

LEONARDO DE OLIVEIRA

**DIMERIZAÇÃO DE UM REATOR
ELETRÔNICO DE LÂMPADAS T5
UTILIZANDO O CI L6574**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Eletrônica

ORIENTADOR: Manoel Luís de Aguiar

São Carlos
2009

*Dedico este trabalho aos meus pais, que trabalharam muito para que eu pudesse
chegar até aqui...*

Resumo

Com aumento do uso de reatores eletrônicos nos últimos anos, foram desenvolvidos diversos tipos de lâmpadas e circuitos eletrônicos com o propósito de aumentar o rendimento e reduzir o consumo, permitindo a criação e fabricação de circuitos integrados dedicados. Este trabalho tem como objetivo o estudo de reatores eletrônicos e sua dimerização. Utilizando um simples reator comercial para lâmpadas T5, o qual utiliza o circuito integrado L6574 da ST Microelectronics como controlador principal, foram projetadas duas soluções para sua dimerização: a primeira utilizando uma bateria de NiMH e depois utilizando o circuito integrado 555 como PWM, de modo a permitir o controle de níveis de tensão diferentes, necessários para o chaveamento de frequência na própria lâmpada.

Palavras chave: reator eletrônico, lâmpadas T5, dimerização, L6574, 555, PWM

Abstract

Due to the increase usage of electronic ballasts in the last years, there were developed several kinds of fluorescent lamps and electronics circuits with the purpose of efficiency increase and consume reduction, allowing the creation and the fabrication of dedicated integrate circuits. This work aims to show ballasts features and its luminosity dimmerization. Using a simple standard market ballast for T5 lamps, which has the IC L6574 from ST Microelectronics as main controller, were designed two type of solutions for its luminosity dimmerization: first using a NiMH Battery and then using the IC 555 as a PWM source, in order to control voltage levels, necessary to change the switching frequency on the lamp.

Keywords: electronic ballast, T5 lamp, dimming, L6574, 555, PWM

Sumário

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS	15
1. INTRODUÇÃO	17
2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO	18
2.1. Lâmpadas fluorescentes.....	18
2.1.2. Lâmpadas fluorescentes T5.....	19
2.2. Reatores eletrônicos	21
2.2.1. Etapas de funcionamento:	23
2.2.2. Estágio corretor de fator de potência.....	24
2.2.3. Filtros EMI.....	26
2.3. Métodos para o controle de Luminosidade (Dimerização)	28
3. DESENVOLVIMENTO	30
3.1. O reator.....	30
3.2. Estágio corretor de fator de potência: CI L6561.....	31
3.3. Circuito de comando do inversor: CI L6574.....	33
4. IMPLEMENTAÇÃO DA DIMERIZAÇÃO	41
4.1. Implementação usando uma bateria de NiMH	43
4.2. Implementação usando PWM	44
4.2.1. Modulação em largura de pulso (PWM)	44
4.2.2. O circuito integrado 555.....	46
4.2.3. O circuito de PWM utilizado neste trabalho	47
5. ENSAIOS E RESULTADOS.....	49
6. CONCLUSÃO.....	56

7. BIBLIOGRAFIA.....	57
ANEXO 1.....	59

Lista de figuras

Figura 1 - Componentes da lâmpada fluorescente	18
Figura 2 - Dimensões da lâmpada T5	21
Figura 3 - Diagrama de blocos de um reator eletrônico com alto fator de potência	22
Figura 4 - Inversor ressonante de meia ponte ZVS	22
Figura 5 - Etapa de pré-aquecimento	23
Figura 6 - Circuito de pré-aquecimento por tensão	24
Figura 7 - Exemplo de configuração de um conversor <i>Boost</i>	26
Figura 8 - Layout de um filtro EMI típico	27
Figura 9 - Reator eletrônico dimerizável com capacitor comutado	29
Figura 10 - Fotografia do reator escolhido	31
Figura 11 - Diagrama de blocos do funcionamento interno do CI L6561	32
Figura 12 - Sugestão do fabricante para o CI L6561	33
Figura 13 - Diagrama de blocos do funcionamento interno do CI L6574	34
Figura 14 - Sugestão do fabricante para o CI L6574	34
Figura 15 - Etapas do chaveamento de frequência	35
Figura 16 - Bloco temporizador	36
Figura 17 - Bloco do oscilador	36
Figura 18 - Frequência de operação com $C_f=470\text{pF}$	38
Figura 19 - Tensão e chaveamento de frequência em C_{pre}	39
Figura 20 - Circuito <i>Bootstrap</i>	39
Figura 21 - Circuito <i>Bootstrap</i> implementado no CI L6574	40
Figura 22 - <i>Feedback</i> de corrente	41
Figura 23 - Referencial de tensão no pino 7	42
Figura 24 - Fotografia do circuito com a bateria NiMH	43
Figura 25 - Esquema do circuito usando a bateria	44
Figura 26 - Pulsos PWM	45
Figura 27 - Diagrama de blocos do circuito integrado 555	46
Figura 28 - Exemplo simplificado de configuração do 555	47
Figura 29 - Configuração do 555 no modo de PWM	47
Figura 30 - Esquema usando o circuito integrado 555	48
Figura 31 - Fotografia do circuito usando o 555	48
Figura 32 - Formas de onda da entrada usando o circuito da bateria	49

(intensidade de luz mínima)

Figura 33 - Formas de onda da entrada usando o circuito da bateria50	
(intensidade de luz máxima)	
Figura 34 - Formas de onda no pino 3 do 555(PWM) 51	
Figura 35 - Formas de onda da entrada usando o circuito com o 55552	
(intensidade de luz mínima)	
Figura 36 - Formas de onda da entrada usando o circuito com o 55552	
(intensidade de luz máxima)	
Figura 37 - V_{RMS} (V), I_{RMS} (A), Freqüência (kHz) da lâmpada x PWM (V)53	
Figura 38 - Formas de onda na lâmpada com uma intensidade de luz máxima54	
Figura 39 - Formas de onda na lâmpada na proximidade de intensidade de luz..... 54	
mínima	
Figura 40 - V2 (V), V5 (V) x PWM (V) 55	

