumidor final.

Kennedy(2000) também afirma que qualidade de energia elétrica e confiabilidade são sinônimos. Por exemplo um blecaute, que atinge de uma só vez uma quantidade enorme de consumidores, representam apenas 4,7% do total de distúrbios que ocorrem num sistema de energia, os restantes 95,3% dos distúrbios são de curta duração e alteram as características da tensão.

Confiabilidade é um fato essencial para o fornecimento, segundo Lakevi e Holmes(1995), sendo que os principais fatores para definir esta confiabilidade são as freqüências das interrupções, a duração de cada uma, e o número de consumidores que deixaram de receber a energia elétrica devido a estas.

Todos os atuais programas de conservação de energia, adotados pelas empresas governamentais e não governamentais se baseiam considerando-se que o sistema elétrico de potência esteja operando sob condições onde a forma de onda é praticamente senoidal, com seus níveis de tensão dentro dos valores estabelecidos por diversas normas internacionais, tais como a IEC 61000.

Entretanto, atualmente a qualidade da energia elétrica surge como um fator muito mais relevante e necessário aos vários envolvidos no sistema, desde a geração ao consumidor final, pois a deterioração da qualidade da energia entregue pode provocar ineficiências técnicas e econômicas graves.

Com o aumento de cargas não lineares no sistema, o problema das distorções harmônicas tem se tornado cada vez mais significativo, o que vem causando diversos problemas no sistema de transmissão e geração de energia, que cada vez mais precisa suprir e adequar a rede com energia que não é transformada em trabalho útil aos consumidores.

As próprias medidas para conservação de energia vem inclusive causando estes efeitos indesejados, como a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, aplicação de inversores de freqüência, dimmers, controladores de potência para chuveiros e torneiras elétricas.

Isto se dá pelo fato de todos estes equipamentos trabalharem com elementos eletrônicos não-lineares, tais como diodos, tiristores, triacs, transistores, **Mosfets** (**Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors**), **Igbts** (**Insulated Gate Bipolar Transistors**), entre outros, que em sua operação consomem da rede elétrica potência de forma que a corrente não acompanha a forma de onda da tensão da rede, ou seja, não-lineares, gerando distorções e freqüências harmônicas.

Conforme Golkar (2004), qualidade de energia elétrica envolve as formas de onda de corrente e tensão senoidais, presença de harmônicas nas tensões das barras e corrente de carga, assim como a presença de picos e quedas momentâneas da tensão, entre outros distúrbios.

Diversos são os aspectos que devem ser considerados para se quantificar a qualidade da energia elétrica, tanto em regime permanente quanto em regime transitório, dentre os quais, conforme Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL estão:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) desequilíbrios de tensão;
- d) flutuação de tensão;
- e) variação de frequência;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) harmônicos;

2.1 Distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica

Em um sistema elétrico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser perfeitamente senoidais, equilibradas, com amplitude e frequência constantes. Assim, qualquer desvio acima de certos limites, estabelecidos por normas, pode ser considerado como uma perda da qualidade da energia.

Os principais fenômenos associados à qualidade de energia elétrica, de acordo com a norma *IEEE Standard 1159* e também publicado pela Eletrobrás/Procel, podem ser agrupados da seguinte forma:

- **Variações Transitórias de Tensão (*Transient Voltages*):** são variações súbitas do valor instantâneo da tensão e estes transitórios podem ser subdivididos em:
 - Surtos de Tensão (*Impulsive Transients*): causados por descargas atmosféricas;
 - Transitórios Oscilatórios de Tensão (*Oscillatory Transients*): são oscilações no valor instantâneo da tensão, normalmente causados por manobras nas linhas de distribuição;
 - Recortes de Tensão (*Notching*): são descontinuidades do valor instantâneo da tensão, causadas por curto circuitos fase-fase num sistema em operação, seguidos de transitórios oscilatórios.

- **Variações Momentâneas de Tensão (Short Duration Voltage Variations):** são variações momentâneas no valor eficaz da tensão, possuem duração de $\frac{1}{2}$ ciclo a 1 minuto, e podem ser classificados como:
- Subtensões Momentâneas (**Voltage Sags**): reduções momentâneas do valor eficaz da tensão em uma ou mais fases do sistema, para tensões de 10% a 90% da tensão nominal;
 - Sobretensões Momentâneas (**Voltage Swells**): elevações momentâneas do valor eficaz da tensão da rede, em uma ou mais fases do sistema, para tensões superiores a 110% da nominal;
 - Interrupções momentâneas de Tensão (**Short Duration Interrupts**): são reduções inferiores a 10% do valor nominal da tensão da rede;
 - Cintilação (**Flicker**): é a percepção visual resultante da variação do fluxo luminoso em lâmpadas incandescentes submetidas às Flutuações de tensão do sistema elétrico

A figura 1 ilustra exemplos típicos para melhor entendimento das variações e distúrbios apresentados anteriormente, onde pode-se ver cada caso em relação a uma seqüência de ciclos normais de um sistema elétrico.

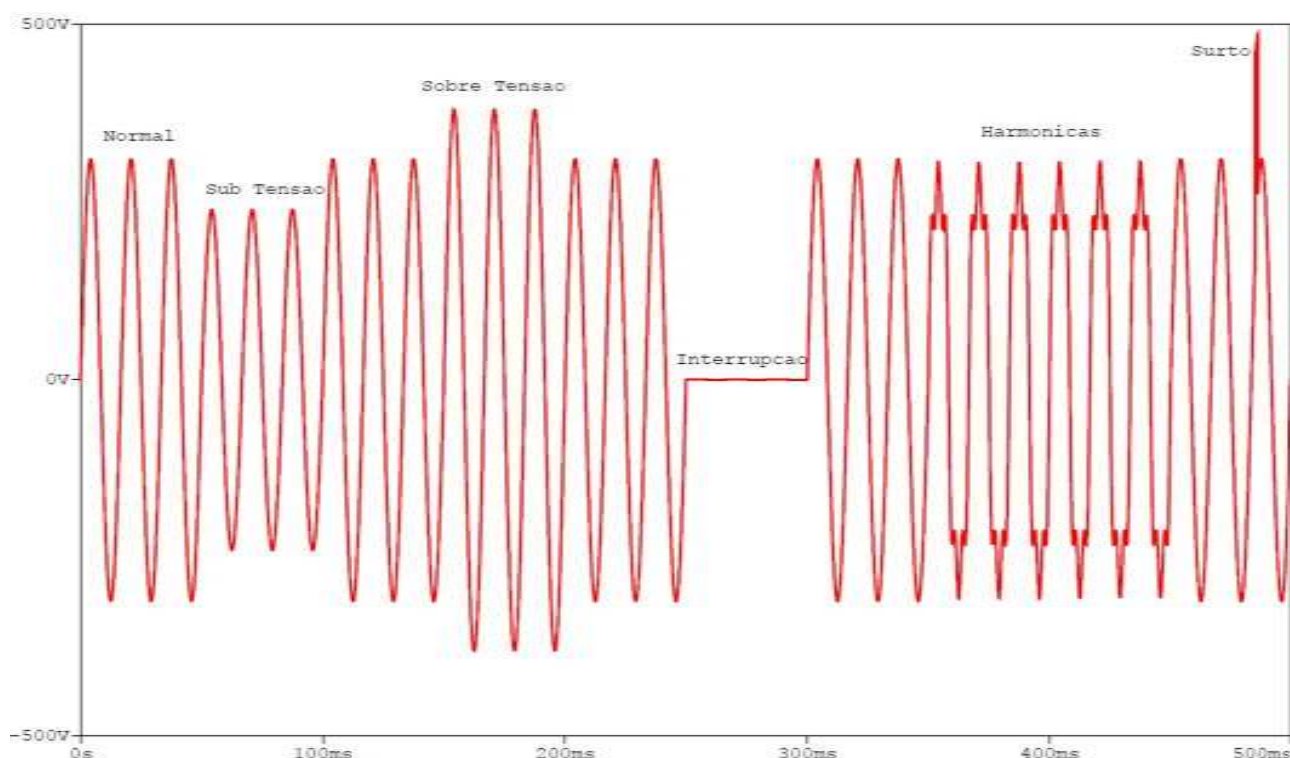


Figura 1: Distúrbios da rede

2.2 Distorções harmônicas

Harmônica é a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental, gerada principalmente por cargas não lineares, como fontes de alimentação eletrônicas. No caso de nossa rede, que é de 60Hz, os múltiplos são 120Hz, 180Hz, 240Hz, 300Hz e assim por diante.

Todos os sinais periódicos, tanto de corrente quanto de tensão no caso da rede elétrica, podem ser decompostos em componentes utilizando a Série de Fourier no domínio do tempo, o que resulta numa análise poderosa quando é necessária a quantificação de cada componente harmônico de um sistema, e é dada pela equação 1.

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(nt) + B_n \sin(nt)) \quad (1)$$

Onde:

$$A_0 = 1/\pi \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(nt) dt \quad (3)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin(nt) dt \quad (4)$$

Onde para as equações 1 à 4:

$f(t)$ = função periódica da rede elétrica

A_0 = Valor constante da rede (parcela de tensão contínua)

A_n = Valor de pico da componente co-senoidal

B_n = Valor de pico da componente senoidal

t = variável temporal

n = ordem da harmônica

Cabe ressaltar que os harmônicos ímpares são os mais comuns, pois geralmente as cargas consomem da rede elétrica uma potência simétrica para cada semiciclo de uma onda. Cargas que não consomem simetricamente a mesma potência tendem a gerar na rede componentes harmônicos pares, muito mais difíceis de atenuar, pois produzem componentes contínuas na rede elétrica.

Harmônicas são um fenômeno contínuo, e não devem ser confundidas com fenômenos de curta duração que duram apenas alguns ciclos, sendo possível a elaboração de meios para sua redução ou mesmo eliminação do sistema.

Conforme o Procel, existem vários índices que permitem analisar e quantificar as distorções na forma das ondas dentre eles podem-se destacar:

- ✓ *Fator de Potência;*
- ✓ *Fator de Crista;*
- ✓ *Distorção Harmônica Total (THD);*

Fator de Potência: Relação entre a potência ativa(P) de uma carga e a potência aparente(S) desta mesma carga, expressa pela equação 5

$$FP = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Onde:

FP = fator de potência

P = Potência real

S = Potência aparente ($V_{ef} * I_{ef}$)

Fator de crista: É a razão entre o valor da corrente ou tensão de pico(I_p , V_p) e a corrente ou tensão eficaz(I_n , V_n). Indica se um sistema ou uma carga possuem “picos” de tensão ou corrente. Muito comum em sistema com filtros capacitivos e cargas de alta potência não lineares, como geradores de Raios-X, Tomógrafos, estações de solda, entre outros.

$$K = \frac{I_p}{I_n} \quad (6) \quad \text{ou} \quad K = \frac{V_p}{V_n} \quad (7)$$

Onde:

K = fator de Cresta

I_p/V_p = Corrente de pico/tensão de pico respectivamente

I_n/V_n = corrente de ordem “n” / tensão de ordem “n”

Distorção Harmônica Total: É a medida da perturbação total que a carga produz na rede, gerada pelo somatório das freqüências múltiplas da onda fundamental, conforme visto na equação 8.

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (8)$$

Onde:

THD = **Total Harmonic Distortion** (distorção harmônica total)

I_1 = corrente de ordem 1 (fundamental)

I_n = corrente de ordem “n”

2.3 Distorções harmônicas de tensão

Uma tensão está distorcida quando sua forma de onda, não é mais puramente senoidal, onde um exemplo pode ser visto na figura 2. Sempre que uma tensão deixa de ser senoidal podem ocorrer mudanças de comportamento nas instalações elétricas e nos equipamentos alimentados por esta rede.

Quanto mais distorcida a forma de onda, mais acentuados serão os efeitos negativos sobre alguns tipos de equipamentos. O nível de distorção harmônica é medido como uma relação percentual, através do método de Fourier que decompõe a forma de onda sob análise em uma somatória de outras ondas, medindo a intensidade individual de cada harmônico e totalizando suas componentes.

As distorções harmônicas de tensão são produzidas, em geral, por cargas, equipamentos, que consomem energia de maneira não linear (que não consomem

corrente numa proporção direta da tensão a ele aplicada) sendo ainda agravadas por instalações elétricas de alimentação e distribuição de alta impedância.

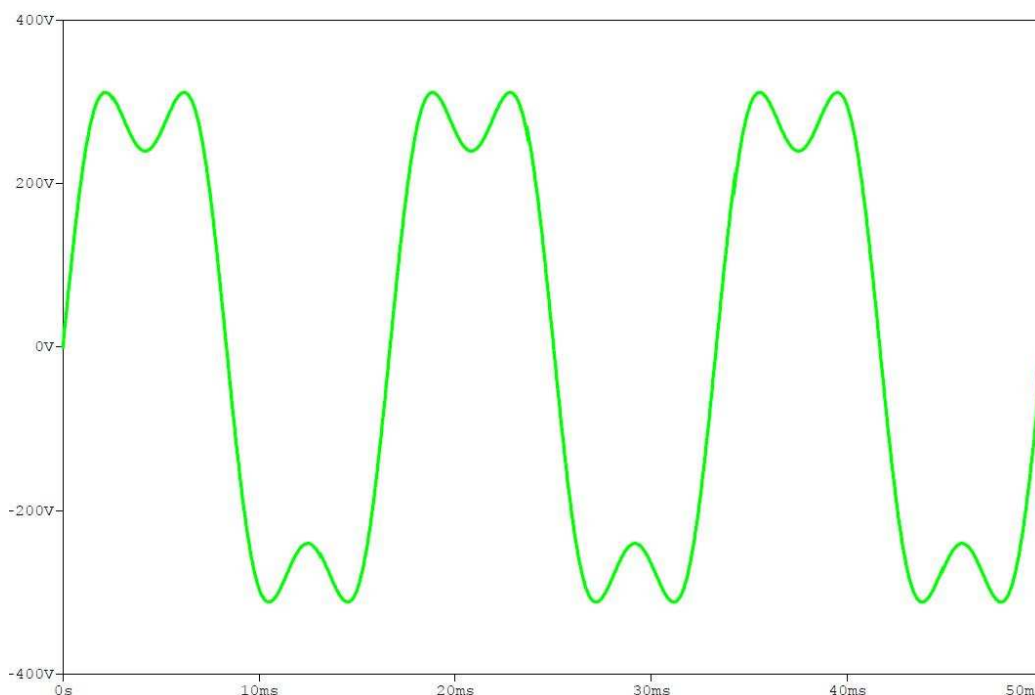


Figura 2: Distorções na tensão da rede

2.4 Distorções harmônicas de corrente

Quando se trata de harmônicos em instalações de potência, são os harmônicos de corrente que mais nos interessam porque estes componentes causam os maiores danos e interferências nos demais equipamentos de uma instalação.

Os componentes harmônicos de corrente são os principais causadores das distorções da forma de onda da tensão, pois está associado à capacidade da rede de fornecer as componentes necessárias para a carga geradora de tais harmônicos. Um exemplo típico de distorções harmônicas em corrente pode ser visto na figura 3, onde em traçado contínuo é representada a forma de onda da tensão e em tracejado a forma de onda distorcida da rede.

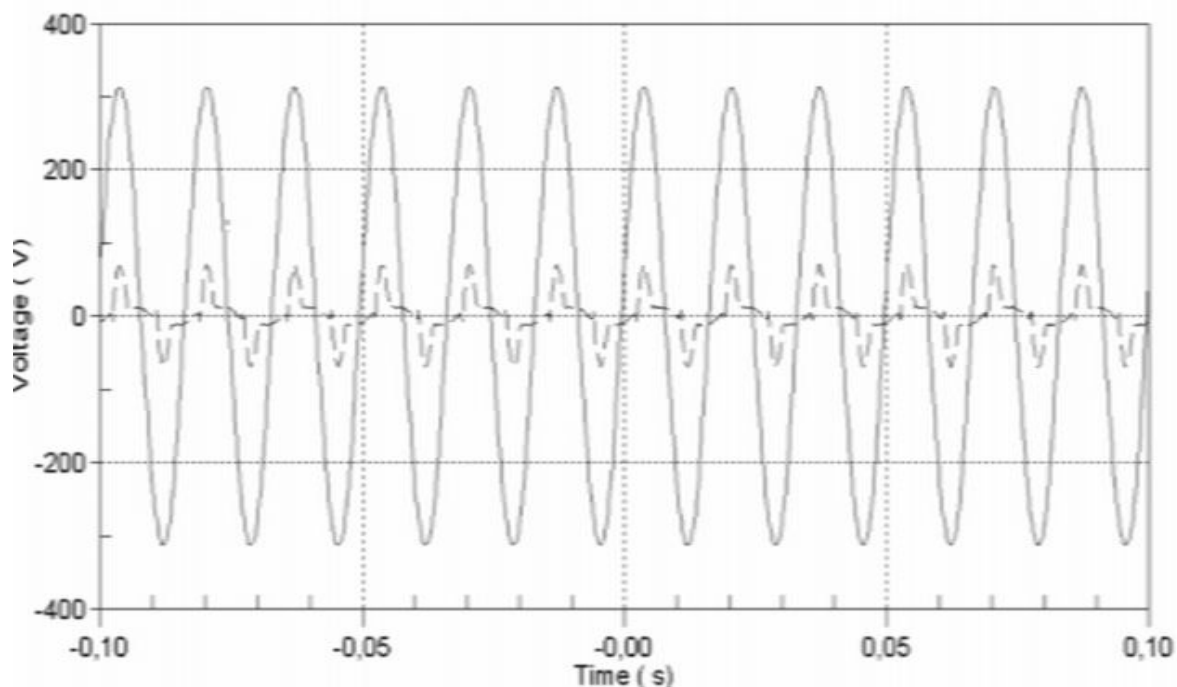


Figura 3: Distorções na corrente

2.5 Efeitos das distorções nos sistemas elétricos

Diversos efeitos podem ser observados num sistema onde a presença de distorções harmônicas de tensão e corrente estão presentes. Esses efeitos são notados de diferentes formas, por diferentes tipos de equipamentos alimentados por esta rede, e conforme o Procel podem ser citados:

- Sobreaquecimento dos condutores
- Perdas em transformadores
- Sobre corrente em capacitores de correção de FP
- Vibrações em geradores e motores

2.6 Sobreaquecimento dos condutores

Em razão do efeito pelicular, que restringe a secção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente.

2.7 Perdas em transformadores

Harmônicos na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas no cobre, pois estas perdas estão diretamente associadas à frequência. Além disso, o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor também aumenta com a frequência.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados.

2.8 Sobrecorrente em capacitores de correção

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

2.9 Efeitos em geradores e motores

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, afetando, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal. Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental (como o 5º harmônico).

Algumas componentes (por exemplo, 5ª e 7ª harmônicas) podem produzir oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas.

2.10 Métodos para minimização de distorções harmônicas

Diversos são os métodos que podem ser utilizados para redução das componentes harmônicas numa instalação, dependendo do tipo de carga, ordem das harmônicas e tipo de equipamentos alimentados pela rede.

Cada método possui vantagens e desvantagens, devendo cada caso ser analisado criteriosamente, observando-se a relação custo x benefício, assim como a necessidade real de redução na instalação, seja para atendimento de normas, seja para redução dos efeitos das harmônicas no próprio sistema.

Os mais comuns são:

- Filtros passivos;

São mais empregados em virtude do seu relativo baixo custo e facilidade de implantação, são mais simples e robustos, não possuindo componentes eletrônicos de comutação.

- Filtros ativos;

São eletrônicos, geralmente do tipo seguidor de tensão, possuem alta eficiência e tamanho reduzido.

- Filtros híbridos

Combinação de filtros passivos com ativos, onde um complementa a atuação do outro para melhor desempenho geral

- Correção no projeto dos equipamentos.

Conjunto de técnicas e métodos utilizados desde a concepção até a produção de um equipamento, tendo como foco redução de harmônicos, foco deste trabalho, onde a melhor solução para um problema é não gerá-lo.

No presente trabalho, será especialmente abordada a técnica de comando e comutação utilizando microcontroladores, em virtude do estudo se basear na mudança da técnica acionamento atual em equipamentos de aquecimento que usam tiristores, que é pela alteração do ângulo de disparo, e que tem como consequência a geração de componentes harmônicos no sistema, para técnica de ciclos inteiros, sem geração de harmônicos.

2.11 Normas para distorções harmônicas

As normas internacionais que definem os níveis de distorções harmônicas aceitáveis no sistema, ou seja, as harmônicas que uma determinada carga, ou conjunto de cargas, pode inserir no sistema elétrico que as alimenta, atualmente é a IEC 61000-3-4, que no Brasil infelizmente não é fiscalizada, pois não é oficialmente adotada, servindo então como base para estudos e comparações por ser adotada internacionalmente.

A norma é subdividida em duas partes, onde a primeira parte trata dos limites de harmônicas para equipamentos com corrente nominal até 16A, aplicável a inúmeros equipamentos de uso diário, como lâmpadas com reatores eletrônicos, torneiras elétricas com controle de temperatura eletrônico, equipamentos de informática, entre outros que são cada vez mais comuns em nosso dia a dia.

A tabela 1 mostra os valores aceitáveis pela IEC-61000 para dispositivos de até 16A, onde existe subdivisão de classes de equipamentos e respectivamente seus valores aceitáveis de harmônicos para cada componente.

Tabela 1: Norma IEC-61000 para distorções harmônicas de cargas até 16A

Ordem da Harmônica(N)	Classe A Máxima Corrente (A)	Classe B Máxima Corrente (A)	Classe C %da Fundamental	Classe D mA/W
2	1,08	1,62	2,0	-
3	2,30	3,43	30.FP	3,4
4	0,43	0,645	-	-
5	1,14	1,71	10	1,9
6	0,30	0,45	-	-
7	0,77	0,115	7,0	1,0
9	0,40	0,60	5,0	0,50
11	0,33	0,495	3,0	0,35
13	0,21	0,315	3,0	0,296
15< N < 39	15/n	15/n	3	3,85/N
8< N < 40	8/n	8/n	-	-

Onde:

Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada, aparelhos de uso doméstico com exceção da classe D, dimmers e demais equipamentos não inclusos nas demais classes;

Classe B: Ferramentas portáteis

Classe C: Dispositivos de iluminação

Classe D: Computadores, monitores, Televisores, e equipamentos com potência ativa inferiores a 600W.

A segunda parte da IEC 61000-3-4 trata dos equipamentos com corrente nominal superior a 16A, apresentada na tabela 2, será o principal alvo deste estudo, tendo em vista que os chuveiros elétricos apresentam corrente nominal geralmente superiores à 20A. Esta tabela servirá como base para comparações dos resultados das simulações e do experimento realizado

Tabela 2: Norma IEC 61000-3-4 para correntes acima de 16A

Ordem da Harmônica	Harmônico admissível (%)	Ordem da Harmônica	Harmônico admissível (%)
3	21,6	21	<0,6
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	<0,6
11	3,1	29	0,7
13	2,0	31	0,7
15	0,7	<33	>0,6
17	1,2		
19	1,1		

3 Necessidades de aquecimento de água

Por diversas razões o ser humano é obrigado a aquecer a água, seja para nosso simples conforto, para processos industriais, processos químicos, para geração de vapor, atividades terapêuticas e esportivas entre outros, e uma das formas mais comuns de aquecimento de água nos tempos modernos é utilizando sistemas elétricos.

Sem o aquecimento da água, ou seu aquecimento devidamente controlado, diversos dos processos citados seriam prejudicados ou mesmo impraticáveis, em especial processos químicos e atividades terapêuticas, quem tem como elemento fundamental o controle estável da temperatura para ativar seus processos e este influenciam sensivelmente o resultado final.

3.1 Aquecimento industrial e comercial

Para diversos processos industriais ou comerciais o aquecimento de água é essencial, tais como processos de tingimento de tecidos em indústrias têxteis, controle de temperatura em banheiras de fisioterapia, sistemas banho-maria para manter estável a temperatura de incubadoras neo natais, geração de vapor para fins medicinais ou mesmo como força motriz em máquinas de grande porte.