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Lâmpadas fluorescentes T5 HE	20
Tabela 2 - Lâmpadas fluorescentes T5 HO	20
Tabela 3 - Tamanhos de lâmpadas T5	21
Tabela 4 - Amplitude dos harmônicos	25
Tabela 5 - Especificações dos reatores da marca	30
Tabela 6 - Especificações dos reatores da marca	30
Tabela 7 - Tensão, corrente e frequência na lâmpada em função da tensão do PWM	53
Tabela 8 - Tensão dos pinos 2 e 5 em função da tensão do PWM	55

1. Introdução

Devido à ampla utilização de lâmpadas fluorescentes e a necessidade de se ter reatores eletrônicos com um alto fator de potência, seja em ambientes residenciais, comerciais e industriais, foram desenvolvidos muitas aplicações baseadas nos inversores ressonantes de meia ponte.

Esta alta demanda permitiu o desenvolvimento tecnológico de lâmpadas fluorescentes mais eficientes e compactas, de reatores mais modernos e posteriormente o desenvolvimento de circuitos integrados dedicados, objetivando o uso de estruturas com alta eficiência de energia, alto fator de potência e baixo custo, além de atender à especificações de normas de regulamentação do setor de iluminação. [2]

Este trabalho tem como princípio implementar o controle da intensidade de iluminação (que é comumente chamado de dimerização) de um reator comercial para lâmpadas fluorescentes T5 de 54 Watts a partir do circuito integrado da ST Microelectronics L6574, e observar o seu efeito no fator de potência.

Para se conseguir a dimerização, serão apresentadas duas implementações para se variar tensão através de uma fonte externa: a primeira através de uma bateria de NiMH e a segunda através de PWM utilizando o circuito integrado 555.

No capítulo 2 serão apresentados alguns conceitos básicos de funcionamento das lâmpadas fluorescentes. Também serão apresentadas as estruturas que fazem parte de um reator eletrônico comercial comum, afim de facilitar o entendimento do seu funcionamento e das técnicas de dimerização.

O capítulo 3 é destinado à explicação de como os circuitos integrados do reator eletrônico escolhido funcionam em função das estruturas apresentadas no capítulo 2. Nele é discutido também as adequações que foram feitas para os fins deste trabalho.

No capítulo 4 é mostrado as mudanças que foram feitas para melhorar a dimerização, e os circuitos utilizados para seu controle. Os resultados são discutidos no capítulo 5.

No capítulo 6 encontra-se a conclusão, e ao final do trabalho encontra-se em anexo o esquemático do reator proposto pelo *application note* da ST Microeletronics [12], que é similar ao reator comercial estudado.

2. Princípios básicos de funcionamento

Neste capítulo serão apresentados o princípio básico de funcionamento das lâmpadas fluorescentes, e também das partes de um reator eletrônico comercial comum. Para facilitar o entendimento, o reator eletrônico foi dividido em blocos: filtro EMI, retificador, estágio corretor de fator de potência, circuito inversor e filtro LCC.

Serão apresentados em 2.3. técnicas de dimerização utilizadas para lâmpadas fluorescentes em reatores eletrônicos.

2.1. Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes, introduzidas no mercado consumidor pela GE em 1938 [5], são constituídas por um tubo circular revestido por um material fluorescente, contendo vapor de mercúrio e uma pequena quantidade de gás inerte em seu interior, sendo assim de baixa pressão. Em cada extremidade do tubo existe um eletrodo recoberto com material emissivo de elétrons (geralmente um filamento de tungstênio).

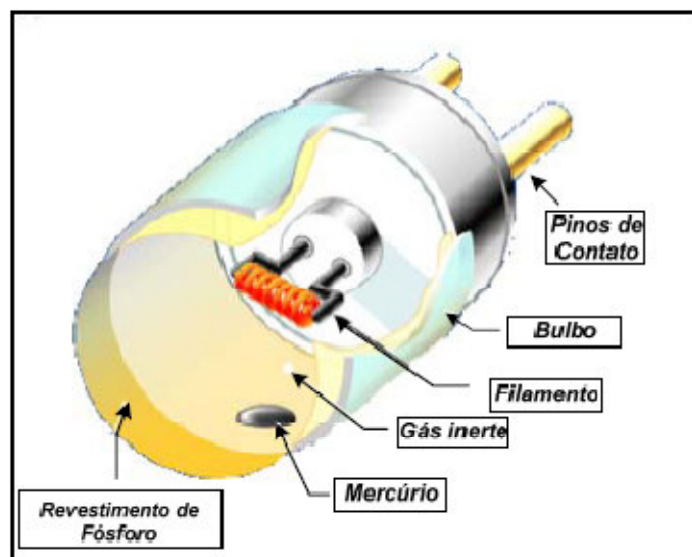


Figura 1 – Componentes da lâmpada fluorescente [8]

Quando as lâmpadas estão em operação, uma corrente elétrica circula nos filamentos (do eletrodo) causando seu aquecimento e a liberação de elétrons. Esses elétrons se movimentam de um eletrodo ao outro causando a descarga elétrica no vapor de mercúrio. As contínuas colisões entre esses elétrons e os elétrons dos átomos de mercúrio fazem com que eles se desloquem de sua camada de valência para um nível superior de energia. Assim quando esses átomos retornam às suas camadas originais, liberam a energia que absorveram com as colisões principalmente na forma de radiação ultravioleta. Através da propriedade física do material fluorescente contido nas paredes do tubo (geralmente fósforo), essa radiação ultravioleta é convertida em luz visível.

O processo de ignição da lâmpada ocorre quando a diferença de potencial entre os eletrodos atingir um valor crítico. Esse valor pode ser diminuído pelo aquecimento dos gases através da corrente que circula nos filamentos, ou aplicando uma tensão bastante elevada em seus terminais. Quando o arco é estabelecido, a lâmpada passa a ter resistência negativa (quanto maior a corrente, menor a resistência). Se fosse conectada diretamente a uma tensão CC (corrente contínua) constante, a lâmpada se destruiria facilmente.