3.2 Aquecimento residencial

Sem o aquecimento de água, seja para auxiliar na limpeza, seja para conforto quando utilizado em chuveiros elétricos e sistemas de aquecimento de ambientes, certamente o dia a dia seria muito diferente, assim como a qualidade de vida como a conhecemos.

O aquecimento elétrico de água para fins residenciais é um dos maiores responsáveis pelo consumo de energia doméstico, e é também um grande causador de distorções harmônicas quando se utiliza de dispositivos eletrônicos, pois grande parte dos dispositivos eletrônicos de aquecimento utilizam técnica de comando por mudança do ângulo de disparo em tiristores, em especial os mais modernos.

Mesmo sendo utilizados por períodos de tempo relativamente curtos, se for tomado um grande sistema e dada a grande potência destas cargas, o valor das harmônicas geradas é bastante significativo, e tende a ser cada vez maior, em virtude do aumento do número desde tipo de dispositivo de controle em equipamentos de aquecimento.

Sob condições normais, a água disponível nas residências tem temperatura ambiente, e deve ser aquecida rapidamente até atingir o nível adequado ao seu uso, pois em geral esta água aquecida é utilizada em torneiras e chuveiros, que tem alto fluxo e sem realimentação de água aquecida (como o caso de piscinas e banheiras) onde se faz necessário elementos de potência elevada.

Ao utilizar técnicas de controle por ângulo de disparo, em cargas nesta ordem de potência, fortes componentes harmônicos de corrente são consumidos da rede, o que numa residência pode causar funcionamento incorreto de eletrodomésticos, principalmente nos equipamentos eletrônicos mais sensíveis, assim como o acionamento de disjuntores e dispositivos de proteção.

Quando somados, os efeitos que estes equipamentos de aquecimento presentes em uma grande região, ou instalação, geram na rede elétrica valores de harmônicos muito significativos, influenciando desta forma a qualidade de energia como um todo, não apenas para aqueles que possuem estes equipamentos.

3.3 Controles para aquecimento residencial de água

3.3.1 Controle *on/off*

É o mais simples dos dispositivos de controle, consiste no acionamento do elemento de aquecimento quando o fluxo de água é liberado, podendo estar associado a um termostato, e não proporciona vários níveis de aquecimento.

Este tipo de controle pode ser bem empregado em grandes volumes de água, que tem uma inércia térmica elevada, como banheiras, piscinas, boilers, e demais dispositivos capazes de armazenar grande quantidade de água aquecida

O funcionamento de um chuveiro simples pode ser observado na figura 4, sendo que na parte A é mostrado o estado **OFF**, onde não há contato elétrico entre a alimentação e o elemento de aquecimento, na parte B é mostrado o acionamento da carga em estado **ON**.

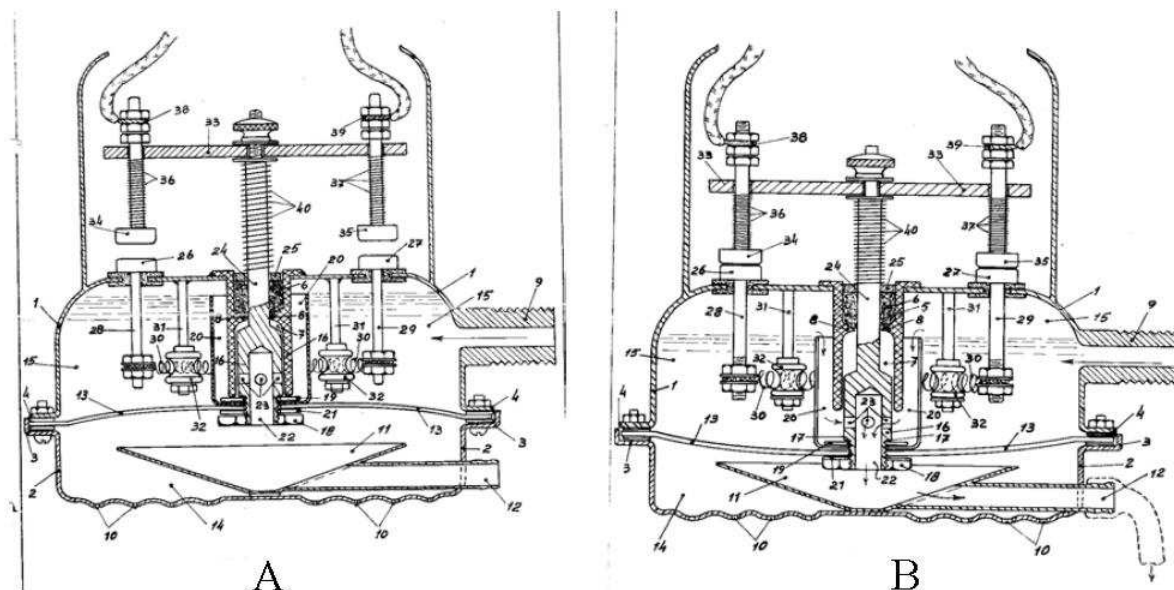


Figura 4: Exemplo de controle ON/OFF. Fonte : INPI, patente n.MU 1194, 02 de julho de 1951

3.3.2 Controle com diversos elementos resistivos

Este é um tipo de controle muito utilizado em equipamentos residências de aquecimento, pelo seu baixo custo e baixo índice de manutenção. Consiste num elemento de aquecimento com uma ou mais derivações ao longo da resistência, ou mesmo a associação de vários elementos resistivos, conforme mostrado na figura 5.

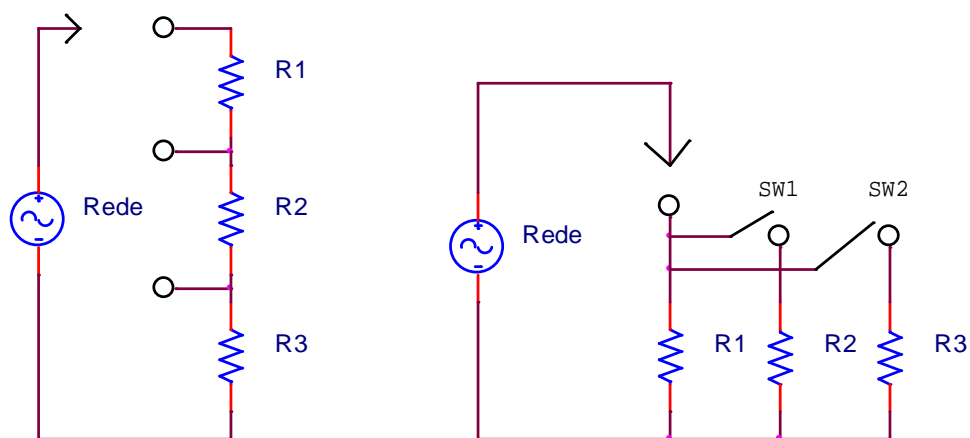


Figura 5: Controle com diversos elemento resistivos

Tendo um ponto comum, o controle de potência é feito aplicando-se tensão em um ou mais dos terminais do elemento de aquecimento, sendo esta seleção realizada pelo usuário, como em um chuveiro com opção de inverno/verão.

A equação 9 é válida para o cálculo da potência dissipada por este sistema, porém tendo como valor constante a tensão eficaz da rede elétrica, e como variável o valor da resistência elétrica.

$$P = \frac{V_{ef}^2}{R} \quad (9)$$

Onde:

P = potência dissipada

V_{ef} = tensão eficaz da rede

R = resistência equivalente do elemento de aquecimento

Encontra-se este controle em caldeiras elétricas, onde dentro destas existem diversos elementos de aquecimento, porém a quantidade de elementos alimentados simultaneamente depende diretamente da temperatura da água dentro da caldeira.

Este tipo sistema de aquecimento não gera harmônicos, por não possuir elementos de comutação de forma não linear, porém, a constante associação de elementos, principalmente quando grandes potências são exigidas, faz com que o nível de tensão da rede elétrica sofra oscilações, ou efeito “Flicker”, pois a potência drenada do sistema varia constantemente. Um exemplo prático é a antiga caldeira elétrica utilizada até 2006 no Hospital Governador Celso Ramos, em Florianópolis/SC, que possui exatamente este sistema, e, acumula em seu histórico as mais diversas queixas da vizinhança do hospital, por problemas de instabilidade da rede elétrica.

3.3.3 Controle com variação do ângulo de disparo de tiristores

Este controle, um dos alvos da análise do presente trabalho, é o que mais proporciona conforto para o usuário, em especial quando se fala em aquecimento de água em chuveiros e torneiras, onde o alto fluxo de água deve ser aquecido rapidamente e de forma estável.

Para melhor compreensão do sistema de controle por mudança do ângulo de disparo, se faz necessário uma breve descrição do elemento principal neste tipo de estrutura, o Tiristor.

O Tiristor SCR (***Silicon Controlled Rectifier***) foi desenvolvido por um grupo de engenheiros do ***Bell Telephone Laboratory*** (EUA) em 1957. Tiristor é o nome dado à componentes compostos por quatro camadas semicondutoras (PNPN).

Os Tiristores SCR's funcionam analogamente a um diodo, porém possuem um terceiro terminal conhecido como Gatilho (***Gate*** ou Porta). Este terminal é responsável pelo controle da condução (disparo).

Quando o Tiristor é diretamente polarizado e é aplicado um pulso de corrente elétrica no terminal de gatilho, o componente permite que a corrente elétrica circule, e assim permanece até que esta atinja um valor abaixo do valor de corrente de manutenção, entrando novamente em bloqueio, até novamente ser polarizado positivamente e um pulso ser aplicado ao seu terminal de gatilho.

Algumas características dos SCR's:

- São chaves estáticas bi-estáveis, ou seja, trabalham em dois estados: bloqueio e condução, com a possibilidade de controle;
- São compostos por 4 camadas semicondutoras (P-N-P-N), três junções (P-N) e 3 terminais (Ânodo, Cátodo e Gatilho);
- Apresentam alta velocidade de comutação e elevada vida útil;
- São aplicados em controles de relés, fontes de tensão reguladas, controles de motores, Choppers (variadores de tensão CC), Inversores CC-CA, Ciclo-conversores (variadores de frequência), carregadores de baterias, circuitos de proteção, controles de iluminação e de aquecedores e controles de fase, entre outras.

A figura 6 mostra a representação típica e estrutura interna de camadas e junções de um Tiristor típico.

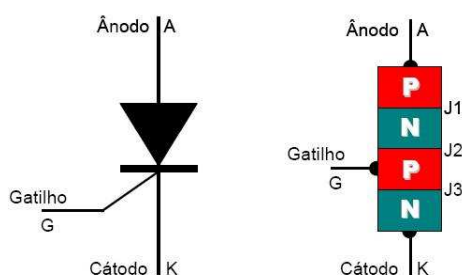


Figura 6: Tiristor e sua estrutura interna Fonte: TIRISTOR, SCR. **Retificador Controlado de Silício.** Prof. Fernando Luiz Rosa Mussoi – Março 2002.

Dois tiristores em configuração antiparalelo dão origem a um componente conhecido como TRIAC, capaz de conduzir corrente elétrica de forma bidirecional, podendo ser usado assim em corrente alternada.

Estes componentes são aplicados em circuitos como o da figura 7, onde controlam a passagem de corrente da rede elétrica para a carga, no caso um elemento resistivo para aquecimento de água.

O aquecimento se faz com a variação do ângulo de disparo do TRIAC, o que na prática muda o valor da tensão eficaz aplicada ao elemento de aquecimento. O valor da tensão eficaz em função do ângulo de disparo pode ser expresso pela equação 10, conforme consta em BARBI, I. Eletrônica de Potência, 4ª Edição, BR, 2002

$$V_{ef} = \sqrt{2}V_o \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}2\alpha}{4\pi}} \quad (10)$$

Onde:

V_o = valor rms da tensão da rede

α = ângulo de disparo

Com a variação do ângulo de disparo e conseqüente mudança no valor da tensão eficaz aplicada, a equação 9 pode ser novamente aplicada a este caso, sendo que o ângulo de disparo pode variar de 0 a 180°, os valores da potência dissipada são inúmeros, sem a ocorrência de degraus, ou seja, a temperatura pode subir ou descer suavemente.

Como a resistência do equipamento é constante, ao substituirmos a equação 10 na equação 9, temos como resultado equação 11, potência dissipada na carga em função do ângulo de disparo do tiristor.

$$P = \frac{2V_o^2}{R} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}2\alpha}{4\pi} \right) \quad (11)$$

Onde:

V_o = valor rms da tensão da rede

α = ângulo de disparo

R = resistência do elemento de aquecimento

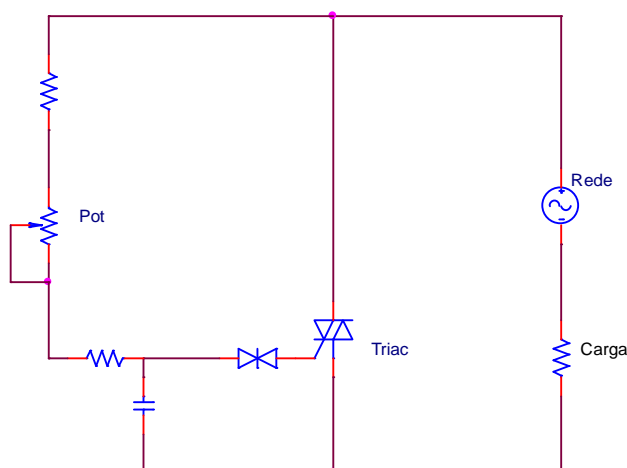


Figura 7: Diagrama básico de controle de ângulo de fase.

Traçando a equação 11, temos a figura 8 onde podemos ver como se desenvolve a potência em relação ao ângulo de disparo do tiristor, de 100% a 0% da potência total da carga em relação a variação de 0 a 180° do ângulo de disparo.

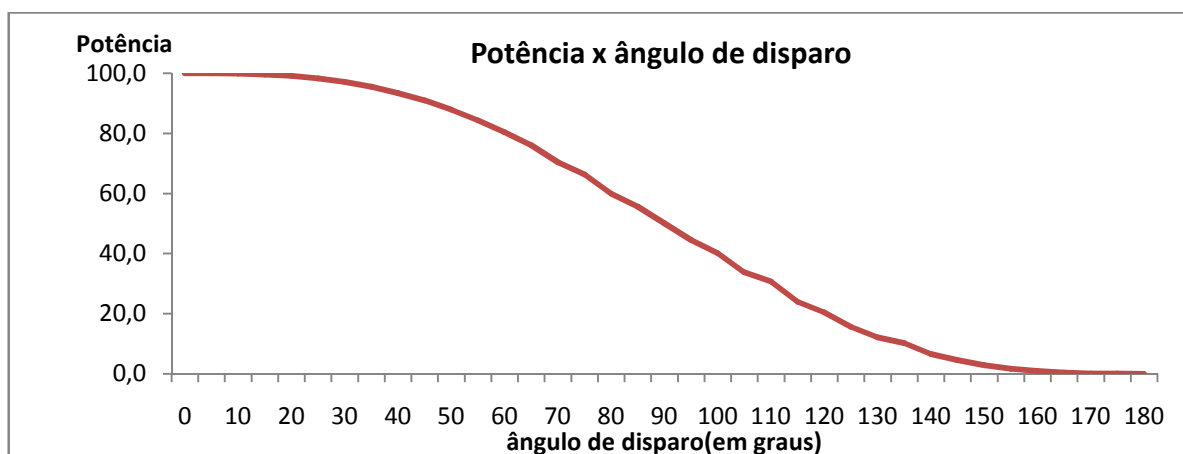


Figura 8: Gráfico da Potência x ângulo de disparo

Porém este método de controle de aquecimento apesar do seu alto grau de conforto ao usuário, por gerar uma variação suave na temperatura, gera nas redes elétricas grandes distorções harmônicas, principalmente as de baixa ordem.

Apesar disso, este tipo de controle vem sendo cada vez mais empregado nos chuveiros residenciais, seja pelo aumento do conforto, ou pela queda no valor dos equipamentos que se utilizam desta técnica. O custo destes controles também é muito baixo, tanto dos componentes necessários quanto no que tange o desenvolvimento, mínimo considerando a simplicidade deste tipo de técnica de comando.

Na figuras 9 e 10 podem ser observados, por exemplo, que de acordo com a equação 11, para 40% e 80% de potência dissipada na carga os ângulos de disparo correspondem a aproximadamente 99° e 60° respectivamente.

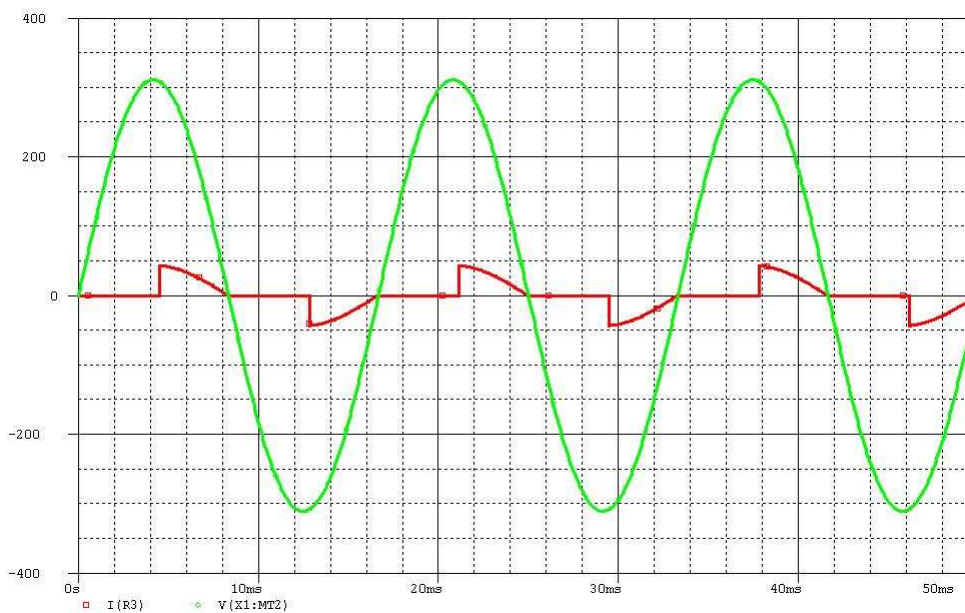


Figura 9: Forma de onda para 40% de carga, $\alpha=99^\circ$

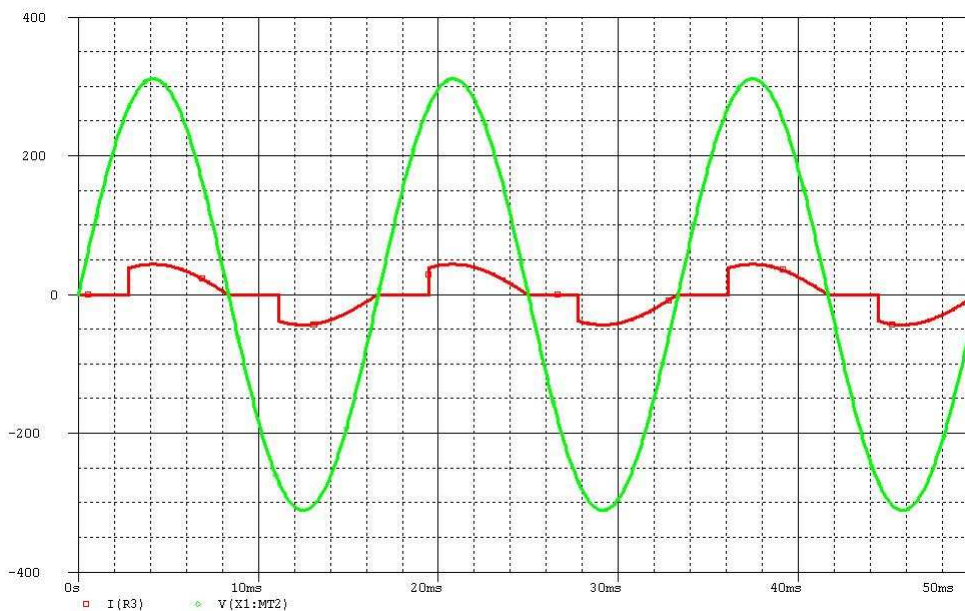


Figura 10: Forma de onda para 80% de carga, $\alpha=60^\circ$

3.4 Controle com ciclos inteiros

Este método de controle, tenta unir da melhor forma os controles que utilizam variação do valor eficaz da rede elétrica utilizando controle por ângulo de fase com o controle por vários elementos resistivos, tendo em vista que este método se baseia no controle ciclo a ciclo da rede elétrica no elemento de aquecimento, o que gera degraus no valor da potência dissipada, pois trata-se de um controle discreto e não contínuo como o controle por ângulo de disparo.

Um dos desafios deste tipo de controle é fazer com que estes degraus não sejam sentidos pelo usuário, de forma a causar uma sensação de linearidade no controle de temperatura, tal qual no método que se utiliza de variação no ângulo de disparo.

3.4.1 O Que são ciclos inteiros

Controle por ciclos inteiros consiste em comutar o semiconductor no momento exato da passagem da tensão pelo valor zero, e manter este chaveamento por um número específico de ciclos (T_1), e bloquear o circuito em outros ciclos, de forma periódica (T), fazendo com que a corrente da carga tenha um comportamento que pode ser exemplificado na figura 11.

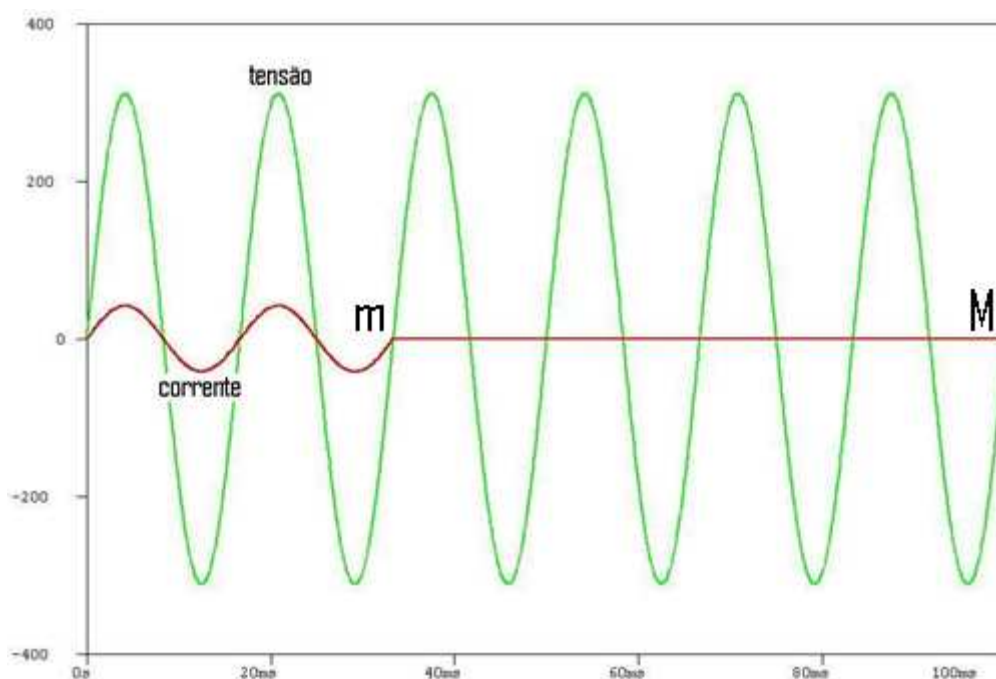


Figura 11: Ciclos inteiros, onde traço vermelho é a corrente na carga, em verde a tensão da rede

Este tipo de comando não gera harmônicos na rede elétrica, e podem proporcionar um bom controle de temperatura para sistemas domésticos e industriais, dependendo da elaboração do circuito ou do software (caso seja utilizado microcontrolador para o comando), porém seu controle é mais elaborado e de custo mais elevado.