Então, para controlar a corrente que flui sobre a lâmpada, foram desenvolvidos os reatores (*ballasts* em inglês) que eram inicialmente do tipo eletromagnético. Estes dispositivos são de menor custo e mais simples do que os reatores eletrônicos atuais, mas possuem muitas desvantagens como perdas excessivas, ruído audível, baixo fator de potência e possibilidade de ocorrência do efeito estroboscópico, além de serem grandes e pesados. [8]

Além do controle, a qualidade da corrente fornecida à lâmpada também é importante. Correntes com componente contínua ou com grande conteúdo harmônico não desejado influenciam no seu tempo de vida útil, causando desgastes nos materiais que compõem os filamentos e podendo causar fenômenos não desejáveis no interior do tubo. Para medir essa qualidade, existe o fator de crista (FC), que é obtido pela relação entre o valor de pico da corrente e pelo valor eficaz medido levando em conta a frequência fundamental. [2]

Por esses motivos, o uso de reatores eletrônicos vem sendo amplamente utilizados. Através do controle da corrente que passa pela lâmpada, podemos controlar sua frequência e conseqüentemente sua dimerização.

2.1.2. Lâmpadas fluorescentes T5

As lâmpadas fluorescentes T5 utilizadas pelo reator escolhido neste trabalho, entraram no mercado em meados de 1995. Elas foram projetadas para serem as sucessoras do formato T8 e são as mais eficientes do mercado, isso com respeito às lâmpadas de descarga de baixa pressão. [5]

O significado de ‘T’ vem de tubular, e o ‘5’ de sua espessura que é 5/8 de polegadas (15,9 mm de diâmetro). Sua tecnologia é tri-fósforo, isto é, três tipos de fósforos responsáveis por cada cor primária de luz (vermelho, verde e azul), ao contrario das lâmpadas fluorescentes antigas. Isso permitiu obter temperaturas de cor mais elevadas, melhor contraste e vida útil mais longa. Assim as lâmpadas T5 tem 10% mais luz se comparadas com as que não usam essa tecnologia e um maior IRC (índice de reprodução de cores). [5]

A principal característica deste tipo de lâmpada com a relação as antecessoras e a sua temperatura de trabalho. Enquanto no tipo T8 a máxima iluminação ocorre a 25°C, na T5 a média de temperatura é de 35°C. Com essa inovação, temos um melhor desempenho de iluminação em lugares fechados com pouca ventilação, tendo grande uso em fábricas e

indústrias. Uma lâmpada T8, por exemplo, perde 10% de sua luminância a 35°C. A depreciação do fluxo luminoso conforme a temperatura aumenta também é menor na T5 em relação a T8.

Outra característica importante é o seu baixo gasto energético. Em uma lâmpada T5 temos eficiência luminosa de 100 lumens por watt, onde a T8 faz 90 lumens por watt.

Comercialmente são encontrados dois tipos de lâmpada T5. As mais comuns são do tipo HE (*High Efficiency*) com potências de 14, 21, 28 e 35 watts, e as do tipo HO (*High Output*) de 24, 39, 54 e 80 watts. [5]

Abaixo seguem duas tabelas comparativas, a primeira de lâmpadas HE e a segunda de lâmpadas HO:

Potência (W)	Comprimento (mm)	Fluxo luminoso médio (lm)	Eficiência (lm/w)
14	549	1350	96
21	849	2100	100
28	1149	2900	104
35	1449	3650	104

Tabela 1 - lâmpadas fluorescentes T5 HE [5]

Potência (W)	Comprimento (mm)	Fluxo luminoso médio (lm)	Eficiência (lm/w)
24	549	2000	83
39	849	3500	90
54	1149	5000	93
80	1449	7000	88

Tabela 2 - lâmpadas fluorescentes T5 HO [5]

As lâmpadas T5 HE diferem das T5 HO por apresentarem uma maior densidade de fluxo luminoso por unidade de área. Pode-se dizer que na HE distribui-se o fluxo luminoso de maneira uniforme com pouco gasto energético, sendo de melhor uso em shoppings e supermercados por exemplo. Já a HO seria para um ambiente que precise bastante fluxo luminoso com distribuição de luz em espaço reduzido, como laboratório e alguns locais específicos em indústrias.

A vida útil de uma lâmpada T5 também é maior do que as antecessoras T8 e T12. Testes de fabricantes mostram que ela consegue manter o fluxo luminoso em torno de 95% após 8000 horas de uso, e seu tempo de vida útil é em torno de 18000 a 20000 horas (tempo que o fluxo luminoso se reduziu a menos 25%). [5]

Segue a tabela 3 com as dimensões de acordo com a norma internacional IEC 60081:

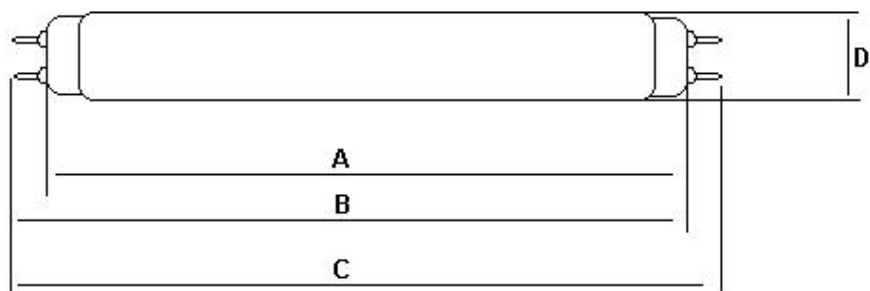


Figura 2 – Dimensões da lâmpada T5 [5]