O controle também é crítico, pois exige meios para monitorar a rede elétrica, a fim de efetuar o disparo dos semicondutores no momento exato da passagem por zero, exigindo em geral circuitos analógicos dedicados ou microcontroladores.

Dois exemplos de controle por ciclos inteiros podem ser vistos nas figuras 13 e 14, onde um dispositivo analógico e outro microcontrolado(cujos funcionamentos serão brevemente explicados posteriormente) são os responsáveis pelo controle do tiristor no momento de passagem por zero da rede elétrica,

No circuito da figura 13, um controle analógico é empregado, e percebe-se a necessidade de poucos componentes externos, porém, o período de controle, ou número de ciclos total, é fixo, e seu funcionamento será melhor entendido adiante.

O circuito da figura 14 utiliza um micro controlador da família PIC, e é visível o aumento do número de componentes externos, tornando-o mais elaborado e de custo mais elevado. Porém não é este o principal motivo deste tipo de controle ser utilizado comercialmente para fins residenciais, conforme será visto adiante.

3.4.2 Cálculo de potência utilizando ciclos inteiros

Para o cálculo de potência utilizando ciclos inteiros deve-se primeiramente definir um intervalo de tempo que marcará o início de cada período (T), sendo que neste período devem conter números inteiros de ciclos (M). A potência entregue para a carga depende da quantidade de ciclos que é aplicada a ela (m).

O valor do período deve ser escolhido tendo em vista a aplicação do equipamento, o número de degraus desejados, da influência do efeito *flicker* na rede e da capacidade de cada circuito de controle.

Sabendo que a potência total que o elemento de aquecimento pode entregar é P_0 , a potência P que será entregue para este elemento pode ser dada pela equação 12,

$$P = P_0 \cdot \frac{m}{M} \quad (12)$$

Onde:

P = potência dissipada

P_o = potência nominal da carga

M = número de ciclos do período total de controle

m = número de ciclos **ON** da carga

Considerando um número total de dez ciclos, a potência dissipada pela carga poderá ter 10 degraus distintos, de 0 a 100% conforme mostra a figura 12.

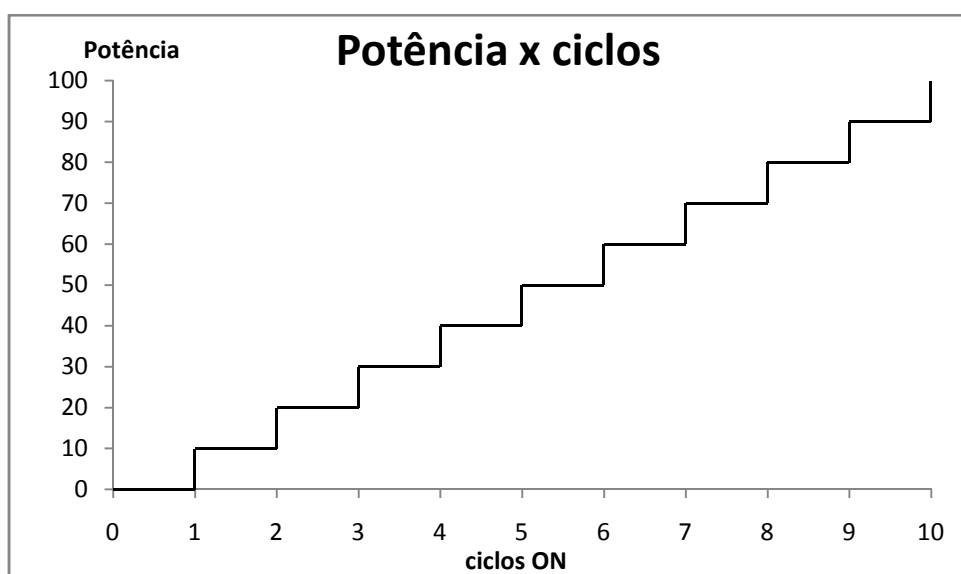


Figura 12: Degraus de potência usando ciclos inteiros

3.5 Circuitos de controle de ciclos inteiros

Diversos circuitos de comando podem ser empregados para produzir o efeito de controle por ciclos inteiros, os mais comuns são opto acopladores com detecção de passagem por zero, também encontram-se circuitos analógicos dedicados e microcontroladores, sendo que estes últimos também possuem famílias dedicadas a controles por passagem por zero.

Obviamente uma otimização do controle por ciclos inteiros é muito mais fácil e prático utilizando microcontroladores, pois algoritmos de controle podem ser facilmente implementados de forma a minimizar variações de temperatura entre os ciclos **ON** e os ciclos **OFF**.

3.5.1 Circuitos de controle analógicos

Circuitos de controle analógicos, tais como opto acopladores com detecção de passagem por zero, ou mesmo circuitos específicos para controles por ciclos inteiros são comuns e facilmente encontrados no mercado, tais como os MOC3031, TLP161, CA3059, SL441, T2117, UAA2016, dentre outros.

O princípio de funcionamento destes controladores é relativamente simples, todos possuem obrigatoriamente uma entrada de sincronismo que monitora constantemente as condições da rede de entrada, circuitos temporizadores, geradores de rampa, e demais subsistemas necessários, dependendo de cada fabricante.

Basicamente, um CI como o T2177 possui uma etapa de sincronismo é aplicada a um gerador de rampa, sendo que o período desta rampa será o intervalo de tempo especificado definido como o máximo número de ciclos que serão controlados antes de um novo período.

A saída desta rampa é comparada ao valor do potenciômetro de ajuste, que ativa um estágio de disparo assim que o valor ajustado é atingido pela rampa, causando o disparo de uma carga, como um tiristor por exemplo.

Diversos outros subsistemas podem ser inclusos, de forma a melhorar o desempenho ou dar maior mobilidade para o controle, como conversores analógico digitais, contadores, amplificadores, filtros, entre outros, dependendo de cada fabricante e das características de cada modelo de controlador projetado, conforme pode ser visto na figura 13.

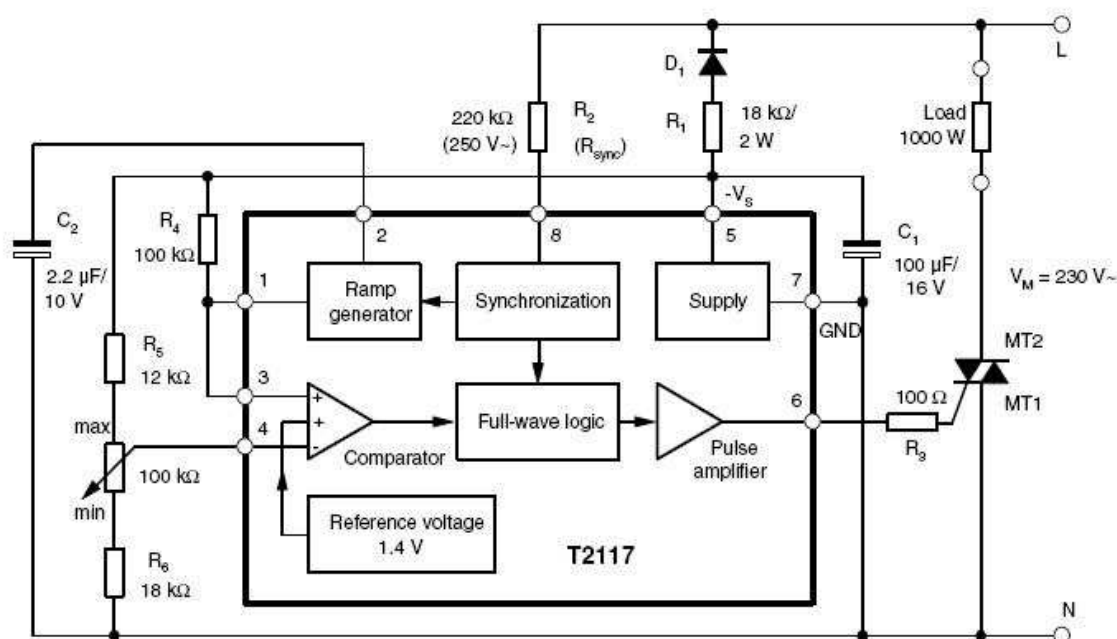


Figura 13: Controle analógico utilizando CI T2177. Fonte: application notes do fabricante

Com ajuste externo, o usuário controla qual o percentual de ciclos irão ser liberados para a carga, dentro do período de tempo estipulado para cada aplicação, que é o fator mais crítico na escolha de controladores analógicos, pois não é fácil nem eficiente a alteração do período de controle para minimização do efeito **Flicker**.

3.5.2 Circuitos de controle microcontrolados

Circuitos com microcontroladores podem ser dos mais diversos para efetuar o controle de tiristores por ciclos inteiros, dependendo das características do micro controlador empregado, do software e dos componentes externos.

Quanto mais elaborado o microcontrolador, ou quanto mais voltado a este tipo de aplicação, menos componentes externos são necessários para realização de um controle por ciclos inteiros. A habilidade do programador também influencia em muito na elaboração de um projeto deste tipo, uma vez que rotinas de sincronismo com a rede elétrica podem ser das mais diversas.

A velocidade do microcontrolador geralmente não é problema para este tipo de aplicação, tendo em vista que a frequência da rede elétrica é muito inferior à frequência de operação destes microcontroladores.

Algoritmos de otimização podem ser testados e empregados, visando uma melhor “distribuição” dos ciclos dentro do período total de controle, que para este tipo de circuito, também pode variar de forma a melhor diminuir o efeito de oscilações na temperatura e mesmo o efeito Flicker na rede elétrica.

Existem, inclusive, microcontroladores com portas específicas que podem servir para a monitorização da passagem por zero da rede elétrica para emprego em controles por ciclos inteiros por exemplo, tais como o PIC12C508, com este recurso é possível projetar um sistema de controle utilizando pouquíssimos componentes externos.

Um exemplo prático de controle utilizando microcontroladores pode ser visto na figura 14, onde um microcontrolador PIC10F204 é utilizado.

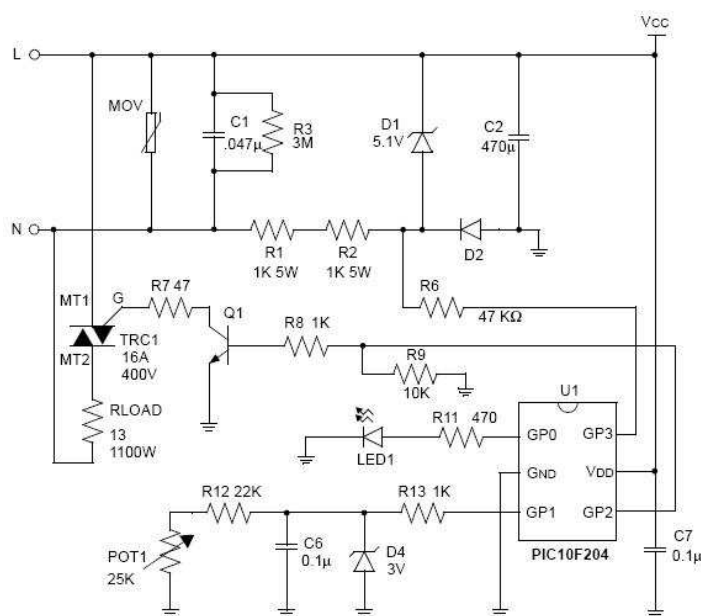


Figura 14: Controle digital utilizando CI PIC10F204. Fonte: application notes do fabricante

Neste tipo de controle, o hardware tem sua importância muito menor do que nos tipos analógicos. O software, nestes casos, é o diferencial entre cada projeto, pois as rotinas de otimização podem ser das mais diversas, dependendo da necessidade de cada projeto e sua aplicação.

Para este tipo de circuito, o valor do hardware quando produzido em grande escala (acima de 10.000 unidades) se torna relativamente baixo, algo em torno de R\$5,00.

4 Análise de harmônicas

A seguir serão apresentados exemplos para análise das componentes harmônicas em circuitos de chuveiros residenciais, em rede de 60Hz, comparando controles por mudança de ângulo de disparo e controles por ciclos inteiros. Porém, para estas análises presume-se num primeiro momento que a carga está ligada a uma rede elétrica cuja tensão é estável e não oscila com o acionamento da carga, já num segundo momento simula-se uma rede elétrica real, com impedância de $0,4+j0,3\Omega$, impedância esta também utilizada em outras publicações, como visto em JÚNIOR, CLAUDIO JOSÉ DE OLIVEIRA, Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semi ciclos otimizado, São Paulo, 2006.

4.1 Análise de controle por ângulo de fase considerando fonte ideal

Circuitos como o descrito na figura 15 são extremamente comuns em nossas residências em equipamento de controle, seja para controle de chuveiros e torneiras elétricas, seja para controle de iluminação, ventiladores de teto, entre outros.

Seu funcionamento é simples e é de fácil implementação aos dispositivos que se deseja controlar, sendo inclusive encontrado à venda em módulos específicos para controle de iluminação onde há uso de lâmpadas incandescentes.

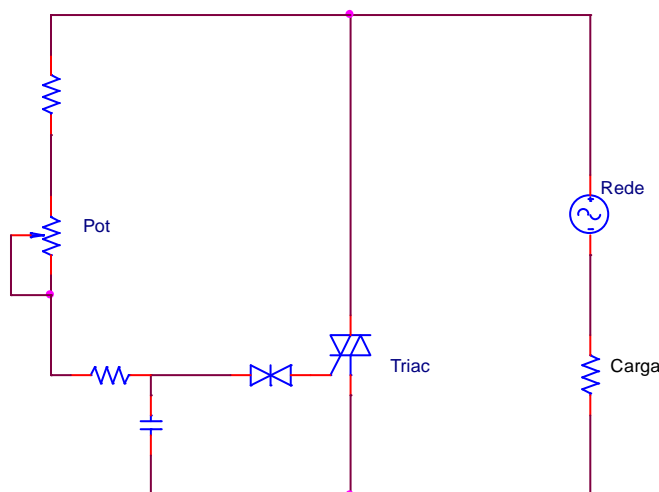


Figura 15: Circuito comum, para controle de ângulo de fase

Este tipo de circuito, dada sua simplicidade e relativa robustez, é largamente utilizado nas mais diversas cargas, como as já descritas, porém é causador de valores significativos de harmônicos em nossa rede elétrica.

Considerando uma carga de 6600W, um chuveiro típico de localidades mais frias, estando com 99° como valor de ângulo de disparo α (40% de potência) tem-se as formas de onda de tensão e corrente da rede mostradas na figura 16.

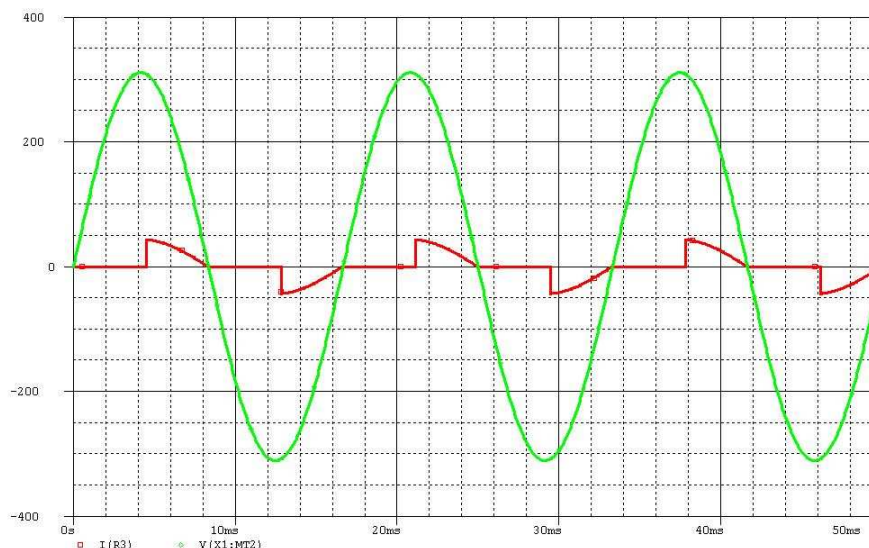


Figura 16: Simulação, 40% de 6600W, controle por ângulo de fase

Nota-se que a tensão de entrada (em verde) não se altera, em virtude de nossas considerações serem de fonte ideal, porém é facilmente perceptível a forte distorção na corrente (em vermelho), esta distorção é quantificada pela análise de Fourier, utilizando a simulação via software computacional, e mostrada abaixo:

- Para tensão: THD = 0,000385%
- Para corrente: THD = 70,14%

Esta corrente com alta THD é drenada da rede e pode causar os mais diversos efeitos como já comentado, sendo que a análise de Fourier para as 13 primeiras harmônicas pode ser visto na tabela 3, onde apenas as harmônicas de ordem ímpar são mostradas, tendo em vista a simetria entre os períodos de comutação no semi ciclo positivo e negativo.

Tabela 3: Resultado da simulação, 40% de 6600W, controle por ângulo de fase

Harmônica	Componente (A)
1	22,97
3	13,71
5	4,84
7	4,43
9	2,97
11	2,59
13	2,15

Percebe-se que as ordens das harmônicas são baixas, o que torna mais difícil de atenuá-las utilizando filtros passivos. Na figura 17 podemos observar a representação gráfica da série de Fourier para este caso, onde percebe-se mais expressivamente a ocorrências das harmônicas e suas respectivas amplitudes e ordens.

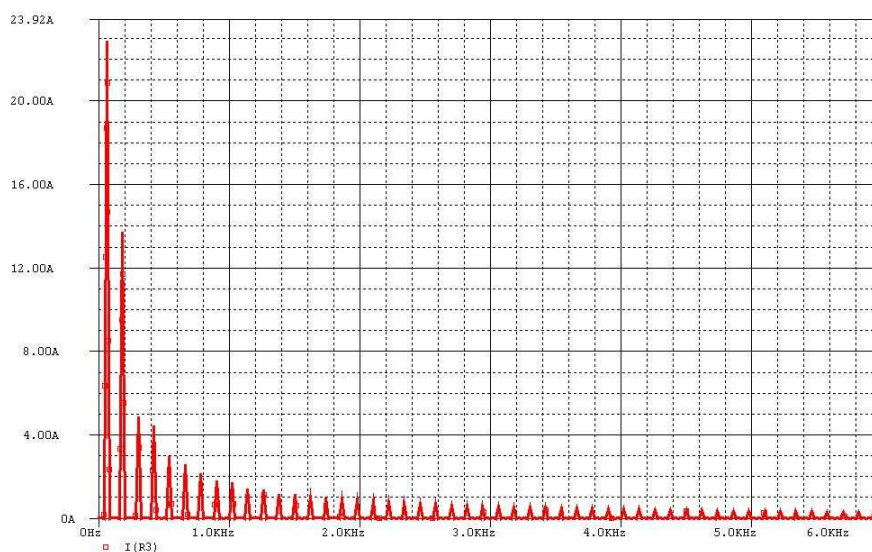


Figura 17: Fourier para 40% de 6600W, controle por ângulo de fase

Na figura 18, temos uma comparação dos dados de simulação com a norma IEC61-0000, pode-se facilmente perceber o quanto fora da norma encontra-se este equipamento.

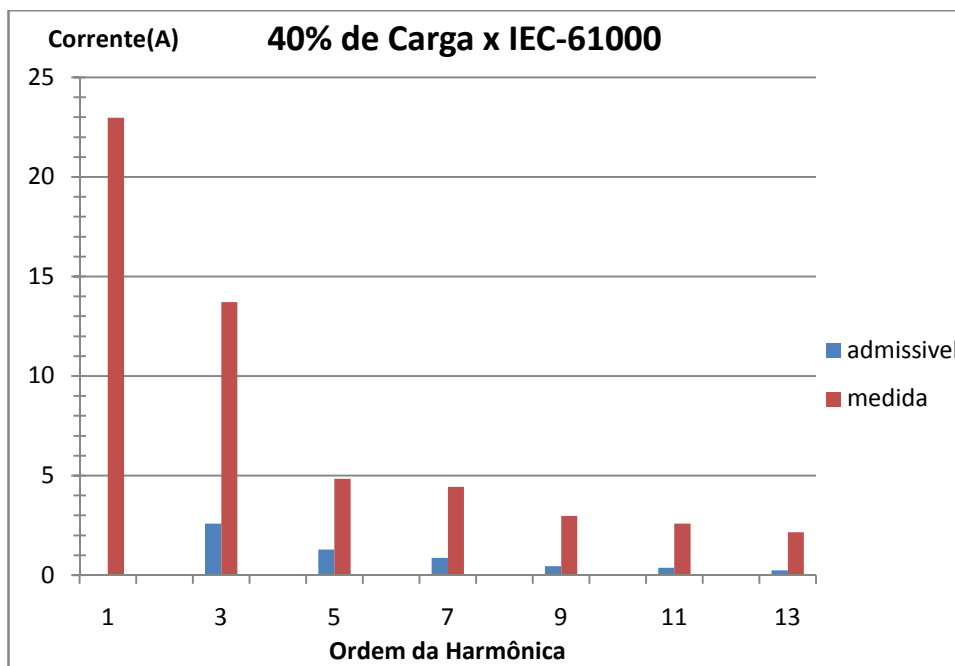


Figura 18: Comparação da simulação com 40% de carga e norma IEC-61000

Quando um percentual maior da tensão de entrada é aplicado na mesma carga, como por exemplo 60° de ângulo α (80% de potência), temos um resultado que pode ser visto na figura 19, onde uma parcela maior de cada semi ciclo é aplicado à carga.

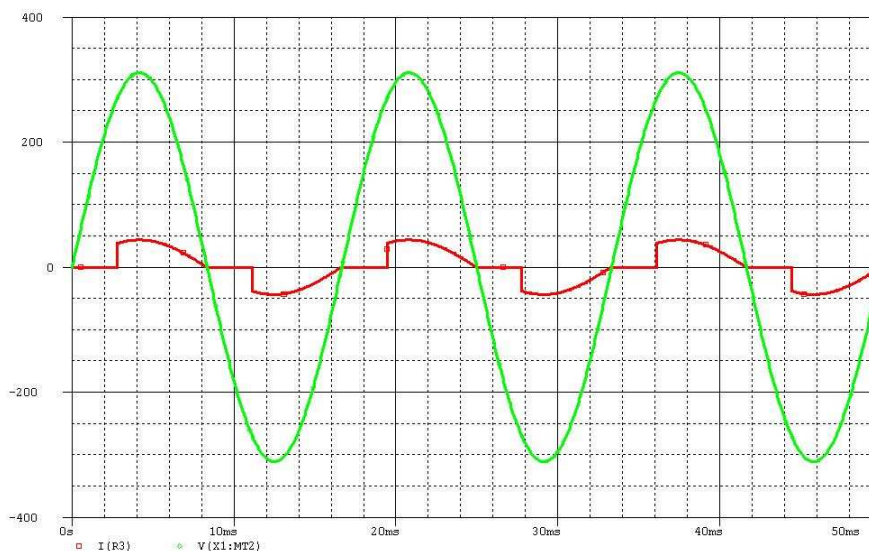


Figura 19: Simulação, 80% de 6600W, controle por ângulo de fase

Como um percentual maior da forma de onda é aplicada à carga, seria de se esperar uma redução nos valores das distorções, sendo que de acordo com análise de Fourier, as distorções totais de corrente caíram pela metade, conforme visto abaixo:

- Para tensão: THDS = 0,00117%
- Para corrente: THD = 36,56%

Como a carga é alimentada por uma parcela maior do semi ciclo, isto que reduz o valor das harmônicas drenadas da rede, e, quanto mais próximo de 100% do ciclo é aplicado na carga, menor será o valor das harmônicas geradas.

Para 80% do valor da onda aplicada na carga, utilizando o mesmo método de decomposição por Fourier, obtemos os valores mostrados na tabela 4.

Tabela 4: Resultado da simulação, 80% de 6600W, controle por ângulo de fase

Harmônica	Componente (A)
1	36,59
3	10,52
5	6,02
7	3,00
9	2,79
11	2,41
13	1,72

Da mesma forma, podemos observar através da figura 20 a redução das componentes harmônicas de corrente para este caso, nota-se que a componente fundamental encontra-se com um percentual muito mais elevado frente às componentes harmônicas.