Potência (W)	Tipo	A	B		C	D
		Máx.	Mín.	Máx.	Máx.	Máx.
14	HE	549	553,7	556,1	563,2	17
21	HE	849	853,7	856,1	863,2	17
28	HE	1149	1153,7	1156,1	1163,2	17
35	HE	1449	1453,7	1456,1	1463,2	17
24	HO	549	553,7	556,1	563,2	17
39	HO	849	853,7	856,1	863,2	17
54	HO	1149	1153,7	1156,1	1163,2	17
80	HO	1449	1453,7	1456,1	1463,2	17

Tabela 3 - tamanhos de lâmpadas T5 [5]

2.2. Reatores eletrônicos

O uso de reatores eletrônicos - apesar de ser mais complexo, menos robusto e ter um custo maior que um reator magnético - se torna atrativo pelo fato de ser mais eficiente e proporcionar uma economia de energia elétrica a médio e longo prazo. [8]

Os reatores eletrônicos podem ser classificados de acordo com:

- seu método de ignição da lâmpada;
- a potência que eles podem fornecer à carga;
- pela presença ou não de estágio de correção de fator de potência (PFC);
- pela sua capacidade ou não de controlar a intensidade luminosa (dimerização);
- pela possibilidade de comunicação com outras estruturas através de um protocolo específico;

A figura 3 ilustra o diagrama de blocos típico de um reator eletrônico:

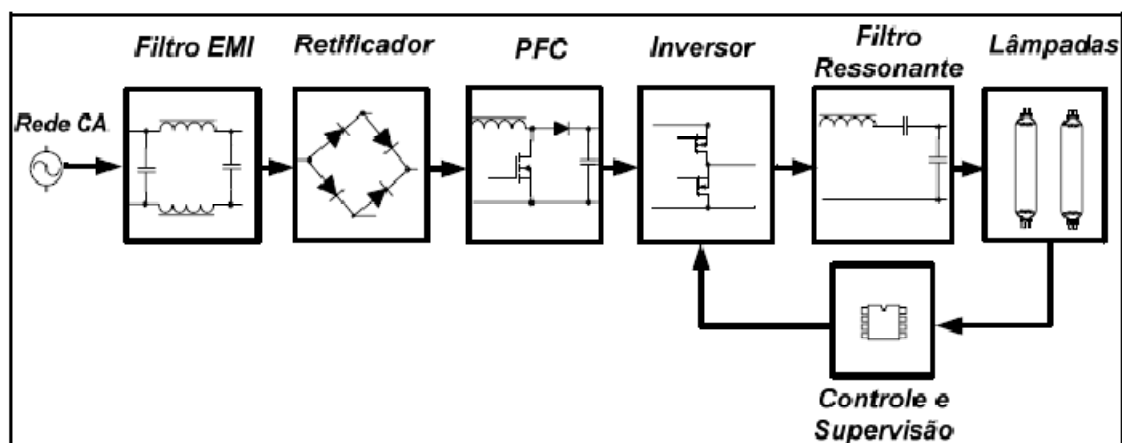


Figura 3 – Diagrama de blocos de um reator eletrônico com alto fator de potência [8]

O estágio de inversor utilizado nos reatores de lâmpadas fluorescentes é o inversor ressonante de Meia-Ponte, devido a sua robustez, simplicidade e por apresentar comutação suave do tipo ZVS (*Zero Voltage Switching*) nos transistores e principalmente pelo baixo custo [8]. A figura mostra o esquema simplificado deste tipo de inversor:

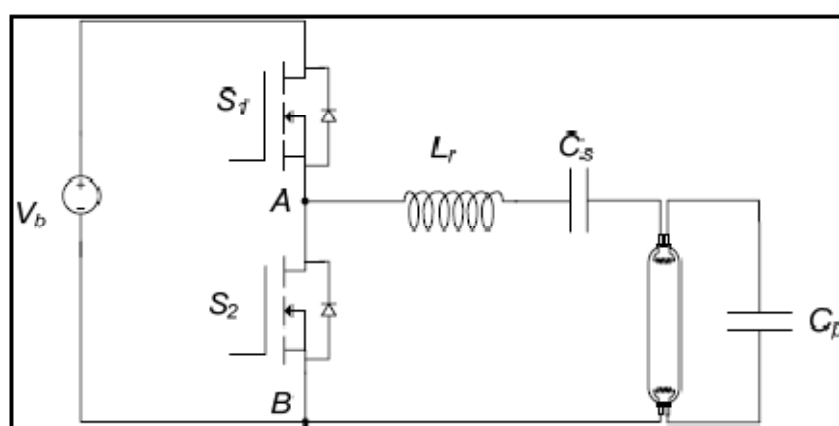


Figura 4 – Inversor ressonante de meia ponte ZVS [8]

O arranjo dos transistores S_1 e S_2 mostra que seu funcionamento deve ser de forma complementar e que os valores de tensão que eles devem suportar não ultrapassam o valor de tensão do barramento (V_b). Assim a tensão aplicada nos pontos A e B são do tipo retangular de amplitude V_b . [8]

O circuito ressonante do tipo LCC que compõe a carga do inversor é formado por um indutor ressonante (L_r), um capacitor série de bloqueio (C_s) e capacitor paralelo (C_p). Esse filtro proporciona níveis de tensão e de corrente adequados a serem processados na lâmpada no decorrer de suas etapas de operação, inclusive na dimerização. Assim é garantida a comutação

suave na entrada em condução dos MOSFETS's. O capacitor C_s possibilita a eliminação da componente CC da corrente e da tensão na Lâmpada. [8]

2.2.1. Etapas de funcionamento:

- Ignição:

A ignição da lâmpada acontece quando a diferença de potencial entre os eletrodos atingir um valor crítico, assim ocorrendo o arco através da coluna de gás [5]. O valor crítico pode ser reduzido com do aquecimento do gás através dos filamentos, mas também pode-se iniciar a ignição aplicando uma tensão muito alta nos terminais da lâmpada, como é feito nos reatores de partida instantânea. Porém esse método não é muito utilizado por reduzir consideravelmente o tempo de vida útil da lâmpada. [8]