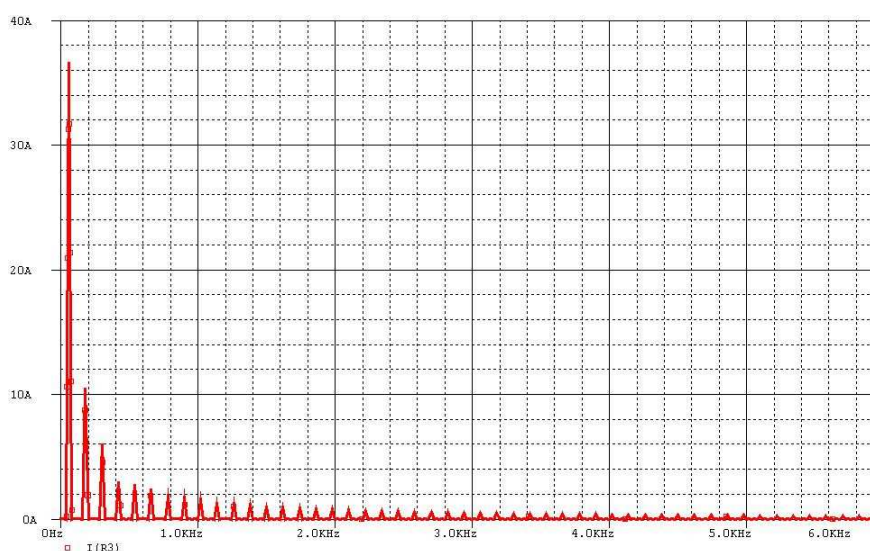


Figura 20: Fourier para carga à 80%, controle por ângulo de fase

Na figura 21, temos a comparação dos dados de simulação com a norma IEC61-0000 para este caso, pode-se facilmente perceber o quanto fora da norma

encontra-se este equipamento, mesmo tendo uma THD total muito melhor do que a 40% de carga.

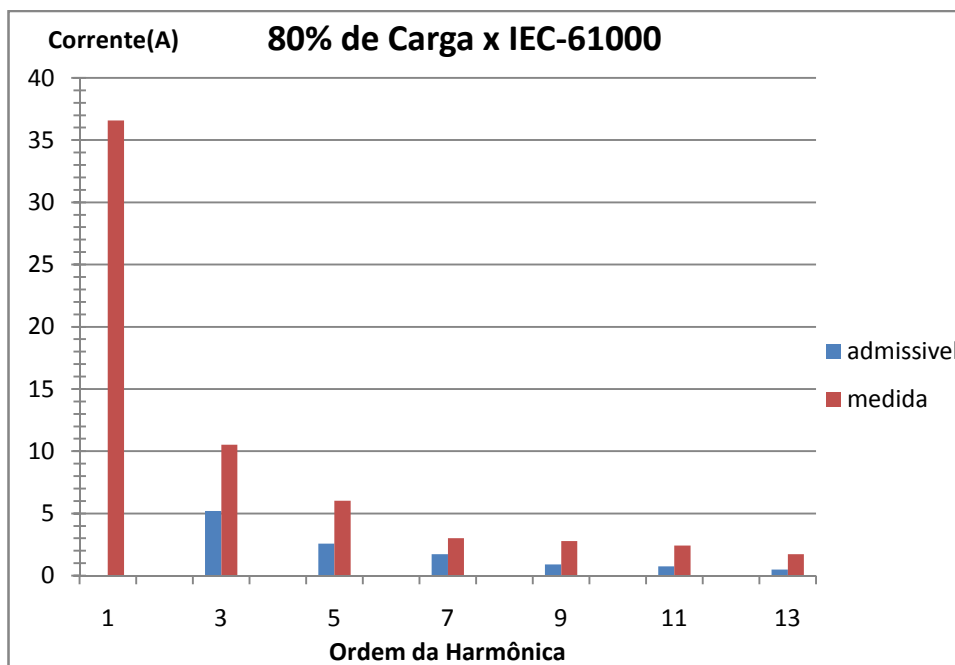


Figura 21: Comparação 80% com a norma IEC-61000, ângulo de fase.

4.2 Análise de controle com ciclos inteiros considerando fonte ideal

Já para ciclos inteiros, diversas formas de efetuar o controle da carga podem ser experimentadas, principalmente se no projeto estiver sendo utilizado microcontroladores, que tornam muito mais dinâmica a forma de efetuar os disparos, tendo em vista a fácil mudança do tempo de cada período de controle.

Desta forma, a habilidade do programador está diretamente relacionada com a eficiência deste tipo de controle, tanto para minimizar a percepção do usuário no que se refere a temperatura da água, quanto a percepção da rede elétrica, que sensibilizaria lâmpadas incandescentes por exemplo, entre os ciclos ON e OFF, ou seja, o chamado efeito **Flicker**.

O comportamento das harmônicas não é afetado utilizando ciclos inteiros, portanto não se faz necessário o uso de algoritmos de otimização no que se refere ao efeito **Flicker**, tendo em vista que estes algoritmos servem apenas para refinamento no que se refere a sensibilidade no efeito **Flicker** e da percepção de mudanças de temperatura da água pelo usuário.

Como efeito de comparação será apresentado a análise harmônica de uma mesma carga de 6600W, em 40% e 80% do valor nominal, utilizando simulação computacional, cujo diagrama é mostrado na figura 22, onde V1 é a rede elétrica, e V2 o circuito de disparo do triac.

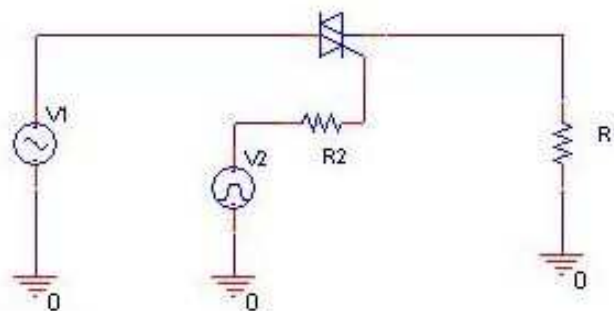


Figura 22: Circuito básico para simulações

Para 40% da potência nominal, usando um período de controle de 0,5s(30 ciclos), tem-se 0,2s de período ON (12 ciclos) sendo as formas de onda vistas na figura 23, para corrente e tensão, onde em verde a tensão da rede e em vermelho a corrente da rede.

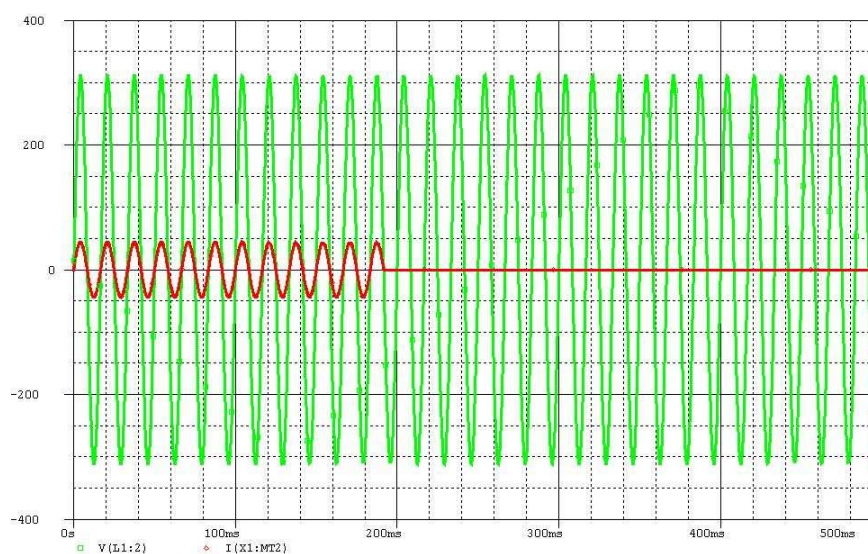


Figura 23: Simulação, 40% de 6600W, ciclos inteiros

De acordo com a simulação, a TDH para tensão e corrente são:

- Para tensão: THD = 0,022%
- Para corrente: THD = 0,078%

Percebe-se uma mudança radical quanto ao uso de 40% da carga utilizando controle por ângulo de disparo e por ciclos inteiros. Não são geradas harmônicas na rede, o que faz com que sob este aspecto este controle seja muito menos prejudicial ao sistema elétrico e demais cargas alimentadas no mesmo sistema.

Uma decomposição em série de Fourier nem se faria necessária, tendo em vista os valores tão baixos da somatória das componentes harmônicas, porém vê-se na tabela 5 as 13 primeiras harmônicas ímpares de corrente para este exemplo.

Tabela 5: Resultado da simulação, 40% de 6600W, ciclos inteiros

Harmônica	Componente (A)
1	43,70
3	0,057
5	0,04
7	0,027
9	0,019
11	0,016
13	0,014

Na figura 24 pode ser observado o gráfico da análise de Fourier para este caso, onde é visível a ausência de harmônicos.

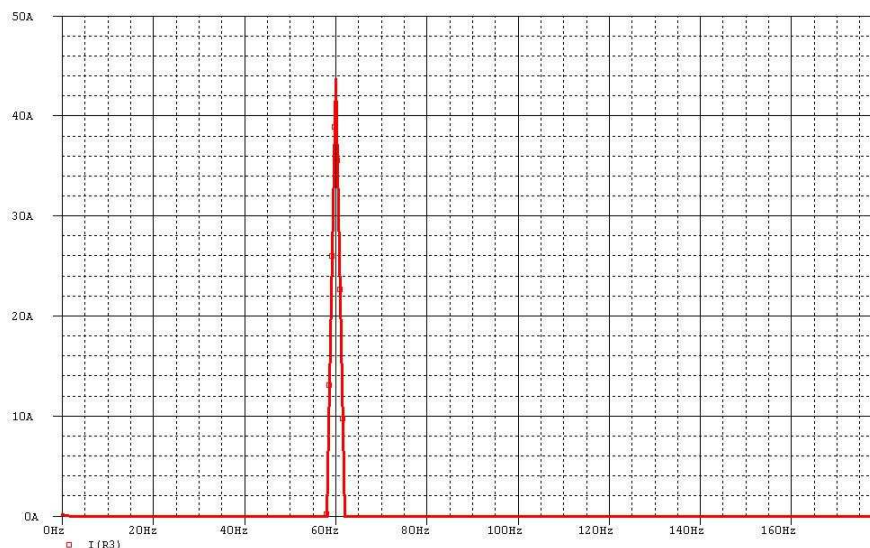


Figura 24: Fourier para 40% de 6600W, controle por ciclos inteiros

Na figura 25, temos a comparação entre o controle de ciclos inteiros usando 40% da carga e a norma IEC-61000, onde se percebe facilmente o atendimento desta em todas as componentes harmônicas.

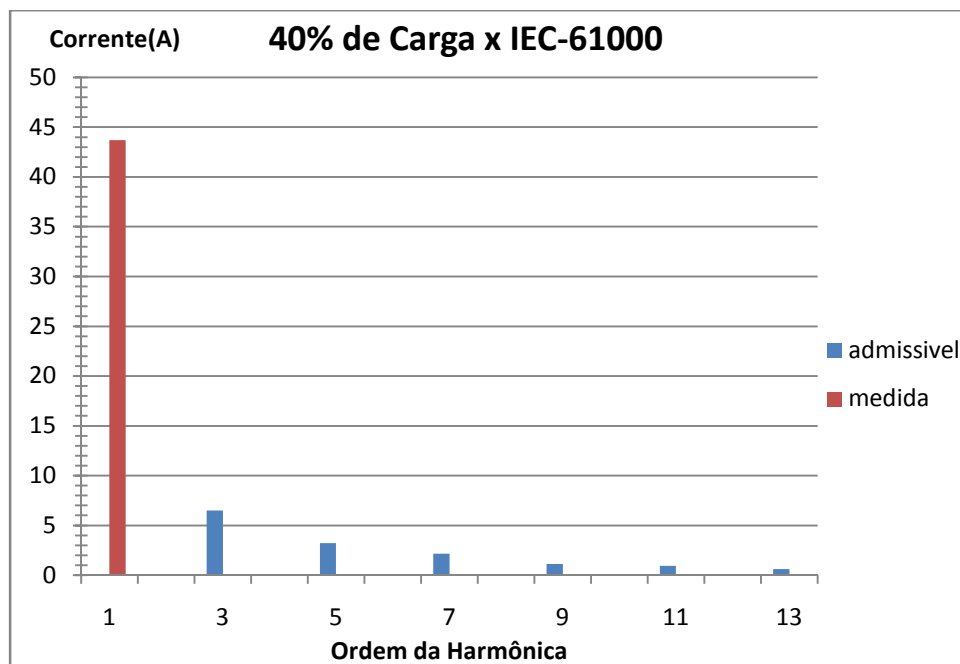


Figura 25: Comparação 40% com IEC-61000

Para carga a 80%, pode-se apenas aumentar o tempo ON para 24 ciclos de um período total de 30 ciclos, ou pode-se implementar rotinas em microcontroladores, capazes de alterar o período total, conforme já foi falado anteriormente, como forma de minimizar os efeitos das transições ON e OFF. Assim, para 80% temos as formas de onda como vistas na figura 26.

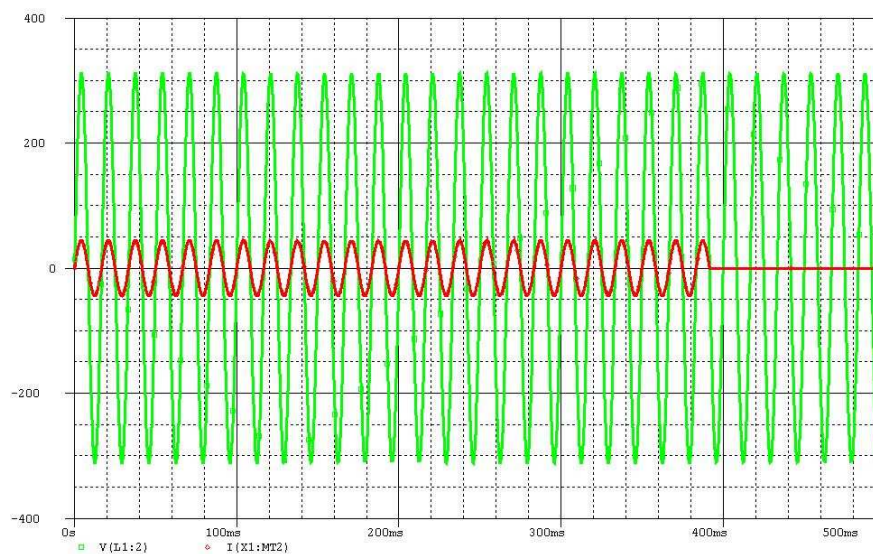


Figura 26: Simulação, 80% de 6600W, ciclos inteiros, 24 ciclos ON de 30 ciclos

Conforme mostrado abaixo, a distorção harmônica total não se altera para períodos de controle diferentes, pois o método de controle por ciclos inteiros não gera harmônicas, independente dos períodos de controle:

- Para tensão: THD = 0,04%
- Para corrente: THD = 0,076%

Percebe-se pouca diferença entre utilizar 40% ou 80% da potência, diferentemente do controle por ângulo de disparo, que quanto mais próximo de 100% da carga menos harmônicos eram inseridos na rede, o que faz este controle enquadrar-se dentro das normas em toda sua faixa, podendo ser utilizado em qualquer condição de carga sem inserir harmônicos na rede elétrica.

A decomposição por série de Fourier para este caso é mostrada na tabela 6, onde pode facilmente ser visto que para nenhuma das componentes é necessário a implementação de filtros ou artifícios para atenuação de harmônicos.

Tabela 6: Resultado da simulação, 80% de 6600W, ciclos inteiros

Harmônica	Componente (A)
1	45,5
3	0,05
5	0,033
7	0,026
9	0,021
11	0,016
13	0,012

O gráfico da decomposição em Fourier para 80% de carga, utilizando ciclos inteiros pode ser observado na figura 27, onde pela decomposição percebe-se a ausência de componentes harmônicas, e a comparação entre esta análise e a norma IEC-61000 na figura 28, onde da mesma forma do que para 40% de carga não ocorre distorção harmônica para este método de controle.

No que se refere a IEC-61000 sob o ponto de vista de harmônicos, o controle por ciclos inteiros seria o ideal, se a o fornecimento também fosse ideal. Porém, para uma rede de fornecimento real outras considerações e aspectos devem ser considerados, como o efeito **Flicker** por exemplo.

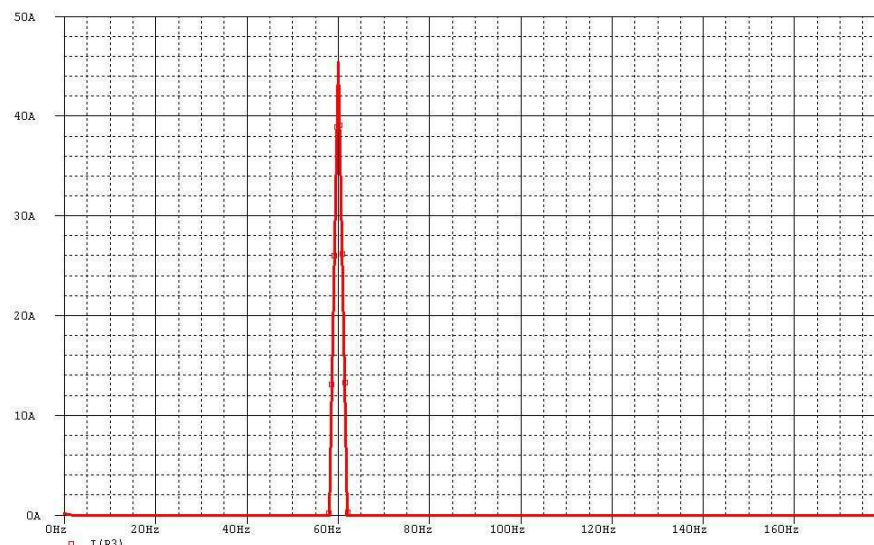


Figura 27: Fourier para 80% de 6600W, controle por ciclos inteiros

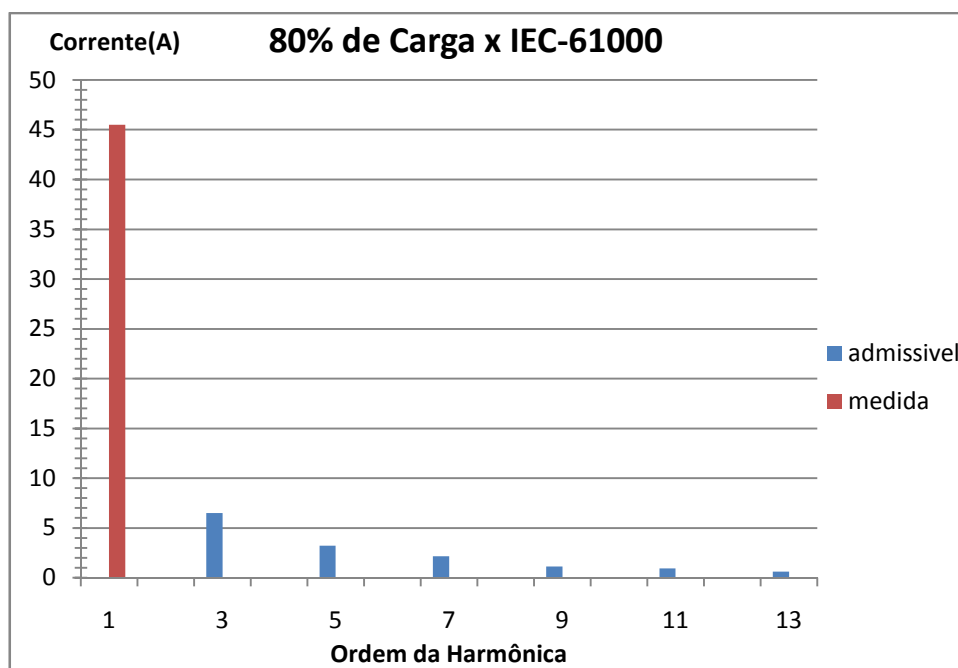


Figura 28: Comparação 80% com a IEC-61000, 80%, controle por ciclos inteiros, período de 0,5s, comutação de 0,2s

Salientando que o método de disparo, tempo dos ciclos e demais parâmetros são características de cada projeto, para cada finalidade, podendo incluir ou não algoritmos mais elaborados para minimização do efeito *Flicker*, e para a otimização do conforto ao usuário final, sendo que independente dos períodos de controle escolhidos o comportamento das harmônicas não se altera como ciclos inteiros.

4.3 Análise de controle por ângulo de fase considerando fonte real

Conforme já considerado, a impedância usada para a rede será de $0,4+j0,3\Omega$, sendo assim, a comutação de uma carga como a de um chuveiro típico, com potência na ordem de 6600W, deverá causar nesta rede uma ligeira queda de tensão, que poderá ou não ser percebida pelo usuário, dependendo dos demais fatores da sua instalação, sendo que de acordo com a IEC-61000, além da frequência desta oscilação, o fator queda de tensão também é fundamental para a percepção do efeito **Flicker** pelo usuário.

Com esta característica da rede elétrica, teremos então distorções não apenas na forma de onda da corrente, mas também da tensão, em decorrência do chaveamento desta carga num sistema contendo impedâncias típicas de qualquer instalação. A representação do circuito básico de controle e impedância da rede é mostrada na figura 29.

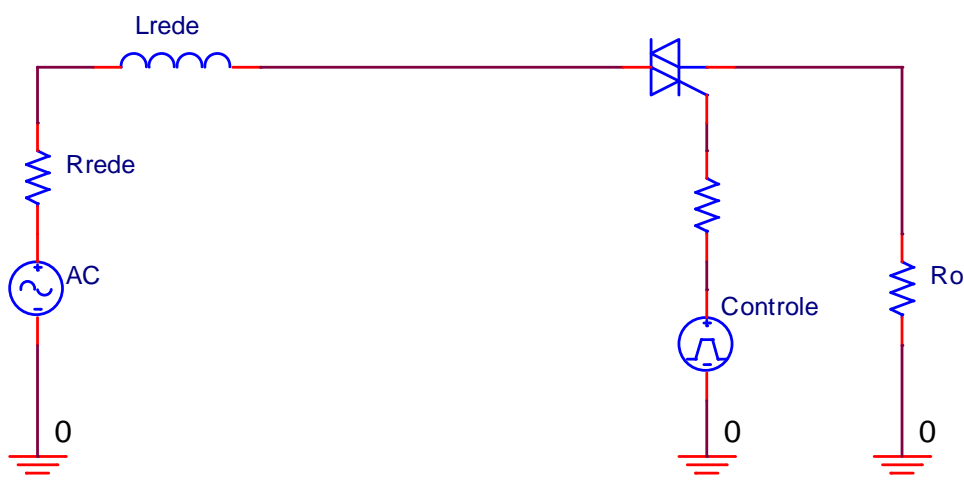


Figura 29: Circuito para simulação com impedância de $0,4+j0,3\Omega$

Sendo assim, para uma carga de 6600W, sendo controlada a 40%, ou seja, 2640W (α em aproximadamente 99°), utilizando-se método de controle por ângulo de fase, obtemos, por meio de simulação os resultados mostrados na figura 30.

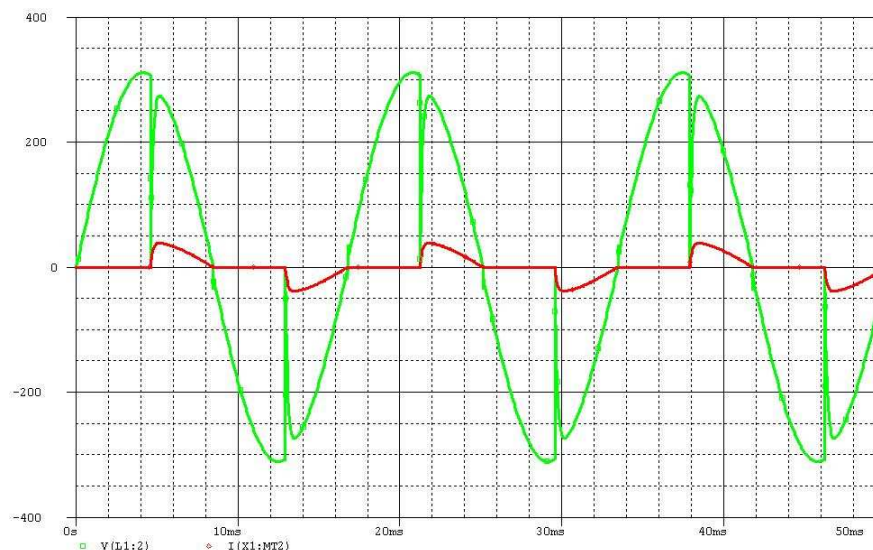


Figura 30: Simulação 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$, ângulo de fase

Percebe-se um grande aumento de distorção na forma de onda da tensão no momento da entrada da carga no sistema, o que anteriormente não era visível por considerarmos a rede como sendo ideal, desta forma temos as distorções totais através da análise de Fourier obtida por simulação:

- Para tensão: THD = 10,4%
- Para corrente: THD = 70,01%

Na tabela 7 podemos observar a decomposição da corrente drenada da rede para as componentes ímpares até a 13ª ordem, tendo em vista que as componentes pares são desprezíveis, pois a comutação ocorre simetricamente nos semi ciclos positivos e negativos, não gerando componentes DC na rede.

Tabela 7: 40% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$

Harmônica	Componente (A)
1	20,92
3	12,73
5	4,49
7	3,84
9	2,58
11	2,03
13	1,71

Nota-se na figura 30 que a distorção da tensão é bastante visível, com o valor total de 10,4%, sendo preocupante, pois a deformidade apresentada poderia causar mau funcionamento de outro equipamento na mesma rede

A forma de onda da corrente continua muito distorcida, e com várias componentes harmônicas, conforme pode ser visto na figura 31 onde é apresentada a decomposição desta corrente, visivelmente fora das normas e certamente podendo influir de alguma maneira, perceptível ou não, nos demais equipamentos nesta mesma instalação, conforme comparação com a IEC-61000 vista na figura 32.

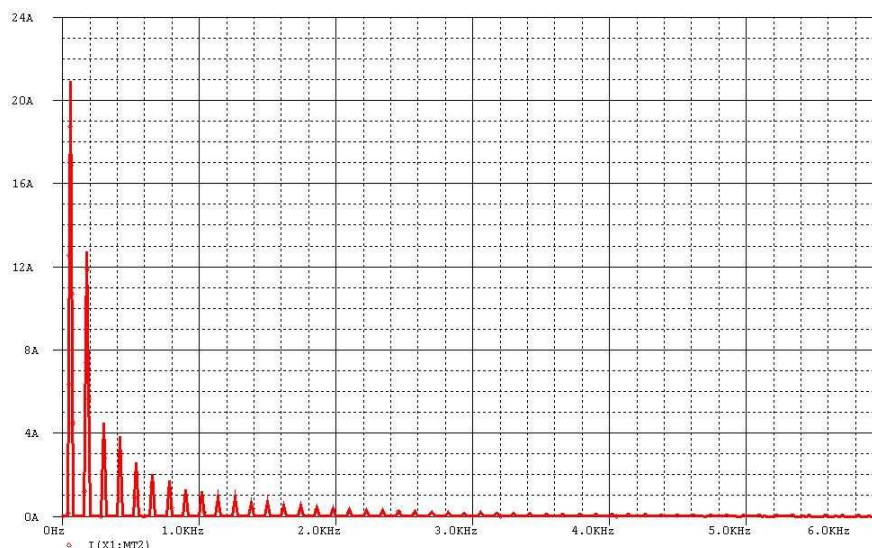


Figura 31: Fourier para 40% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$

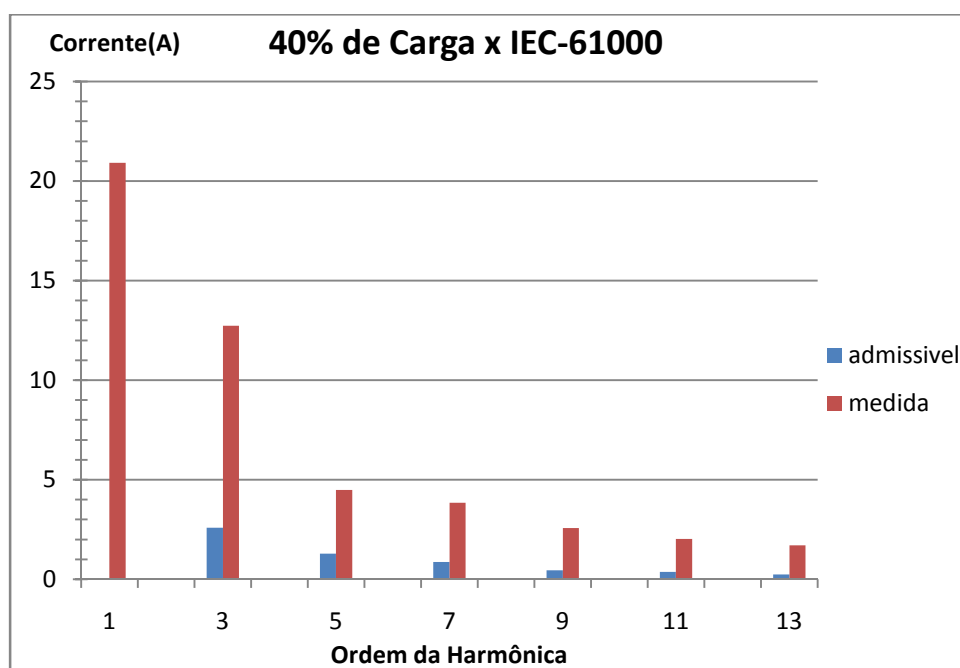


Figura 32: Comparação, 40% com a IEC-61000, ângulo de fase, rede $0,4+j0,3\Omega$.

Quando utilizamos os mesmos parâmetros para a situação de uso em 80% da carga, ou seja, com 5280W(usando α de 60°) de potência drenada da rede, a tendência do controle por ângulo de fase é reduzir o nível de harmônicos na rede, tendo em vista um maior aproveitamento da onda em cada semi ciclo, conseqüentemente reduzindo as distorções causadas, o que pode ser observado na figura 33, onde em verde é mostrada a forma de onda da tensão da rede, e em vermelho a corrente na carga

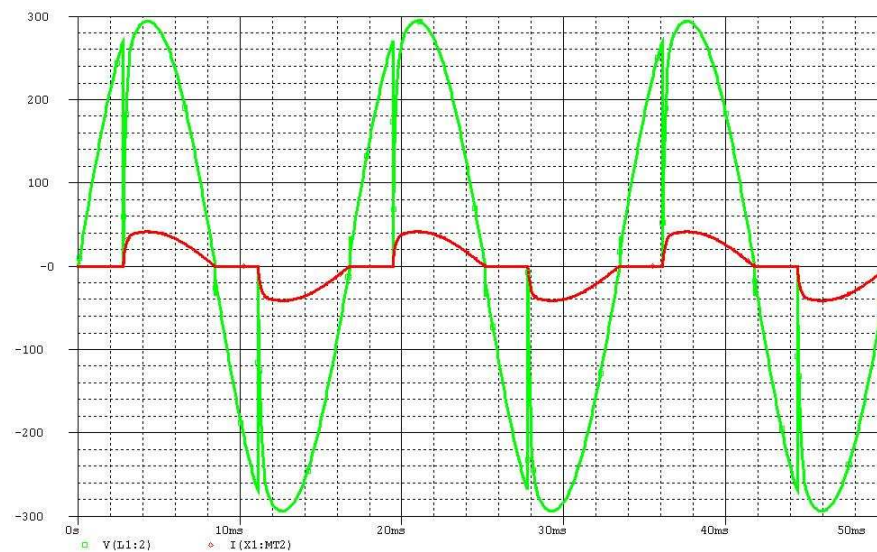


Figura 33: Simulação, 80% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$

Conforme percebido em simulação, a THD total para tensão, assim como para corrente tiveram uma forte redução, pelo fato de uma parcela significativamente maior do semi ciclo ter sido aplicado à carga, sendo os valores mostrados abaixo:

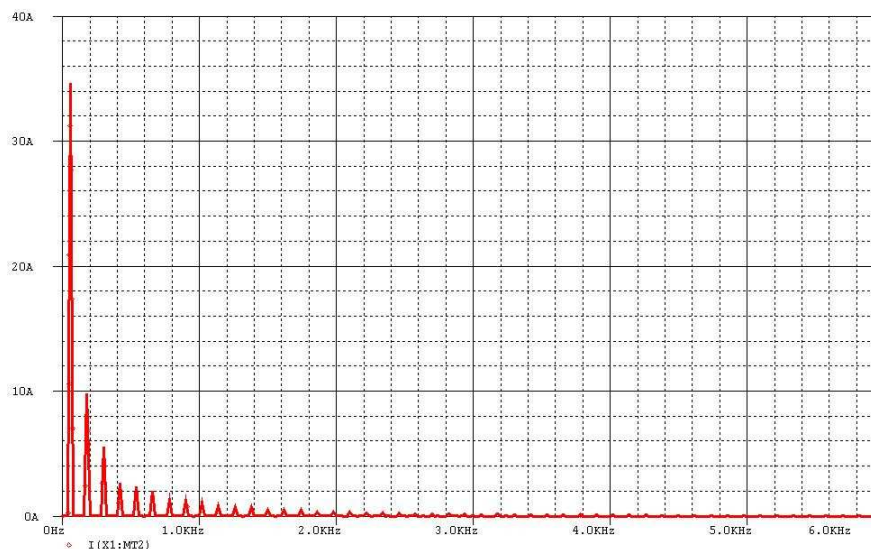
- Para tensão: THD = 6,46%
- Para corrente: THD = 35,14%

Nota-se que para a tensão ocorre uma melhora, em comparação ao sistema com 40% de carga, e uma grande melhora no valor da distorção total da corrente, porém ainda com valores altos de distorções, com fortes componentes harmônicos de corrente, apresentados na tabela 8.

Tabela 8: 80% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$

Harmônica	Componente (A)
1	34,63
3	9,81
5	5,53
7	2,63
9	2,35
11	1,98
13	1,31

A forte presença de componentes harmônicos de corrente para esta simulação é mostrada na figura 34, onde se percebe a presença de componentes de baixa ordem, assim como no sistema ideal, o que torna sua atenuação mais difícil de efetuar com filtros passivos.

**Figura 34:** Fourier para 80% de 6600W, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$

Sendo assim, na figura 35 podemos comparar estas componentes harmônicas com a norma IEC-61000, onde mais uma vez percebe-se facilmente o não atendimento desta com este tipo de controle.

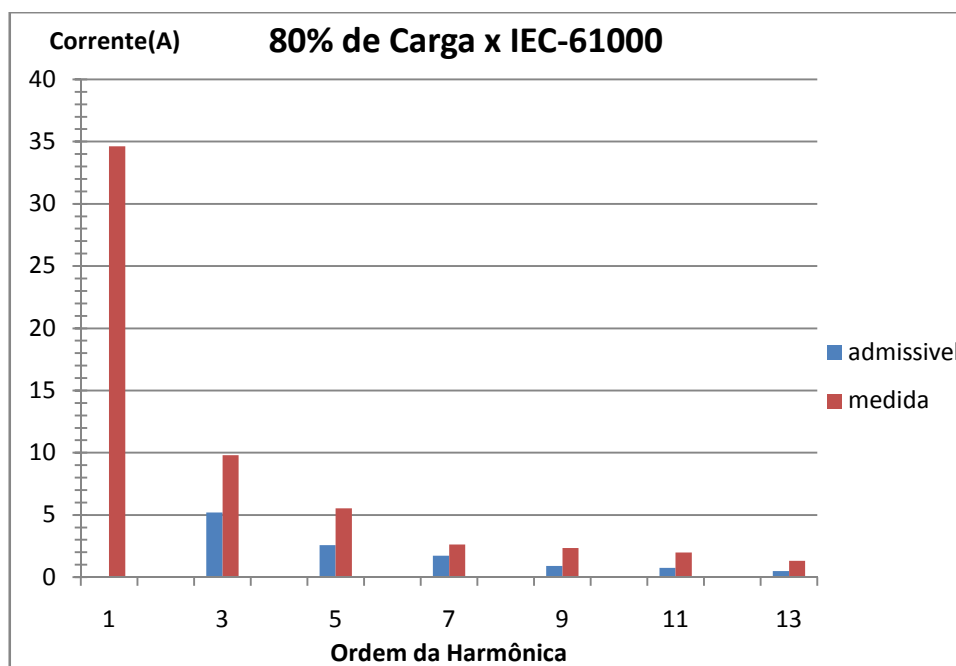


Figura 35: Comparação 80% com a IEC-61000, controle por fase, rede $0,4+j0,3\Omega$.

4.4 Análises da Comutação no Controle por Ângulo de Disparo Considerando Fonte Real

Quando introduzimos elementos de impedância da rede nas simulações, obtemos uma situação mais próxima à realidade que estes equipamentos são operados, distorções na forma de onda da tensão surgem em decorrência da queda de tensão no momento do chaveamento da carga.

De forma a tornar o efeito da comutação mais visível, é mostrado na figura 36 um semi ciclo apenas, onde pode-se observar o que ocorre no exato momento da comutação (corrente em vermelho) desta carga, em que a tensão da linha (em verde) sofre uma queda imediata de quase 18V, ou seja, quase 8% do valor nominal da entrada, se comparado com a forma de onda ideal (em azul)

Estes valores geralmente causam efeitos que o usuário seja capaz de perceber, e equipamentos mais sensíveis podem ser influenciados e podem deixar de funcionar ou ter seu funcionamento prejudicado em razão destas variações, tendo em vista que além de distorção em corrente, ocorre distorção da tensão da rede elétrica.

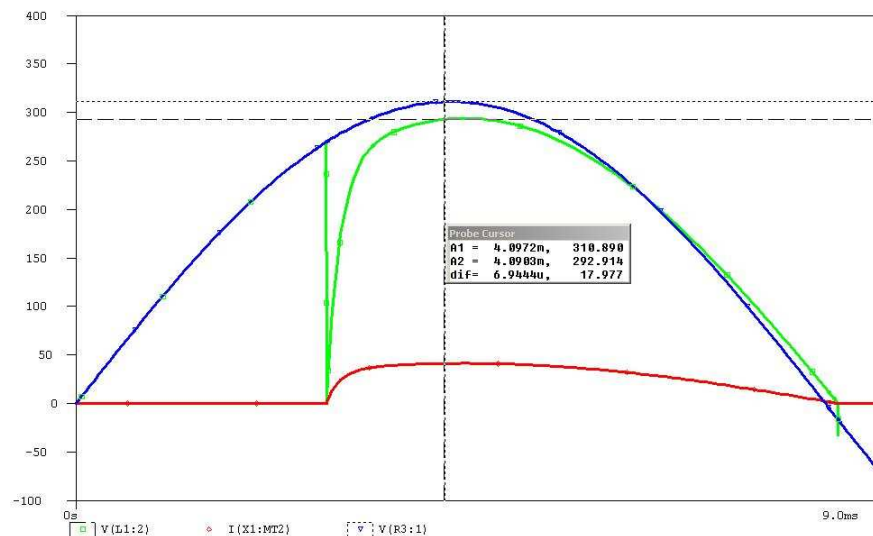


Figura 36: Detalhe do efeito da comutação

Uma forma de amenizar estes efeitos é o sobre dimensionamento da instalação, especialmente da rede de entrada como forma de reduzir a impedância série do sistema, tornando-o mais capaz de suprir a demanda da carga sem, no entanto ter o efeito de redução da tensão no barramento de entrada da instalação.

4.5 Análises de controle com ciclos inteiros considerando fonte real

Introduzindo elementos de impedância série na fonte de alimentação, obtivemos sensíveis mudanças nos resultados das simulações utilizando controle por ângulo de disparo, em decorrência do acionamento de uma alta carga fora do ponto zero da rede, o que causa distorções da tensão de entrada.

Como no método de controle por ciclos inteiros o disparo da carga é realizado no ponto de passagem por zero, não temos estes efeitos de distorção da forma de onda da tensão, porém, outro efeito, característico deste tipo de controle é percebido, que é o efeito **Flicker** conforme pode ser observado na figura 37, onde a carga é acionada por 12 ciclos a cada 30, ou seja, 40% de potência dissipada.

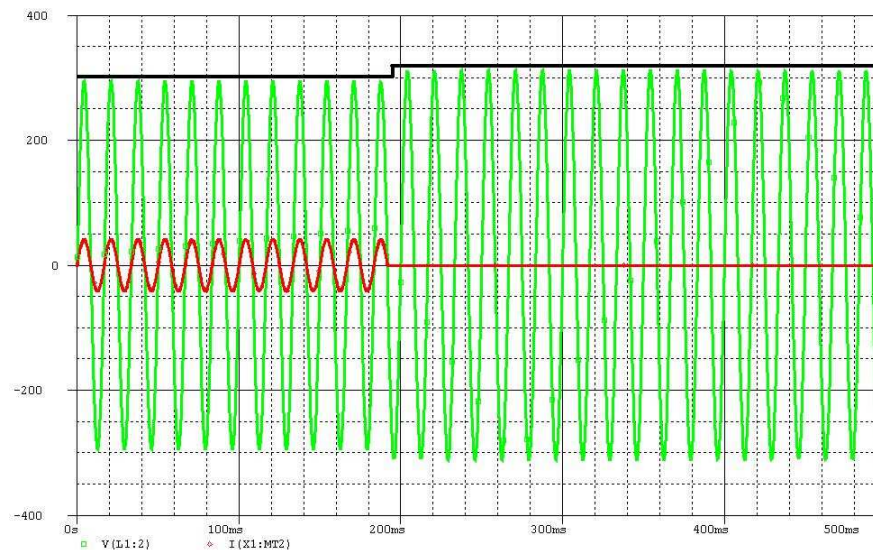


Figura 37: Comutação para 40% de 6600W, rede $0,4+j0,3\Omega$.

Nota-se que no momento da comutação, e durante toda a presença da carga no sistema, a tensão da rede teve uma queda considerável, de aproximadamente 16V porém sem distorcer sua forma de onda. Mas o efeito destas oscilações pode ser percebido em lâmpadas incandescentes, e equipamentos mais sensíveis podem ter seu funcionamento prejudicado.

No entanto, as distorções harmônicas totais permanecem dentro dos valores aceitáveis pelas normas, conforme podemos ver:

- Para tensão: THD = 0,001%
- Para corrente: THD = 0,007%

A decomposição da corrente desta simulação pode ser vista na figura 38, e mostra que não ocorrem harmônicos significativos no sistema.

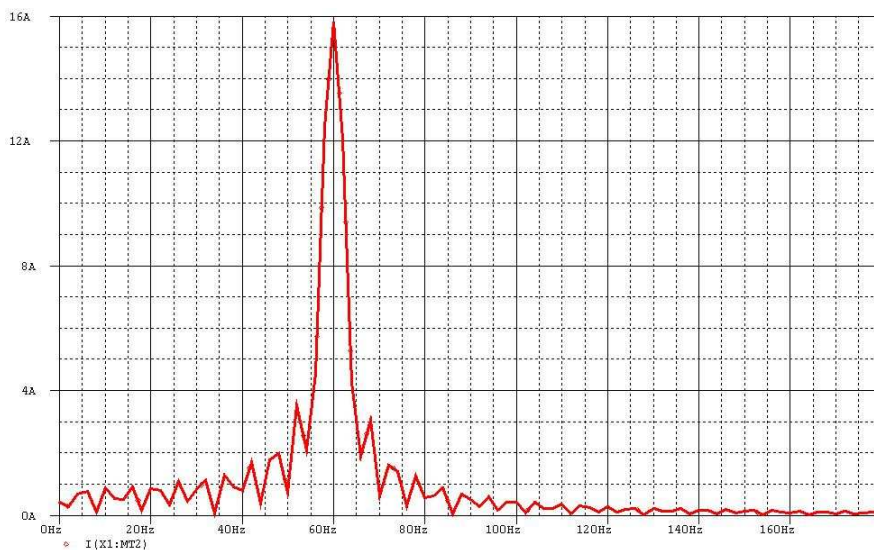


Figura 38: Fourier para 40% de 6600W, controle por ciclos, rede $0,4+j0,3\Omega$

Tendo em vista os valores totais de distorção para tensão e corrente para esta simulação, torna-se desnecessária comparação das componentes harmônicas com a norma IEC-61000 neste quesito, no entanto, a queda de tensão e frequência da oscilação quando é acionada a carga, em torno de 16Vpp com 2Hz, encontram-se acima dos valores da norma, tornando perceptível o momento de comutação, causando incomodo ao usuário sob forma de cintilamento da iluminação.

Conforme a norma IEC-61000, esta queda de tensão não deve ser superior a 7%, e com frequência acima de 30Hz para que não seja percebida pelo ser humano, o que torna este tipo de controle inadequado sob o ponto de vista do usuário, pois causa desconforto.

Já para 80% de uso da carga, com 24 ciclos ON num total de 30 ciclos, como efeito de comparação com o método de controle por ângulo de disparo, tem-se um maior tempo com ciclos ON, porém com a mesma queda de tensão e frequência de cintilamento, conforme pode ser visto na figura 39

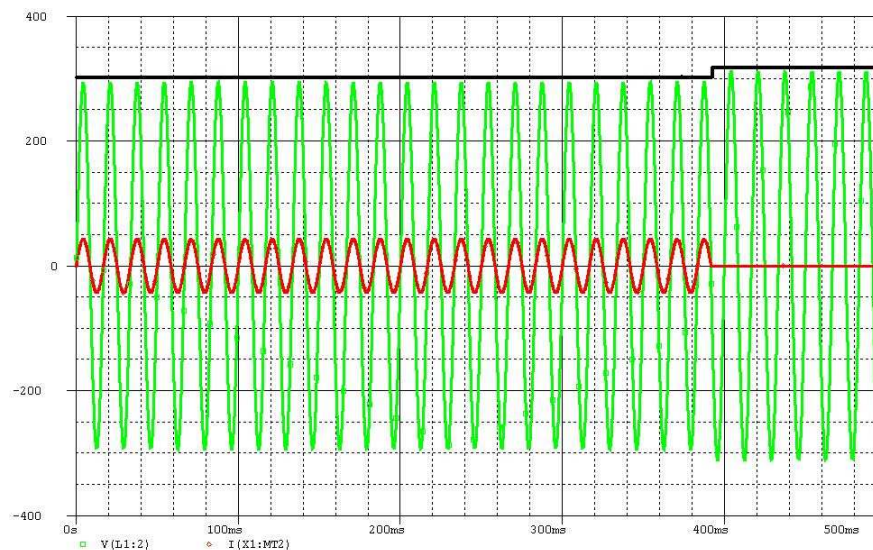


Figura 39: 80% de 6600W, controle por ciclos inteiros, rede $0,4+j0,3\Omega$

Para esta simulação temos os seguintes valores totais de distorção:

- Para tensão: THD = 0,0017%
- Para corrente: THD = 0,0078%

Apesar do acréscimo das características da rede, os valores de distorção permanecem muito baixos em relação ao método de ângulo de fase, e muito abaixo dos valores exigidos pelas normas. Porém o efeito **Flicker** permanece presente, pois para o período de comutação escolhido a frequência de comutação permanece em 2Hz e a queda de tensão em aproximadamente 16V.

Desta forma, devem ser elaborados métodos e algoritmos mais eficientes para se tentar melhorar o controle de cargas de alta potência de forma a minimizar estes efeitos.