Os reatores que apresentam um circuito de aquecimento dos filamentos da lâmpada são denominados reatores de partida rápida. Nesses reatores a etapa de pré-aquecimento pode ser realizada controlando a corrente ou a tensão aplicada nos filamentos e após a lâmpada entrar em funcionamento, o aquecimento pode ser mantido, reduzido ou removido. [3]

Para o pré-aquecimento através do controle da corrente nos filamentos, temos que ter uma frequência de operação do inversor superior à frequência natural do filtro ressonante para garantir corrente nos filamentos e tensão adequada sobre a lâmpada. Se a frequência do inversor se aproximar da frequência natural do filtro, a corrente nos filamentos será elevada e assim comprometendo a durabilidade da lâmpada. Neste método de pré-aquecimento, os filamentos permanecem recebendo energia após a ignição, causando um desgaste do material dos eletrodos e a redução do rendimento global da estrutura. [3]

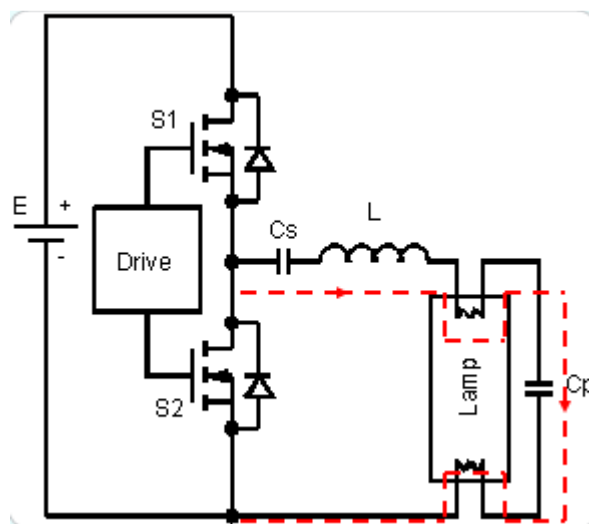


Figura 5 – Etapa de pré-aquecimento [3]

No circuito de pré-aquecimento controlado por tensão existe, além do filtro LCC, o acréscimo de um circuito de pré-aquecimento formado por C_3 e $L_{2:1}$ e um transistor S_3 . O

tempo que os filamentos recebem energia do circuito de pré-aquecimento passa a ser determinado pelo tempo de condução de S_3 . Após a ignição da lâmpada, S_3 é bloqueado e os filamentos deixam de receber energia, diminuindo seu desgaste e o enegrecimento das paredes internas do tubo próximo aos terminais da lâmpada. [3]

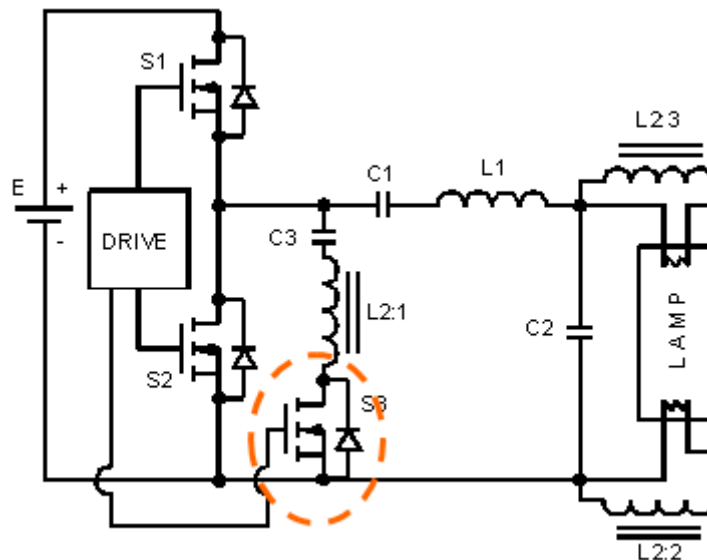


Figura 6 – Circuito de pré-aquecimento por tensão [3]

- Operação em Regime permanente

Para a operação em regime permanente, o funcionamento dos transistores no circuito inversor é realizada de forma complementar, com um pequeno tempo morto entre os sinais de comando. A comutação suave do tipo ZVS é obtida em consequência da característica indutiva da carga, decorrente da relação entre a frequência de comutação e a frequência de ressonância do filtro. Assim as perdas de comutação na entrada dos transistores são mínimas, caracterizando uma das vantagens desse tipo de estrutura. [8]

2.2.2. Estágio corretor de fator de potência

Os reatores eletrônicos possuem normas e padrões específicos que regulamentam suas características de funcionamento e comercialização, semelhante ao que acontece com diversos equipamentos elétricos. Com relação às harmônicas presentes na corrente de entrada, a norma brasileira estabelece que para reatores eletrônicos com potência acima de 56W devem estar em conformidade com os limites estipulados para equipamentos da classe tipo C da norma IEC 61000-3-2. Assim as amplitudes dos harmônicos não devem ultrapassar os valores apresentados na tabela a seguir: [2]

Ordem do harmônico k	Amplitude máxima do harmônico de corrente permitida, expresso como percentual da componente fundamental %
2	2
3	30.FP
5	10
7	7
9	5
$11 \leq k \leq 39$ (harmônicos ímpares)	3

Tabela 4 - Amplitude dos harmônicos [2]

Para enquadrar os dispositivos nessas normas, existem duas técnicas de correção do fator de potência: a ativa e a passiva. A solução passiva apresenta um custo reduzido e alta confiabilidade, além de ser simples. Já a solução ativa apresenta um custo elevado e menor confiabilidade, onde pode ocorrer elevados valores de corrente ou tensão nos transistores. [8]

Mesmo sendo de menor custo e melhor em relação à solução ativa, o uso do corretor de fator de potência passivo em reatores tem suas desvantagens. Essa técnica é somente eficaz quando utilizada junto com um filtro de entrada, que geralmente são de grande volume, necessário para eliminação dos harmônicos de alta frequência e evitar interferências eletromagnéticas. Outra desvantagem é que em determinadas potências, o uso da solução passiva pode causar um fator de crista na lâmpada superior aos limites das normas. [7]

Já na solução ativa, por fornecer uma tensão de barramento CC praticamente constante para toda faixa de potência processada pela lâmpada, o problema com o fator de crista que existe na passiva é minimizado [8]. Assim é utilizado um conversor *boost* em condução crítica no estágio de correção de fator de potência na maioria dos reatores, e também no reator utilizado neste trabalho. Uma de suas vantagens do uso deste tipo de estrutura é de existirem circuitos integrados de vários fabricantes de baixo custo, otimizados para esse tipo de configuração (como o L6561 utilizado neste trabalho), e por ter menor perdas de comutação devido a entrada em condução do interruptor do tipo ZCS (*Zero Current Switching*).