4.6 Análise da comutação no controle por ciclos cnteiros considerando fonte real

O fato de não modificar a forma de onda da tensão e corrente, conseqüentemente não gerando harmônicos, não implica em ausência de efeitos danosos ao sistema de energia. Na figura 40, pode-se ver o comportamento aproximado da rede quando ocorre a comutação (em azul) da carga sob condições de 24 ciclos ON num total de 30 ciclos.

Nota-se na forma de onda de tensão(em verde) que existe uma variação de quase 16V entre os períodos ON e OFF, numa frequência de 2Hz, em desacordo com a IEC-61000, sendo este exemplo facilmente perceptível pelo usuário sob a forma de cintilamento da iluminação.

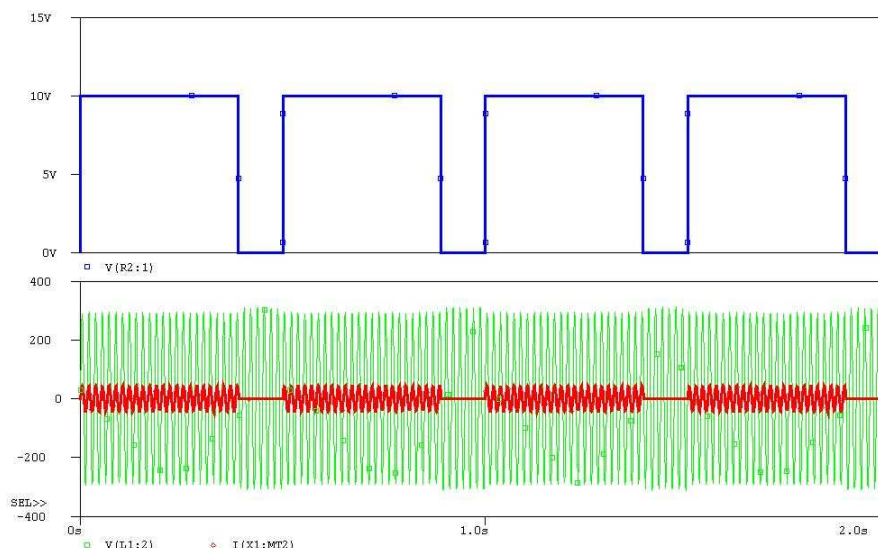


Figura 40: Comutação para 80%, em azul pulsos de comando, vermelho corrente na carga, verde tensão da rede com $0,4+j0,3\Omega$

4.7 Problemas do Uso de Controle por Ciclos Inteiros

Diversas seriam as vantagens de se usar controles por ciclos inteiros em cargas como chuveiros e torneiras elétricas, em especial se falando das distorções harmônicas causadas pela comutação deste tipo de carga por ângulo de fase.

Porém, este método de controle traz um sério problema, o efeito **Flicker**, que, a princípio poderia ser amenizado com a utilização de microcontroladores e algoritmos de controle eficientes e otimizados para tal tarefa, que são as variações da tensão da rede de entrada entre os períodos ON e OFF.

Como forma de amenizar estes efeitos, além de um bom sistema de fornecimento de energia, diversos períodos de chaveamento podem ser experimentados sem interferir por exemplo no valor total de acionamento da carga, tentando reduzir desta forma os efeitos perceptíveis da oscilação da rede e aumentando a estabilidade da temperatura da água.

Para exemplificar, com uma carga de 6600W, numa rede de 220Vrms, com valor de impedância série típica de aproximadamente $0,4+j0,3\Omega$, não se consegue chavear a carga de forma a minimizar o efeito **Flicker** sem com isso reduzir em muito a faixa de operação para poucos degraus de potência.

Como forma de demonstrar a dificuldade de reduzir o efeito **flicker** utilizando apenas algoritmos com outros períodos e tempos de comutação serão apresentados três diferentes períodos de comutação para obter uma mesma potência de 80% de dissipação na carga.

- Método 1: Utilizando períodos de 0,5s, ou seja 30 ciclos da rede(60Hz), teríamos que alimentar a carga por 24 ciclos e desconectá-la por 6 ciclos, o que ocasionaria em pulsos de 0,1s em intervalos de 0,5s, que pela IEC-61000 certamente são perceptíveis ao usuário e demais equipamentos conectados nesta rede, cujo resultado pode ser vista na figura 41.

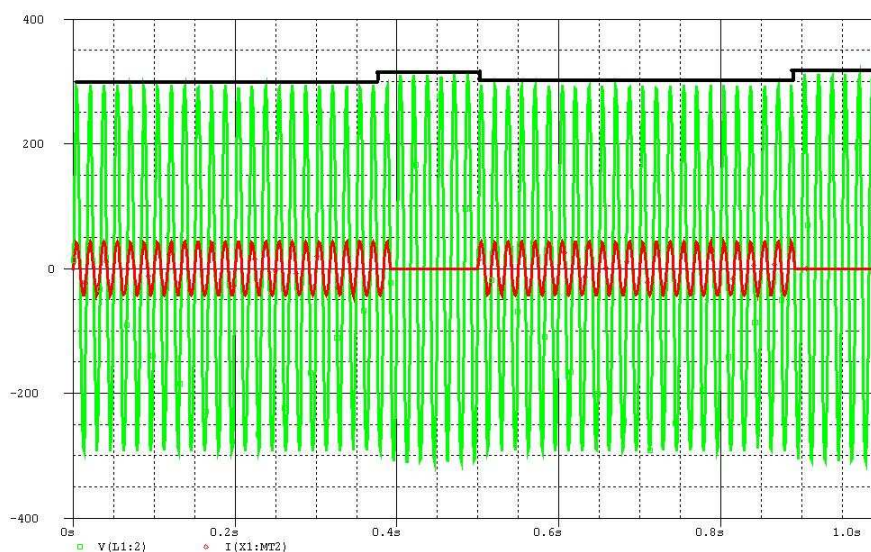


Figura 41: Flicker para 80% de 6600W, rede de $0,4+j0,3\Omega$, método 1

- Método 2: como forma de tentar atenuar tal situação, sem no entanto modificar a utilização da carga(80%), períodos menores podem ser utilizados, como por exemplo 0,25s, que resultaria em repetições a cada 15 ciclos da rede, sendo que destes, 12 ciclos estariam sendo transferidos para a carga. Nota-se que a frequência da repetição do controle é de 4Hz, mais rápido que o método anterior, que era de 2Hz(0,5s) porém conforme a IEC-61000 ainda

pode ser percebido e encontra-se fora da norma, mesmo tendo o dobro da frequência anterior, conforme visto na figura 42.

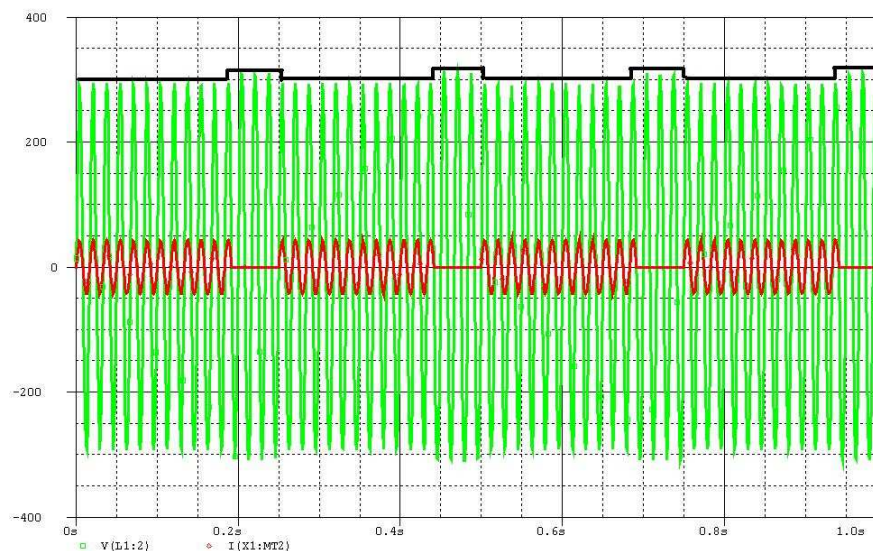


Figura 42: Flicker para 80% de 6600W, rede de $0,4+j0,3\Omega$, método 2

- Para se tentar reduzir ainda mais o efeito Flicker, pode ser utilizado um ciclo de controle com 5 pulsos da rede, onde cada pulso corresponde a 20% do valor total do período. Desta forma, obtêm-se um ciclo de controle com 12Hz, que para utilização de 80% da carga, 4 ciclos por vez são comutados para a carga, resultando numa variação muito menor e mais rápida entre os intervalos ON e OFF, conforme observa-se na figura 43, aumentando desta forma a estabilidade térmica do sistema e reduzindo significativamente os efeitos da variação da tensão da rede para o usuário e demais equipamentos, mas o efeito visual perceptível ao olho humano ainda presente conforme a IEC-61000.

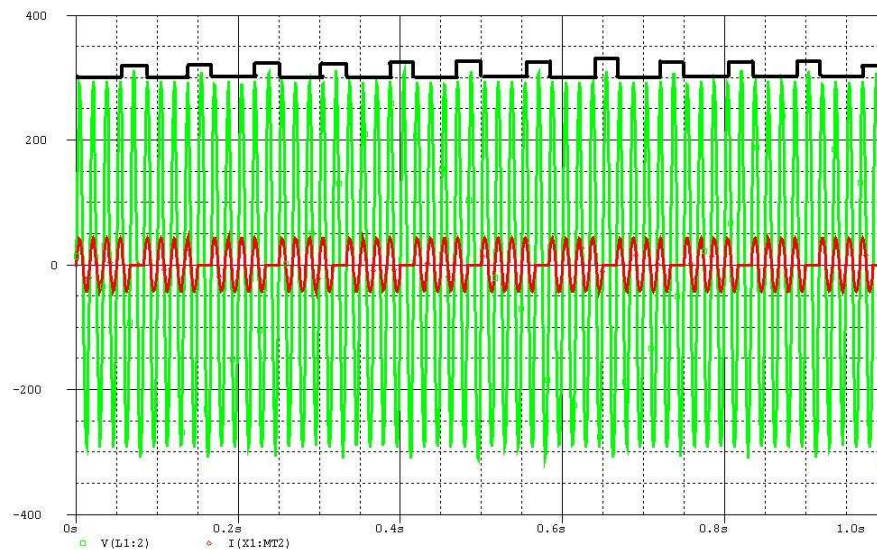


Figura 43: Flicker para 80% de 6600W, rede de $0,4+j0,3\Omega$, método 3

Porém, à medida que o intervalo de controle é diminuído, menor será a faixa de potências disponíveis para controlarmos a carga, observando que este tipo de controle é discreto e deve sempre se utilizar um ciclo inteiro.

5 Resultados Experimentais

Foram realizados experimentos com o objetivo de verificar o efeito *flicker*, estabilidade térmica e distorções harmônicas para comparação entre os métodos de controle por ângulo de fase e ciclos inteiros

Para o experimento foi utilizado um chuveiro elétrico da marca Thermosystem, de 6800W, instalado conforme as recomendações do fabricante nos laboratórios do Instituto Federal de Santa Catarina.

O circuito de controle utilizado, por ser protótipo, utiliza-se de opto isolador para isolação do sinal de sincronismo da rede e opto diac para isolamento do microcontrolador com o triac de acionamento da resistência do chuveiro, conforme pode-se observar no diagrama de blocos da figura 44, pois como trata-se de circuito protótipo e com caráter didático, a isolação torna-se necessária para maior segurança.

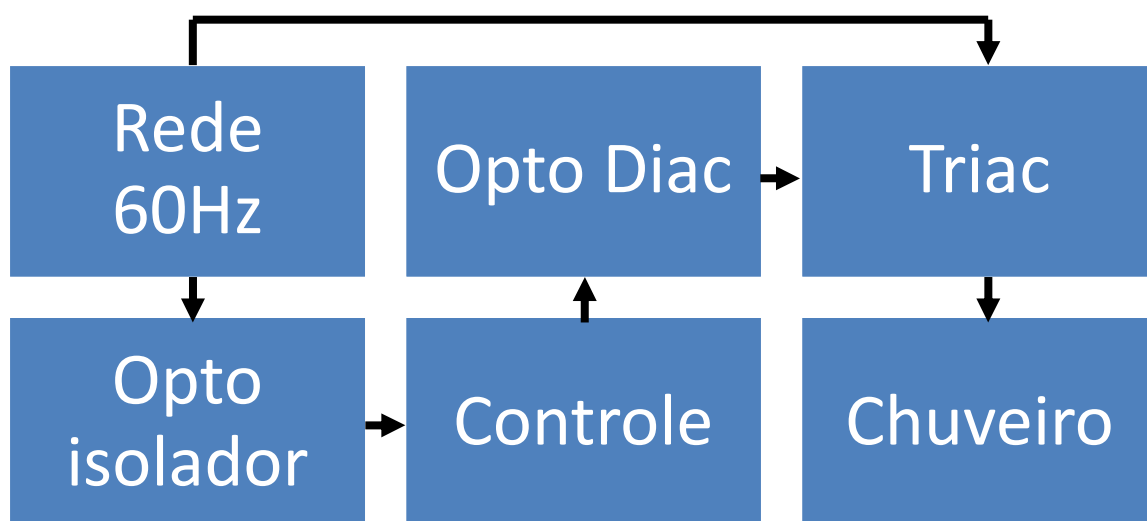


Figura 44: Diagrama de blocos do protótipo

O micro controlador utilizado para o experimento é o AT89C51, disponível nos laboratórios do IFSC, porém microcontroladores mais simples podem ser utilizados, como da família PIC como o já citado 10F204.

O circuito completo utilizado pode ser visto na figura 45, onde todas as ligações e componentes utilizados são mostrados para um melhor entendimento da estrutura montada para realização do experimento, e o diagrama de blocos do

algoritmo usado para o experimento é mostrado na figura 46, sendo o programa completo encontrado no ANEXO I.

Para a captura das formas de onda de tensão e corrente, foi utilizado osciloscópio com captura de tela, onde em azul escuro será representada a forma de onda da tensão, e em azul claro a forma de onda da corrente na carga.

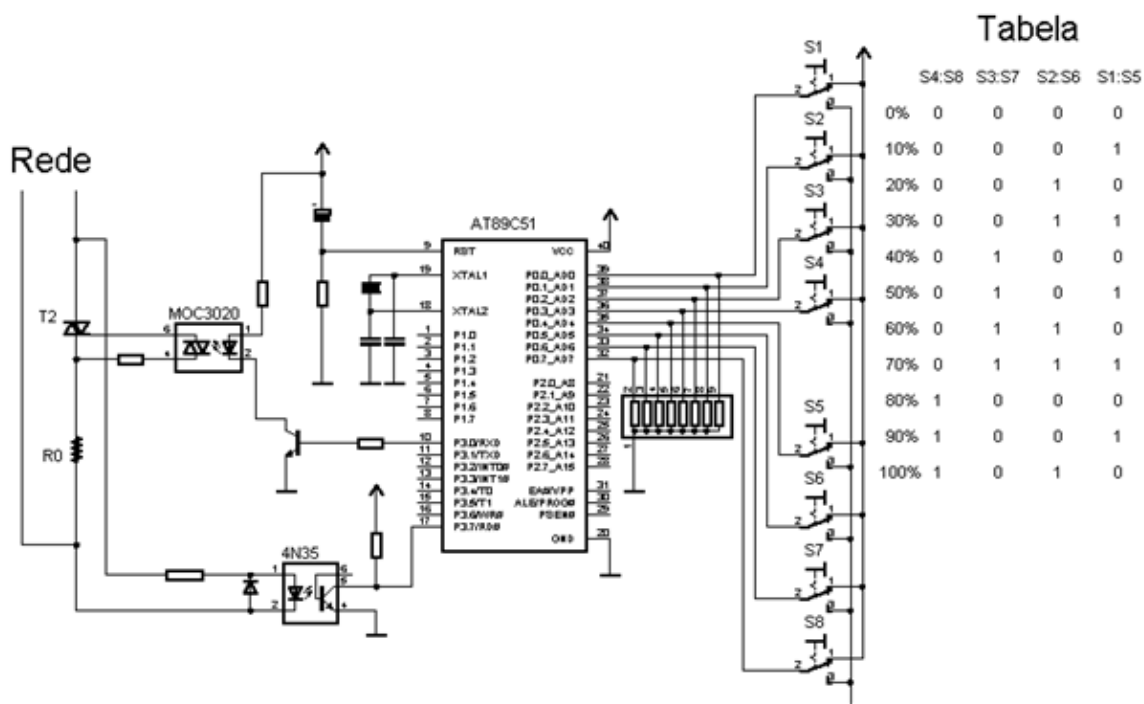


Figura 45: Circuito utilizado na execução do experimento

No circuito da figura 45, as chaves S1 até S4 acionam disparos por ângulo de fase, em 10(dez) **STEPS** de 0% a 100%, de forma binária, já as chaves S5 até S8 acionam disparos em ciclos inteiros, também em 10(dez) **STEPS** de 0% até 100% da potência do chuveiro.

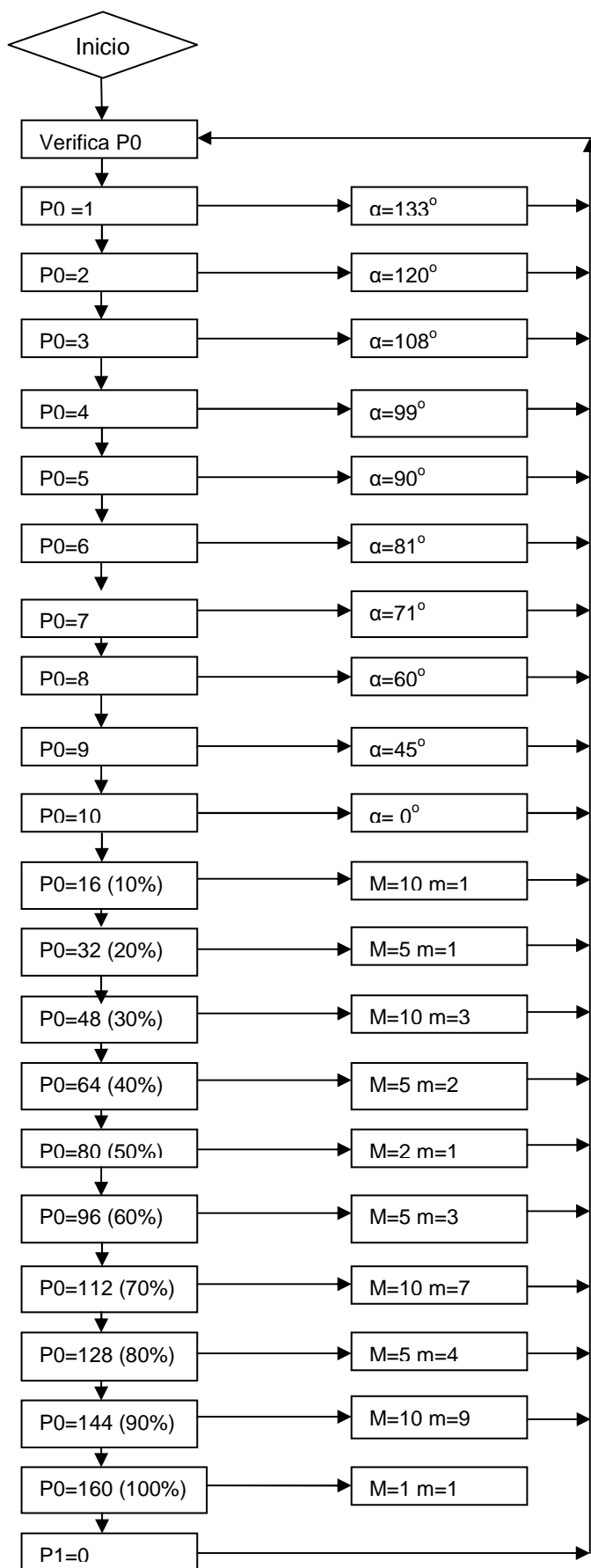


Figura 46: Diagrama de blocos do algoritmo

Seguindo a seqüência da análise teórica, serão apresentados resultados experimentais para 40% e 80% de carga, para fins de comparação com as simulações, e melhor entendimento dos fenômenos observados.

Na figura 47, é mostrado o acionamento da carga (6800W) em 40%, utilizando método de ângulo de fase. Nota-se perfeitamente o momento de chaveamento do triac, caracterizado por um transitório e imediata queda na tensão da rede, imperceptível ao olho humano por ocorrer 60 vezes por segundo.

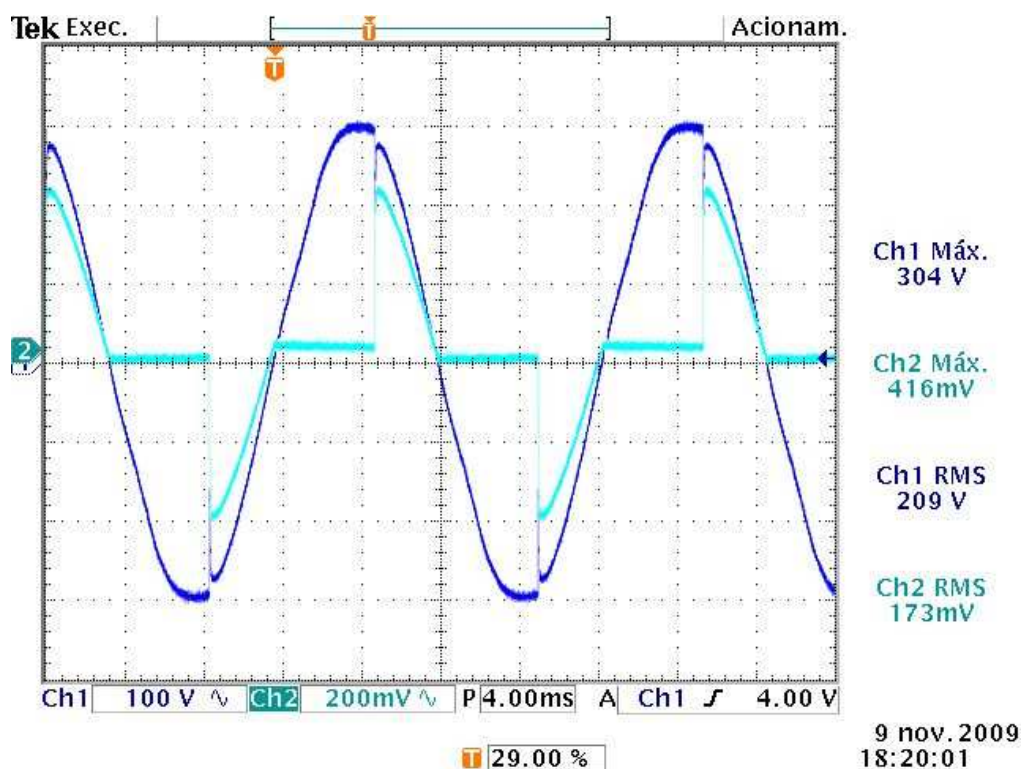


Figura 47: Disparos para 40% da carga, com ângulo de fase

Na figura 48 temos a forma de representação das harmônicas para o chaveamento em 40% da carga, onde pode-se ver forte distorção harmônica para o chaveamento em questão, com predominância de baixas freqüências, semelhante a análise considerando fonte ideal, e que ao compararmos com a norma pode-se observar que continua fora dos limites aceitáveis

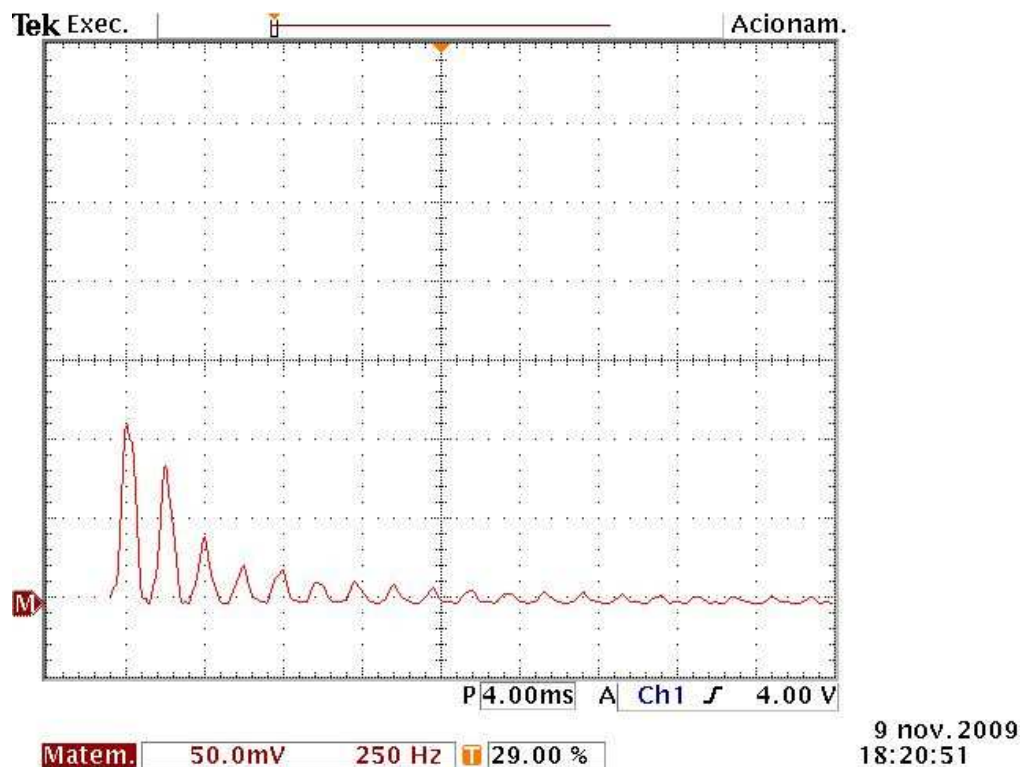


Figura 48: Distorção harmônica para 40% da carga, com ângulo de fase

Para a mesma potência(40%) o controle por ciclos inteiros, com período de 5 ciclos(20% a cada ciclo), foi aplicado na carga, cujos resultados do chaveamento podem ser vistos na figura 49.