A figura 7 mostra o layout típico deste tipo de configuração.

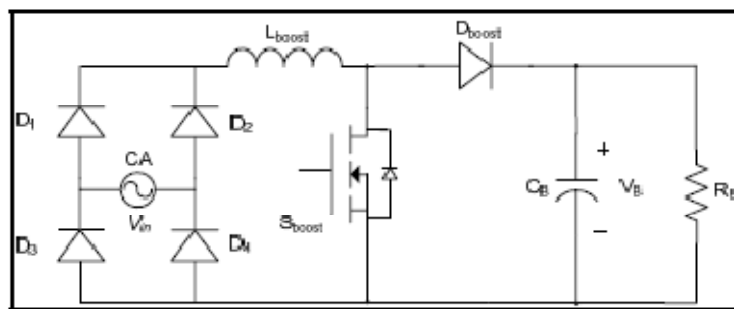


Figura 7 – Exemplo de configuração de um conversor *Boost* [8]

2.2.3. Filtros EMI

A interferência eletromagnética (EMI) está presente no nosso dia-a-dia, seja aquelas que são criadas naturalmente pelas chuvas, iluminação e até mesmo ventos fortes, quanto aquelas que são produzidas por produtos eletrônicos, como televisões, computadores e iluminação fluorescente, que é o caso do nosso trabalho. Todos os equipamentos fabricados hoje em dia possuem filtros EMI.

A interferência eletromagnética pode ser da forma conduzida, na qual o ruído se propaga através de condutores, fios, circuitos impressos ou componentes eletrônicos, como transformadores, indutores, capacitores, semicondutores e resistores. Na forma radiada (RFI), o ruído se propaga pelo ar ou espaço livre através de campos magnéticos ou ondas de rádio. RFI é geralmente controlado por uma blindagem metálica do material eletrônico que produz tais ruídos. [4]

A maioria dos equipamentos elétrico-eletrônicos podem gerar ou ser afetados por EMI, ou ambos os casos. Fontes existem em todos os lugares, como motores CA (corrente alternada), reatores eletrônicos, dimmers, fornos microondas, microprocessadores e fontes chaveadas.

Nas fontes chaveadas, uma alta tensão CC é chaveada em frequências que podem ir de 50 kHz a 1 MHz [4]. O processo de chaveamento de alta velocidade intrínseco neste tipo de fonte faz com que ela tenha uma melhor eficiência e tamanho menor, se comparada com uma fonte linear, mas também causa os indesejáveis EMI. Isso ocorre graças ao chaveamento dos MOSFET's, transistores e retificadores de saída.

Na fonte de qualquer equipamento, a função do filtro EMI é barrar qualquer ruído gerado internamente no dispositivo e prevenir que ruídos externos da rede de energia elétrica alternada entrem no mesmo. Esses filtros são formados por componentes passivos incluindo capacitores e indutores que formam circuitos LC.

Como as EMI são de maiores frequências que sinais normais, o filtro EMI funciona bloqueando seletivamente os sinais de alta frequência. Basicamente a parte indutiva do filtro é designada como um dispositivo que passa baixas frequências da rede e bloqueia as altas.

Outras partes do filtro usam capacitores para bloquear as altas frequências indesejáveis dos circuitos sensíveis. A rede resulta em um filtro EMI que reduz significativamente ou atenua qualquer sinal indesejado, tanto de entrar como de sair, protegendo o dispositivo.

Existem também os ruídos parasitas, que são gerados e transferidos em um circuito de modo inesperado, como por exemplo, semicondutores de chaveamento montados em uma PCB ou em um dissipador com um isolante fino pode conter pequenos elementos parasitas ou capacitivos. Esses elementos capacitivos em alta frequência, ou com um chaveamento muito rápido de pulsos, facilitam a transferência ou o acoplamento de ruídos parasitas para outras partes do circuito ou do sistema. O mesmo serve para todos os componentes eletrônicos. Por exemplo, transformadores têm elementos capacitivos entre seus enrolamentos que não podem ser totalmente eliminados, assim como capacitores e trilhas de circuitos impressos, que aparecem em altas frequências fazendo com que os ruídos se transfiram de um ponto a outro

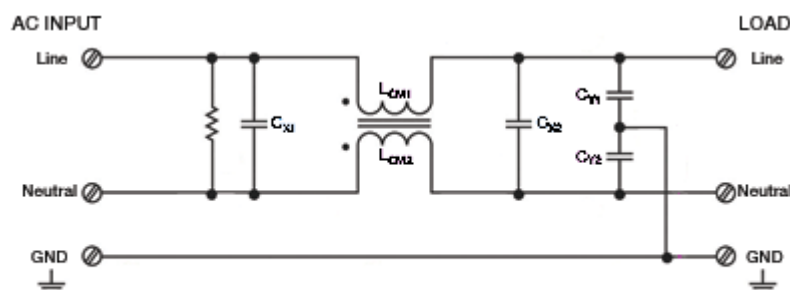


Figura 8 – Layout de um filtro EMI típico [4]

Apesar de todas as fontes CA/CC terem filtros EMI que atendem a várias normas EMC, existem casos em que os circuitos fornecem energia para gerar muito mais ruído elétrico que um filtro pode suprimir sozinho. Em outros casos, quando várias fontes estão trabalhando a partir da mesma fonte CA, uma pequena quantidade de ruído que não é filtrado ou contido pelo filtro EMI de cada fonte, pode combinar e formar um nível inaceitável de ruído.