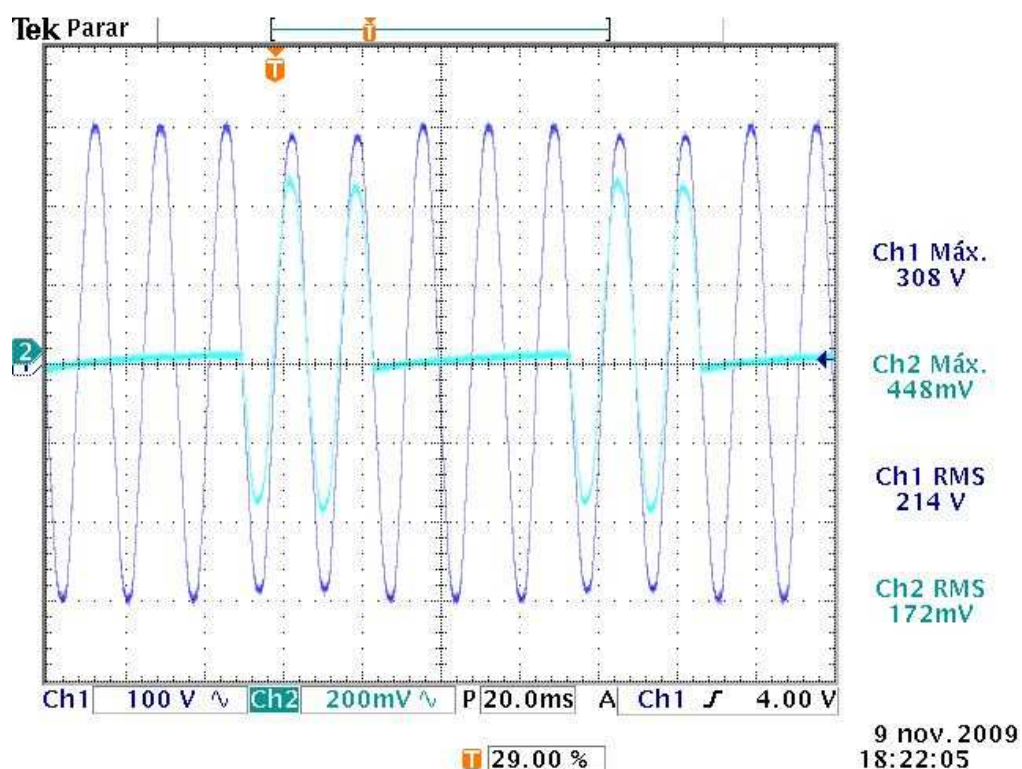
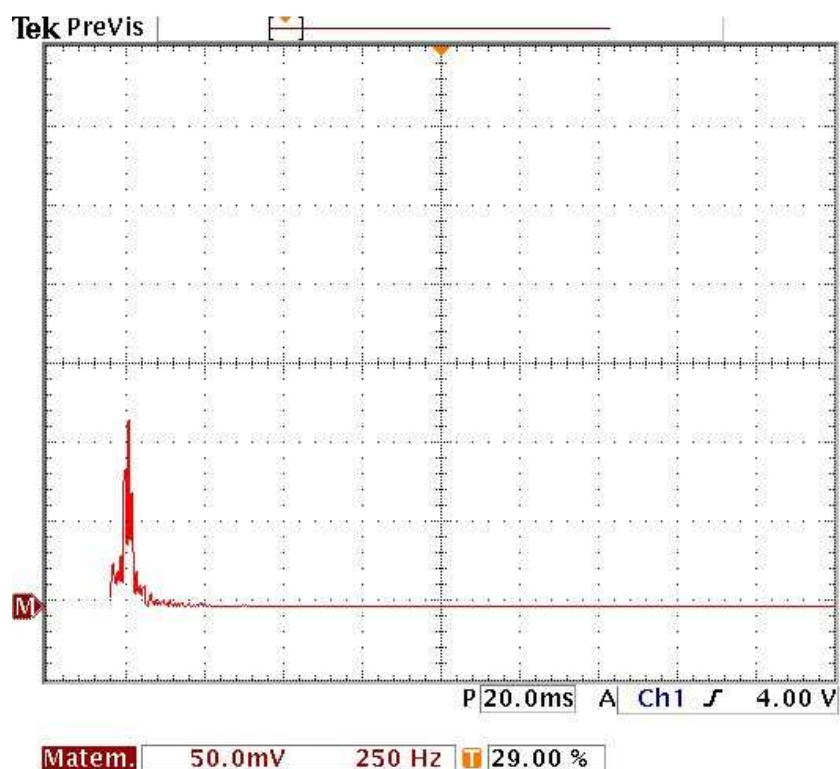


Figura 49: Ciclos inteiros para 40% da carga

Neste chaveamento, percebe-se também a queda de tensão na rede elétrica imediatamente cada disparo, sendo seu valor aproximadamente de 20Vpp, tal qual a queda de tensão ocasionada pelo método de ângulo de fase. Porém com 5 ciclos de período, o acionamento de 2 ciclos produz chaveamentos de 12Hz, frequência baixa o suficiente para ser perceptível o acionamento da carga, o efeito *flicker*.

No experimento, foi perceptível o efeito *flicker* na iluminação, também percebeu-se de forma auditiva o chaveamento da carga, ocasionado pelo próprio chuveiro em virtude do constante liga-desliga de sua resistência, gerando outro pequeno desconforto utilizando-se este método.

A distorção harmônica causada por esta forma de chaveamento pode ser vista na figura 50, e conforme observa-se, praticamente não ocorre distorção para o método de ciclos inteiros, comprovando a análise teórica.



9 nov. 2009
18:23:01

Figura 50: Distorção para 40% de carga usando ciclos inteiros

Nos resultados para 80% de carga, seguindo a seqüência das análises teóricas, podemos observar na figura 51 que apesar do transitório no momento de chaveamento do triac, não ocorre efeito *flicker* para o método de disparo por ângulo de fase.

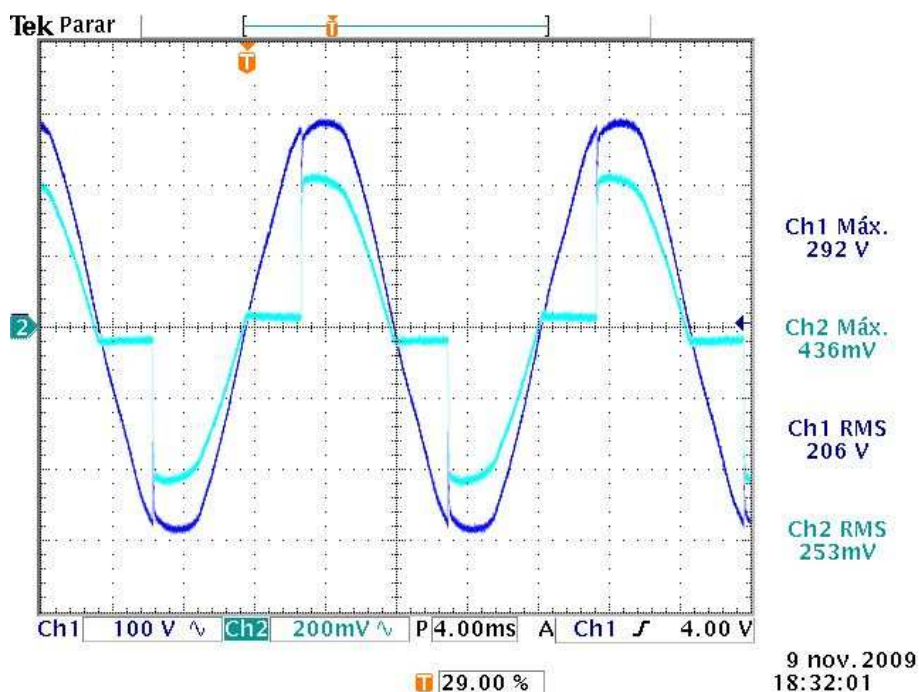


Figura 51: Disparos para 80% da carga, com ângulo de fase

A distorção harmônica para o chaveamento usando o método de ângulo de fase para 80% de carga, é ligeiramente menor do que para 40% de carga, conforme pode ser visto na figura 52, o que pode ser facilmente entendido, pois aplica-se corrente na carga numa parcela maior da forma de onda da rede elétrica.

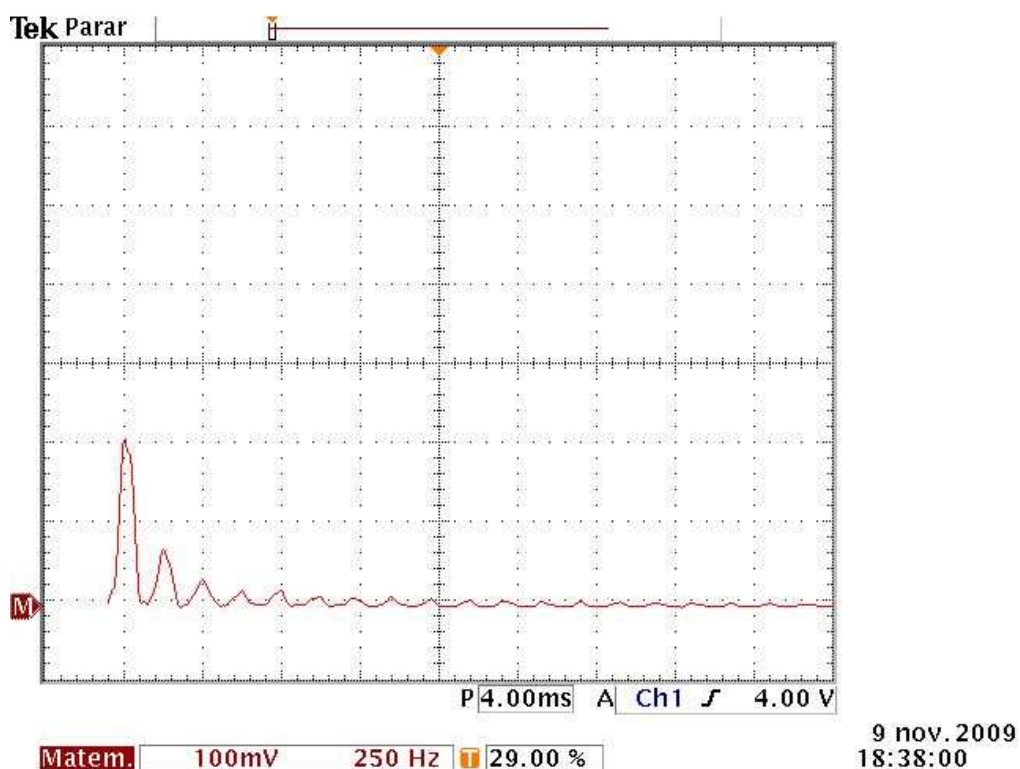


Figura 52: Distorção para 80% da carga, com ângulo de fase

Em contrapartida, na figura 53, pode-se observar o efeito do chaveamento utilizando ciclos inteiros para a mesma condição de carga(80%), onde num período de 5 ciclos da rede, a carga é acionada em 4 ciclos.

Nesta etapa do experimento, observou-se a presença do efeito *flicker* se manifestando na iluminação, na mesma freqüência e intensidade do que o chaveamento para 40% de carga.

O ruído audível também foi percebido, mostrando que mesmo numa mesma freqüência de chaveamento, o fato de permanecer a carga ligada por mais ou menos ciclos não altera a percepção do chaveamento do método de ciclos inteiros.

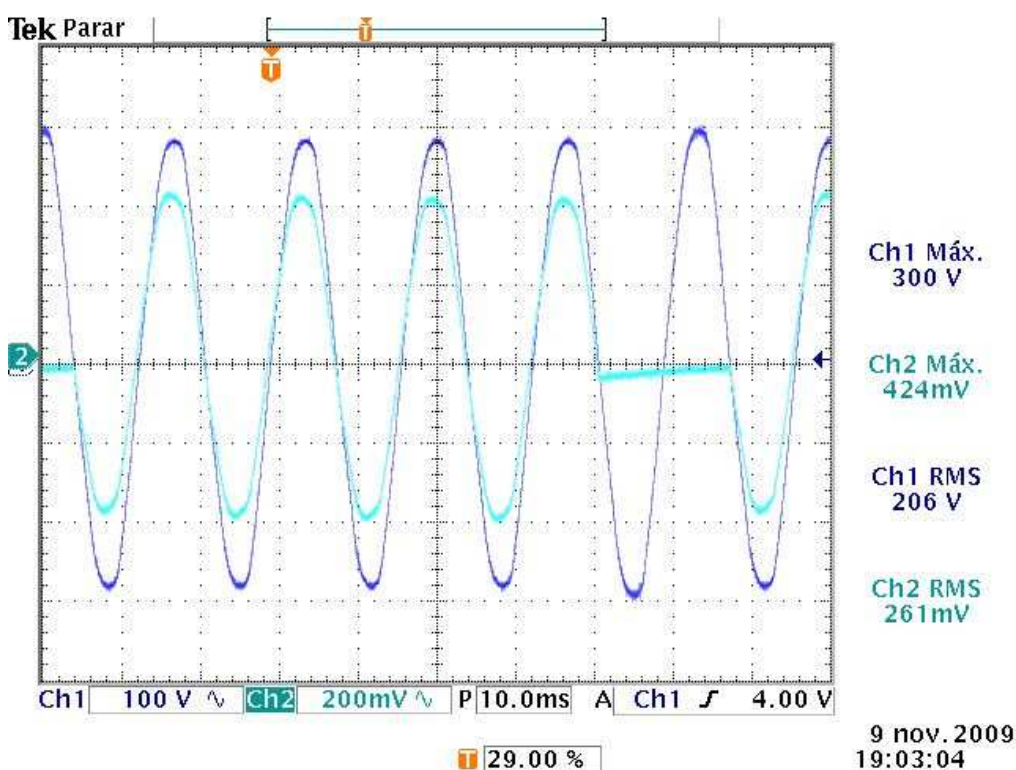


Figura 53: Disparos para 80% da carga, com ciclos inteiros

A distorção harmônica gerada neste chaveamento é mostrada na figura 54, onde percebe-se que a distorção causada para 40% é a mesma para 80%, praticamente nula.

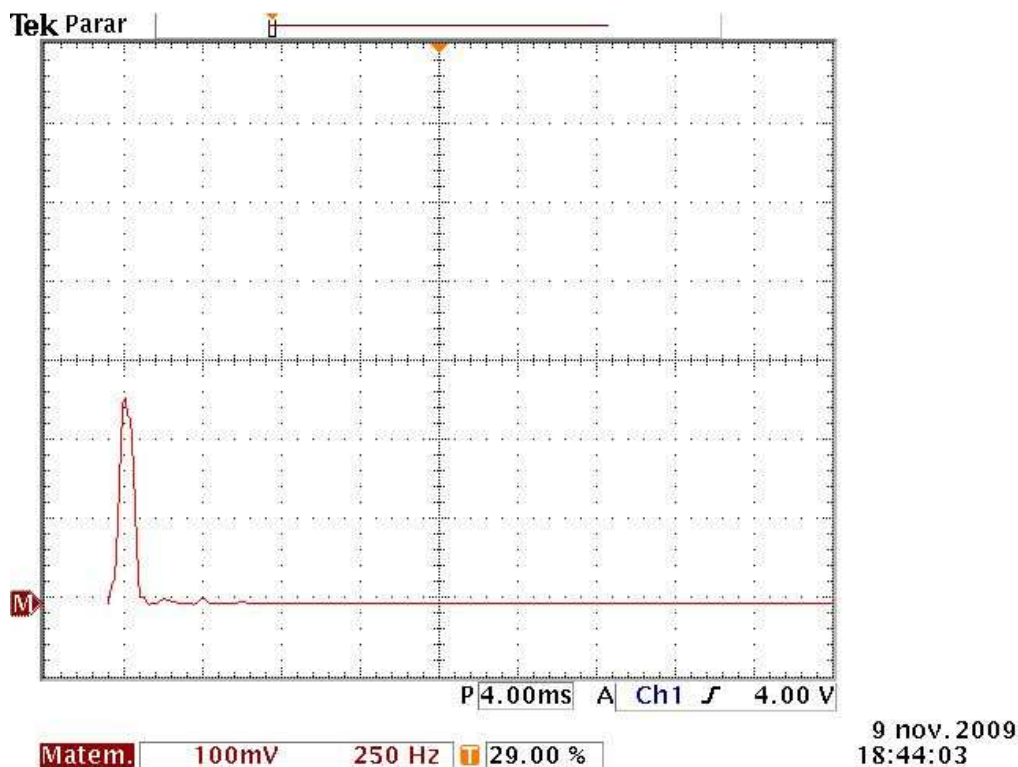


Figura 54: Distorção harmônica usando ciclos inteiros para 80% da carga.

Assim, a título de curiosidade, seguem nas figuras 55 à 63 as formas de onda para tensão e corrente do momento de comutação do tiristor para diversos instantes de 10% à 90% respectivamente, sendo à esquerda para controle por ângulo de fase e à direita controle por ciclos inteiros, onde em azul é mostrada a forma de onda da tensão e em azul claro a forma de onda da corrente na carga.

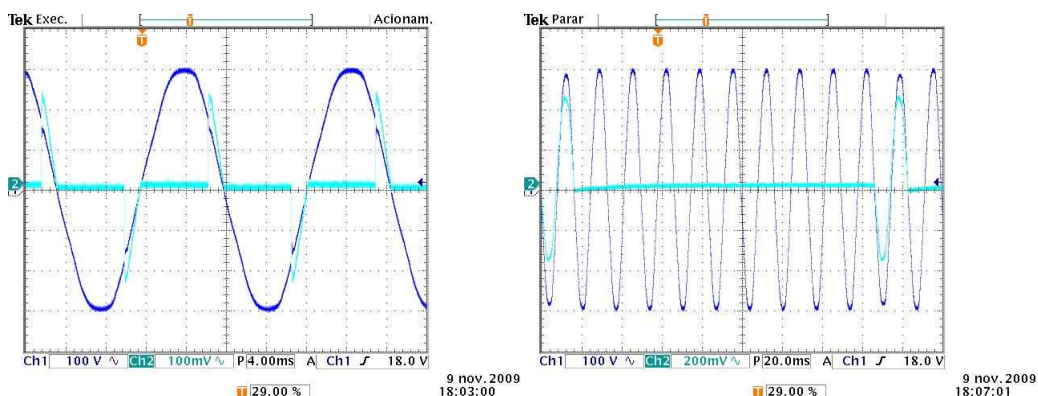


Figura 55: Aquisição à 10% de potência, $\alpha=133^\circ$, $M=10$ $m=1$

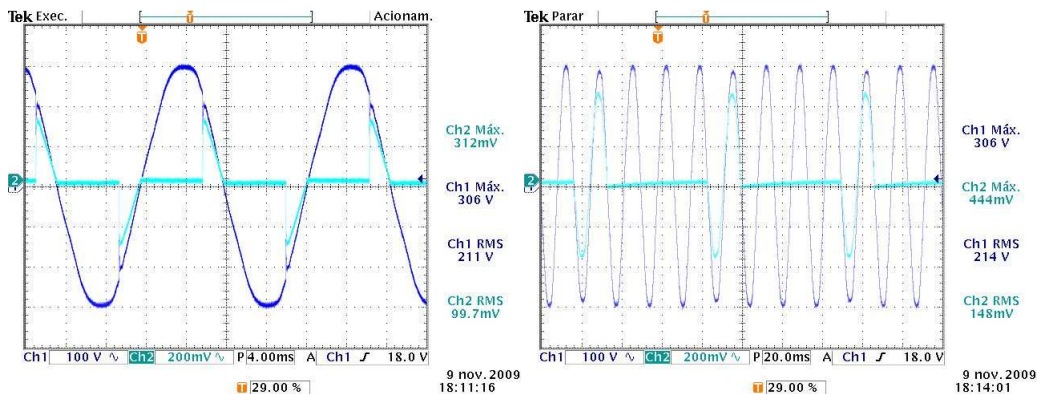


Figura 56: Aquisição à 20% de potência, $\alpha=120^\circ$, $M=5$ $m=1$

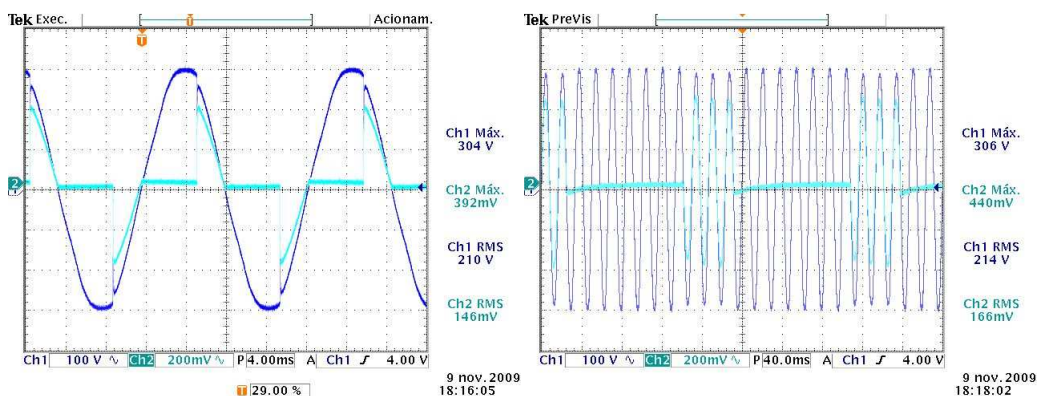


Figura 57: Aquisição à 30% de potência, $\alpha=108^\circ$, $M=10$ $m=3$

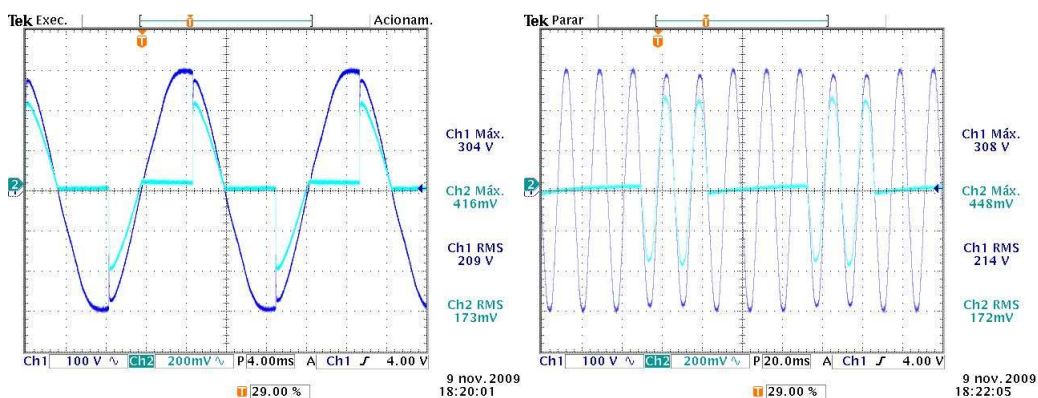


Figura 58: Aquisição à 40% de potência, $\alpha=99^\circ$, $M=5$ $m=2$

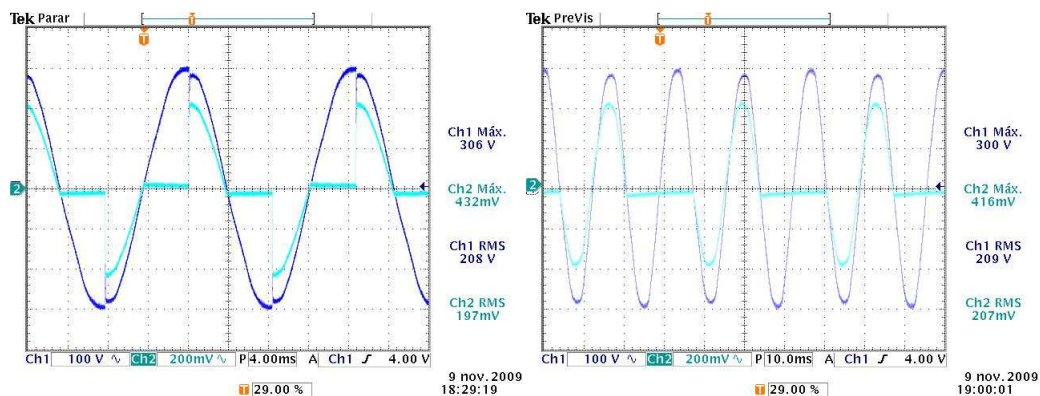


Figura 59: Aquisição à 50% de potência, $\alpha=90^\circ$, $M=2$ $m=1$

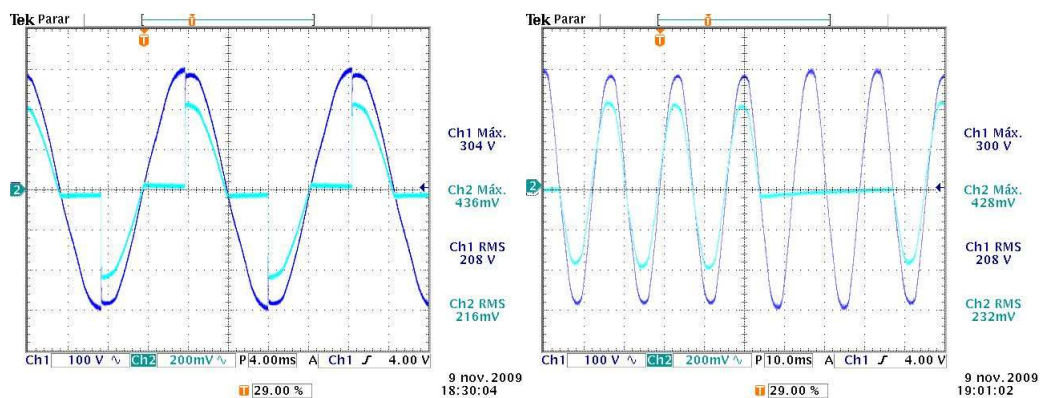


Figura 60: Aquisição à 60% de potência, $\alpha=81^\circ$, $M=5$ $m=3$

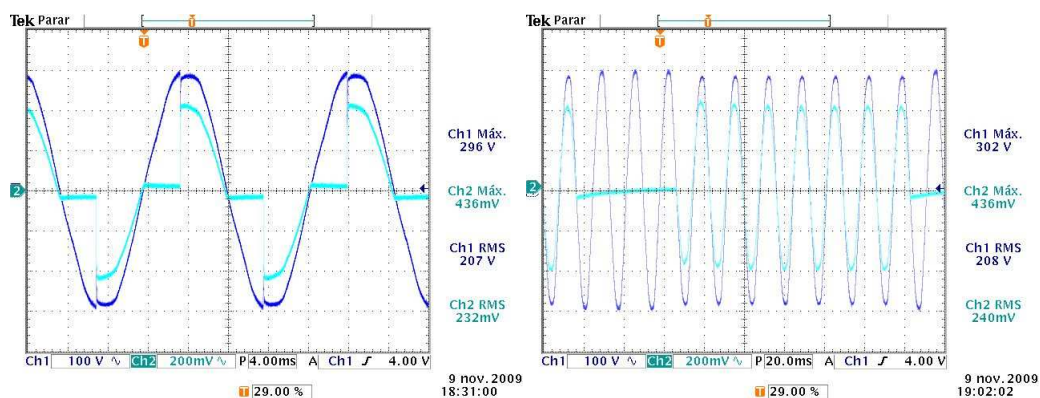


Figura 61: Aquisição à 70% de potência, $\alpha=71^\circ$, $M=10$ $m=7$

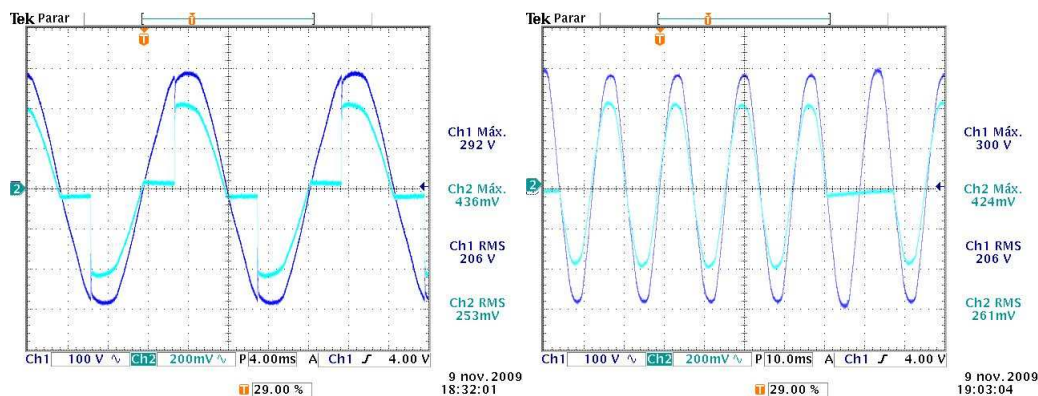


Figura 62: Aquisição à 80% de potência, $\alpha=60^\circ$, $M=5$ $m=4$

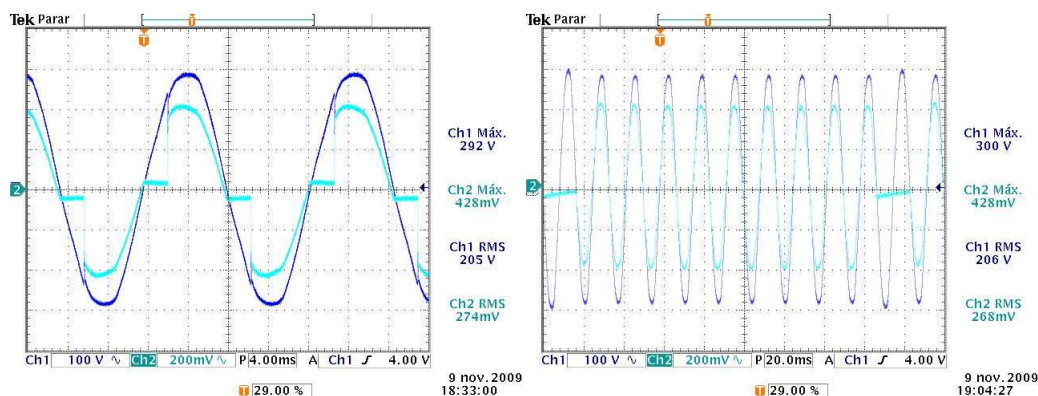


Figura 63: Aquisição à 90% de potência, $\alpha=45^\circ$, $M=10$ $m=9$

Percebe-se que em todos os momentos de comutação ocorre o transitório na forma de onda da tensão, decorrente da impedância característica da rede, e a corrente com uma forte componente harmônica.

Já para as figuras que representam o controle por ciclos inteiros, percebe-se facilmente a queda de tensão no momento da comutação da carga com a rede elétrica, causando efeito **Flicker** e ruído audível da resistência ao ser acionada.

Durante o experimento, com exceção dos primeiros degraus de potência, como 10%, 20% e 30% da potência do chuveiro, tornou-se quase imperceptível o efeito flicker na iluminação, porém o ruído sonoro da comutação do triac é claramente perceptível, o que certamente causaria desconforto ao usuário, mesmo tendo a temperatura estabilidade suficiente para não causar desconforto térmico.

Conforme consta na tese do acadêmico Claudio José de Oliveira Júnior, realmente comprova-se que não é possível implementar em rede de baixa frequência (60Hz) controle por ciclos inteiros em chuveiros elétricos e similares, não apenas substituindo o circuito de comando, mas sim com mudanças no projeto do chuveiro, como a inclusão de mais elementos resistivos de forma a eliminar o efeito **Flicker** por meio de métodos de comutação alternativos

Apesar do controle por ciclos inteiros ser de alta eficiência, no que se refere à distorções harmônicas, estabilidade térmica e transitórios de comutação, somente é possível implementá-lo em cargas de potência se usado com mais elementos resistivos, de forma a minimizar o efeito **flicker** a níveis imperceptíveis ao olho humano, não causando desta forma desconforto aos usuários.

Conforme já foi demonstrado em simulações, e comprovado no experimento prático, o efeito da comutação no controle por ângulo de fase é o causador das harmônicas neste tipo de controle, devido ao recorte da forma de onda da corrente no elemento resistivo do chuveiro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Hoje em dia o sistema de controle eletrônico mais amplamente empregado para aquecimento de água para uso residencial, e mesmo industrial, é o controle por meio de mudança no ângulo do disparo de tiristores, o que invariavelmente introduz harmônicas de corrente no sistema elétrico.

Como alternativa para este tipo de controle, poder-se-ia implementar junto aos fabricantes destes equipamentos os controles por ciclos inteiros, sempre que for possível, que cada vez se tornam mais robustos e baratos, tendo em vista o baixo valor dos microcontroladores hoje em dia.

Estima-se que em grande escala, o custo do sistema eletrônico para ciclos inteiros deva crescer no valor final do produto algo em torno de no máximo R\$5,00(acima de 5.000 unidades), considerando que componentes comuns ao sistema por ângulo de fase sejam aproveitados, como o tiristor de potência, o potenciômetro, resistores e capacitores do circuito de disparo e este valor poderia facilmente ser absorvido no valor do equipamento sem prejuízos ao lucro do fabricante ou perda de vendas por ter um valor pouco maior.

Além disso, há a questão de legislação, que deve prever em breve restrições quanto ao valor de harmônicos que um equipamento insere no sistema elétrico, e a questão de marketing, onde um produto mais “avançado” chamaria mais a atenção do usuário, por ser microcontrolado, digital, etc, palavras que agradam ao consumidor, até mesmo o menos exigentes.

Ao optar por utilizar controle por ciclos inteiros em seus produtos o fabricante exime-se de quaisquer responsabilidades no que tange maus funcionamentos de outros equipamentos instalados na mesma rede. Também estarão atendendo as normas internacionais, como as normas Européias, que são rigorosas quanto aos efeitos das cargas na rede elétrica.

Percebe-se uma proximidade entre os resultados de simulação e os resultados experimentais, mostrando que os valores e métodos utilizados nas simulações encontram-se próximos à realidade de uma instalação.

Tanto nos resultados de simulação quanto nos resultados experimentais, foi possível perceber a forte presença dos efeito nocivos do controle por ângulo de fase e do controle por ciclos inteiros, como distorções harmônicas e efeito **Flicker**, respectivamente.

Percebe-se que o controle por ângulo de fase é o controle mais fácil de ser implementado, e de melhor resultado final para o consumidor, tanto em estabilidade térmica quanto em distúrbios diretamente percebidos, pois este controle não causa desconforto ao usuário.

Já no controle por ciclos inteiros, a grande beneficiada, num primeiro momento, seria a rede como um todo, pois este controle não gera harmônicas, gera pouco esforço para a comutação do Triac, por iniciar a condução com valor baixo de tensão e corrente.

Infelizmente o método de controle por ciclos inteiros gera efeitos que podem desagradar os consumidores, como o efeito **Flicker** e o ruído audível do chaveamento da carga, o que provavelmente inviabilizaria uma simples conversão do sistema de controle atual para ciclos inteiros sem modificações no projeto dos equipamentos como chuveiros e torneiras elétricas.

Para se resolver o problema do efeito **Flicker**, pode-se recorrer à utilização de três ou mais elementos resistivos, o que aumentaria significativamente o valor do produto final, talvez inviabilizando sua comercialização enquanto não forem exigidas normas e limites de geração de harmônicos para este tipo de equipamento, porém, com a incorporação de mais elemento de aquecimento, a faixa de potências que um sistema que use controle por ciclos inteiros seria muito maior, não causando desconforto ao usuário.

Porém diversas formas de contornar o aumento do custo deste tipo de equipamento podem ser aplicadas, como por exemplo utilizando **MARKETING**, afinal atualmente a palavra “microcontrolado” significa inovação e tecnologia incorporada a um determinado produto, o que pode ser utilizado como propaganda a um produto com este diferencial, além, claro, de ser possível efetuar atualizações de firmware destes produtos, aplicando novos algoritmos para correções ou implementações de funções antes não disponibilizadas, como *timers*, alarmes sonoros, etc

Como proposta para maiores aprofundamentos, pode-se verificar o impacto de um grande número de torneiras e chuveiros elétricos numa população, considerando-se o uso dos atuais controles por ângulo de disparo e o uso de controles por ciclos inteiros.

Também é possível efetuar um aprimoramento maior do sistema, a ser utilizado em instalações onde se possua água quente nas tubulações(aquecimento a gás por exemplo), onde sensores de temperatura na entrada e saída de água do

chuveiro realimentariam o microcontrolador, fazendo com que o usuário tenha água quente desde o instante de abertura da sua torneira.

Este sistema faria uma integração entre o sistema de aquecimento de água de uma instalação e o uso de aquecimento por meio de eletricidade, onde o uso da eletricidade seria gradativa e automaticamente reduzido a medida que a água quente da tubulação chegue ao ponto de consumo, evitando inclusive o desperdício de água, tão importante nos dias de hoje.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANEEL. **Resolução No 505**. Brasília, 7 de Dezembro de 2000.

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Modulo 8

BARBI, I. **Eletrônica de potência**, 4ª Edição, BR, 2002

DUGAN, R.C.; MCGRANAGHAN, M.F; SANTOSO, S.; BEATY, H.W. **Electrical Power Systems Quality**. [S.l.]: McGraw – Hill, 2002.

ELETROBRÁS/PROCEL, **Conservação de energia, Eficiência energética de instalações e equipamentos**

EURELETRIC. **Relatório Eureletric: referência para fornecedores de energia elétrica e fabricantes**. Eletricidade Moderna. v.1, n 345, p 273 317, Setembro 2003.

GAUCHE,E; ANDRADE,F,; COELHO,J; FRONLICH,A; TREVISAN, F; SANTOS,D; GUIMARAES,V; LEAL,C; PEREIRA,F. **Monitoração de redes subterrâneas para melhoria da qualidade na distribuição**. CBQEE; Santos; Brasil; 2007.

IEEE 519, **Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System**.

JÚNIOR, C. J.O, **Controle Eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semi ciclos otimizado**. BR, 2006.

KENNEDY, B.W. **Power Quality Primer**. [S.l.]: McGraw-Hill. 2000

NBR 5410, **Instalações elétricas de baixa tensão**, 1997.

TIRISTOR, SCR. **Retificador Controlado de Silício**. Prof. Fernando Luiz Rosa Mussoi – Março 2002.

Moraes, Paulo Mario dos Santos Dias de, A New Topology of Power of AC Loads Using Ac-AC Converters, INEP.

JÚNIOR, CLAUDIO JOSÉ DE OLIVEIRA, **Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semi ciclos otimizado**, São Paulo, 2006

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

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

Datasheets e application notes acessados em 16/02/2010:

http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc4768.pdf

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41239D.pdf>

ANEXO I

Algoritmo utilizado no experimento

```

ORG 1000H
CLR P3.0           ;garante 0 em P3.0
MOV A, #00H       ;zera A

start:
MOV A, P0         ;Grava estado de P0 em A
CJNE A, #0000000B, dez ;Compara A com condição 0%, senao pula
para comparar com 10%
CLR P3.0         ;Garante 0 em P3.0
JMP start       ;retorna o loop

```

; ETAPA DE CONTROLE DE ANGULO DE FASE

```

dez:           ;10%= 6,15ms = 6150us -- restam 2,14ms
CJNE A, #00000001B, vint ;compara A com condição 10%, senao pula
para comparar com 20%
CLR 3.0       ;Garante 0 em P3.0
MOV R1,#00001101B ;usado no loop de delay
MOV R0,#00000011B ;usado no loop de delay
CALL DP      ;pulso em P3.0 de 500us no semi ciclo
positivo(DP=disparo positivo)
MOV R1,#00001101B ;usado no loop de delay(recarregando R1 para
semi ciclo negativo)
MOV R0,#00000011B ;usado no loop de delay(recarregando R2 para
semi ciclo negativo)
CALL DN      ;pulso em P3.0 de 500us no semi ciclo
negativo(DN=disparo negativo)
MOV A,P0     ;atualiza A
JMP dez      ;retorna o loop

```

;os demais passos são idênticos, apenas com os valores de delay modificados
;vint= 20%, trint=30% ... novtt=90% da potência

```

vint:         ;20% = 5,50ms = 5500us
CJNE A, #00000010B, trin
CLR 3.0
MOV R1,#00001100B
MOV R0,#00000001B
CALL DP
MOV R1,#00001100B
MOV R0,#00000001B
CALL DN
MOV A,P0
JMP vint

```



```

    CJNE A, #00000111B, oitt
    CLR 3.0
    MOV R1,#00000111B
    MOV R0,#01100111B
CALL   DP
    MOV R1,#00000111B
    MOV R0,#01100111B
CALL   DN
    MOV A,P0
JMP   sett

```

```

oitt:                                     ;80% = 2,75ms = 2750us
    CJNE A, #00001000B, novtt
    CLR 3.0
    MOV R1,#00000110B
    MOV R0,#01100011B
CALL   DP
    MOV R1,#00000110B
    MOV R0,#01100011B
CALL   DN
    MOV A,P0
JMP   oitt

```

```

novtt:                                    ;90% = 2,10ms = 2100us
    CJNE A, #00001001B, cem
    CLR 3.0
    MOV R1,#00000101B
    MOV R0,#00101001B
CALL   DP
    MOV R1,#00000101B
    MOV R0,#00101001B
CALL   DN
    MOV A,P0
JMP   novtt

```

```

cem:                                       ;100% = 0ms = 0us
    MOV A,P0
    CJNE A, #00001010B, c10
    SETB P3.0
    JMP cem

```

; ETAPA DE CICLOS INTEIROS

```

c10:                                       ;ciclo inteiro 10% 1 ciclo a cada 10
    MOV A,P0
    CJNE A, #00010000B, c20           ;verifica o estado das chaves
    CALL sincc
    CALL sincc
    CALL sincc
    CALL sincc

```

```

CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
SETB P3.0
CALL sincc2
CLR P3.0
JMP c10

```

c20: ;ciclo inteiro 20% 1 ciclo a cada 5

```

MOV A,P0
CJNE A, #00100000B, c30
CALL sincc
SETB P3.0
CALL sincc2
CLR P3.0
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
JMP c20

```

c30: ;ciclo inteiro 30% 3 ciclos a cada 10

```

MOV A,P0
CJNE A, #00110000B, c40
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc2 ;rotina para os 7 ciclos em off
CLR P3.0
JMP c30

```

c40: ;ciclo inteiro 40% 2 ciclo a cada 5

```

MOV A,P0
CJNE A, #01000000B, c50
CALL sincc
SETB P3.0
CALL sincc
CALL sincc2
CLR P3.0
CALL sincc

```



```
CALL sincc
CALL sincc
JMP c40
```

c50: ;ciclo inteiro 50% 1 ciclo a cada 2

```
MOV A,P0
CJNE A,#01010000B, c60
CALL sincc
SETB P3.0
CALL sincc2
CLR P3.0
CALL sincc
JMP c50
```

; sincc = sincronismo de ciclos

sincc: ;chamada de sincronismo com 4 verificações

```
MOV R4,#00000100B
SINC5: JB P3.7,SINC5 ;verifica se P3.7=1 4 vezes, só sai quando
P3.7=0
DJNZ R4,SINC5
MOV R4,#00000100B
SINC6: JNB P3.7,SINC6 ;verifica se P3.7=0 4 vezes, só sai quando
P3.7=1
DJNZ R4,SINC6
RET
```

sincc2: ;chamada de sincronismo com 4 verificações

```
MOV R4,#11101000B
SINC7: JB P3.7,SINC7 ;verifica se P3.7=1 4 vezes, só sai quando
P3.7=0
DJNZ R4,SINC7
RET
```

.....
 ;;

c60: ;ciclo inteiro 60% 3 ciclo a cada 5

```
MOV A,P0
CJNE A,#01100000B, c70
CALL sincc
SETB P3.0
CALL sincc
CALL sincc
CALL sincc2
CLR P3.0
CALL sincc
CALL sincc
JMP c60
```



```

MOV A,P0
CJNE A, #10100000B, FIM
SETB P3.0
jmp c100

```

```

FIM:
CLR P3.0

```

```

JMP start

```

```

;ROVINAS DE SINCRONISMO E DISPARO DE UM PULSO DE 500uS

```

```

DP: ;DP=disparo positivo, semi ciclo positivo
SINC: JB P3.7,SINC ;verifica se P3.7=1, só sai quando P3.7=0
SINC2: JNB P3.7,SINC2 ;verifica se P3.7=0, só sai quando P3.7=1

```

```

;esta etapa garante que o pulso será sincronizado com a passagem de 0
no semi ciclo positivo

```

```

D1: ;
D2: DJNZ R0, D2 ;
DJNZ R1, D1 ; rotina de delay de 500us com P3.0=1
SETB P3.0 ;
MOV R0, #11111110B ;
altop: DJNZ R0, altop ;volta P3.7=0
CLR P3.0

```

```

RET

```

```

;apos o pulso, sobra tempo para o microcontrolador realizar novo loop e
realizar o disparo no semi ciclo negativo

```

```

DN: ;DP=disparo negativo, semi ciclo negativo
SINC3: JNB P3.7,SINC3 ;verifica se P3.7=0, só sai quando P3.7=1, nesta
etapa ainda deve estar em 1
SINC4: JB P3.7,SINC4 ;verifica se P3.7=1, só sai quando P3.7=0

```

```

D3: ;
D4: DJNZ R0, D4 ;
DJNZ R1, D3 ; rodрина de delay de 500us com P3.0=1, para o semi
ciclo negativo
SETB P3.0 ;
MOV R0, #11111110B ;
alton: DJNZ R0, alton ;
CLR P3.0 ; volta P3.0=0

```

```

RET

```

```

END

```