Além disso, há vezes que a tensão CA que entra na fonte tem tanto ruído, que um filtro EMI adicional é necessário. Esse ruído pode ser em forma de fagulhas ou picos de energia. Isso pode ser gerado por causas naturais, como tempestades de raios, o podem ser ruídos feitos por pessoas operando equipamentos industriais que tem largos motores, atuadores, solenóides, etc.

Em todos esses casos pode ser necessário instalar um filtro EMI externo ou auxiliar, para que esses ruídos elétricos possam se enquadrar em níveis aceitáveis. Essas considerações devem ser tomadas em conta na instalação de todos os produtos eletrônicos e sistemas.

Filtros externos padrões EMI tipicamente tem um único estágio de circuito LC, similar ao apresentado na figura 8. Para um melhor desempenho de filtragem EMI, dois estágios LC podem ser necessários. E se fagulhas elétricas de motores e raios são um problema em potencial, filtros EMI com atenuação de pulso de alta frequência devem ser usados.

2.3. Métodos para o controle de Luminosidade (Dimerização)

Quando se trata de lâmpadas incandescentes, o controle de sua luminosidade é uma tarefa fácil. A variação de corrente que passa pela lâmpada altera a sua tensão, e conseqüentemente a potência que é consumida, alterando a intensidade de luz (quanto mais corrente, maior a intensidade). A simples associação de um potenciômetro em série já é o suficiente para se construir um dimmer.

Já nas lâmpadas fluorescentes, do ponto de vista elétrico, existe uma dificuldade maior de se fazer o controle de luminosidade. A característica tensão-corrente de um arco elétrico é de uma resistência negativa controlada por corrente [5], por isso se faz necessário o uso de reatores para controlar essa corrente que flui pela lâmpada. Os reatores que controlam também a intensidade da luz são chamados de reatores eletrônicos dimerizáveis.

Esses reatores eletrônicos que oferecem a opção de dimerização devem apresentar as mesmas características que um reator eletrônico convencional. Hoje em dia, intensas pesquisas na área de uso racional de energia, e do desenvolvimento de circuitos integrados dedicados (como o L6574 do reator utilizado neste trabalho), vem tornando cada vez mais viável este tipo de aplicação.

Dois aspectos são levados em conta para esse tipo de aplicação: a variação do fluxo luminoso é praticamente proporcional à potência processada pela lâmpada; e a dificuldade de variação ampla da luminosidade de uma lâmpada fluorescente, visto que abaixo de 30% de sua potência nominal ocorrem problemas de estabilidade. [5]

Os métodos de variação de luminosidade em um reator são: [8]

- variação da razão cíclica do estágio inversor;
- variação da frequência natural do tanque ressonante;
- variação da tensão do barramento CC;
- variação da frequência de comutação do inversor.

A dimerização utilizando o controle pela variação cíclica não é empregada em escala industrial por apresentar problemas relacionados com o fator de crista e com as perdas de comutação na operação em potência reduzida. Quando em baixa luminosidade, o valor da razão cíclica é pequeno e a comutação dos transistores passa a ser dissipativo, causando a redução no rendimento da estrutura e acentuando a emissão de interferência eletromagnética (EMI). [8]

O método de dimerização por variação na frequência natural do filtro LCC é feito através da alteração do parâmetro capacitivo do circuito. Essa estrutura, apresentada na figura 9, a frequência de comutação do inversor é mantida constante e o ângulo de condução de S_3 determina o valor da capacitância equivalente do circuito. Assim as características do filtro são modificadas e a corrente e tensão processadas pela lâmpada também, atuando no nível de potência transferido pela lâmpada.

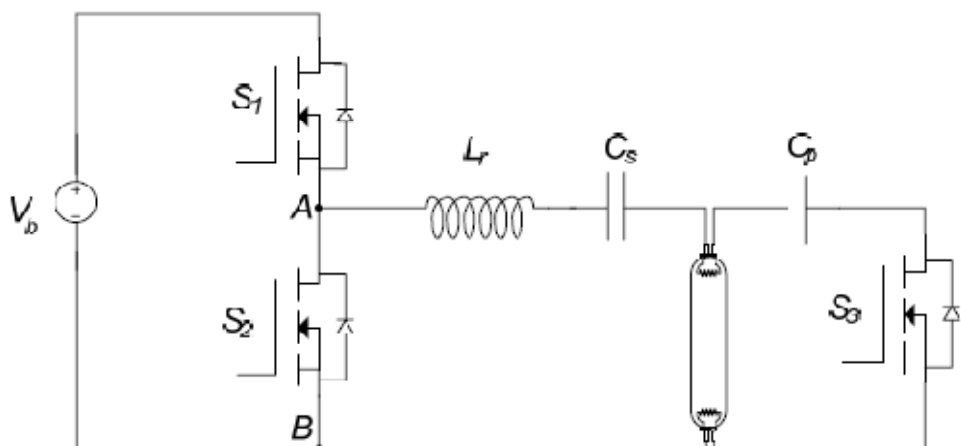


Figura 9 – Reator eletrônico dimerizável com capacitor comutado [8]

O método de controle da tensão do barramento CC consiste na concepção de conversores de estágio único, onde um interruptor é compartilhado entre o estágio PFC e o estágio inversor. Quando o reator precisa operar em toda faixa de tensão (90 a 240 volts) ou em grande faixa de variação de luminosidade, o método torna-se mais complexo. [8]

Já o método do controle de frequência do inversor (usado pelo CI L6574 do reator deste trabalho), a frequência de comutação dos transistores sofrerá variação na proporção direta da variação da quantidade de energia que será entregue à lâmpada. Assim o projeto apresenta melhor flexibilidade, onde o estágio PFC é projetado independentemente. [8]

3. Desenvolvimento

Este capítulo tem como finalidade apresentar o reator eletrônico usado neste trabalho, as modificações que foram feitas para que ele se adequasse aos objetivos finais.

Será mostrado o funcionamento do reator com o uso dos circuitos integrados L6561 e L6574, juntamente com os conceitos já apresentados no capítulo anterior.

3.1. O reator

Para realização deste trabalho, dentre os reatores oferecidos no mercado, foi escolhido um que utilizava o circuito integrado da ST Microeletronics L6574, que possui opção de dimerização.

O custo do reator é em média de 50 a 65 reais. Ele faz parte de uma família de reatores para lâmpadas T5, que possui modelos para Lâmpadas de 14, 28 e 54 watts. As tabelas abaixo contem as especificações de cada modelo da família.

Especificação	Lâmp.	Corpo	Tensão Nominal	Corrente Nominal	Temp. Ambiente	TC Máxima
PB-1X14	14W	Metálico	220V~	0,078A	10 a 50°C	75°C
PB-1X28	28W	Metálico	220V~	0,145A	10 a 50°C	75°C
PB-2X14	14W	Metálico	220V~	0,147A	10 a 50°C	75°C
PB-2X28	28W	Metálico	220V~	0,28A	10 a 50°C	75°C
PB-2X54	54W	Metálico	220V~	0,54A	10 a 50°C	75°C

Tabela 5 - Especificações dos reatores da marca

Especificação	Lâmp.	Fator de Potência	Potência	Fluxo Luminoso	Freq. Nominal de Saída	THD (Máx.)
PB-1X14	14W	0,99	16,5W	1	31kHz	10%
PB-1X28	28W	0,99	31,5W	1	31kHz	10%
PB-2X14	14W	0,99	31,25W	1	31kHz	10%
PB-2X28	28W	0,99	61W	1	31kHz	10%
PB-2X54	54W	0,98	116W	1	31kHz	10%

Tabela 6 - Especificações dos reatores da marca

Dentre os modelos, foi escolhido o PB-2X54 (o que suporta duas lâmpadas de 54 watts). A escolha de um modelo com uma lâmpada de potência maior se deve a uma melhor

manipulação do circuito integrado para dimerização, possibilitando o uso de uma faixa maior de tensão, facilitando o processo. A figura 10 mostra uma fotografia do reator.

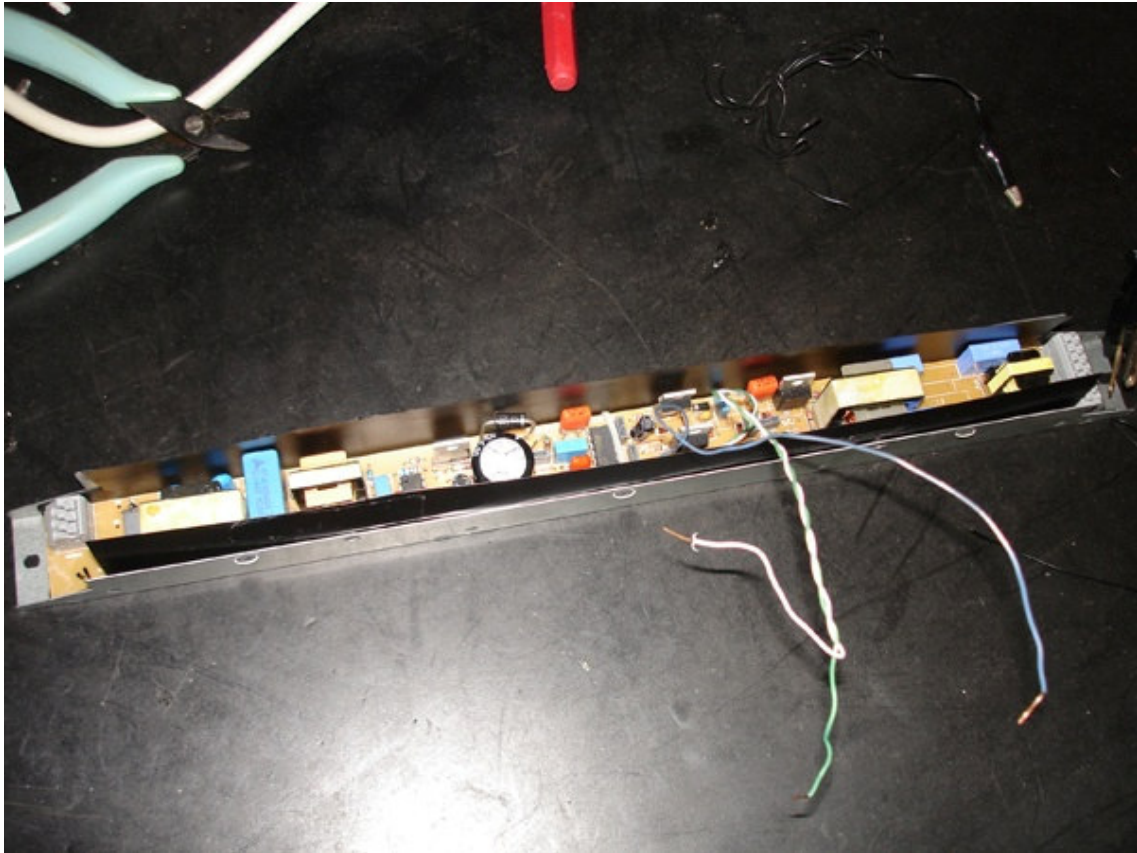


Figura 10 – Fotografia do reator escolhido

Com relação ao estágio de correção de fator de potência, os reatores da marca utilizam o circuito integrado L6561, que é também da ST Microelectronics, para o controle do conversor *Boost*.

Os próximos tópicos tratarão melhor o uso dos circuitos integrados nos estágios do controlador de fator de potência e do inversor.

3.2. Estágio corretor de fator de potência: CI L6561

A fim de atender as normas quanto a qualidade de energia elétrica e o conteúdo harmônico da corrente de entrada, no estágio de correção de fator de potência está o circuito integrado L6561 para controle do conversor *Boost*. Sua correção ativa propicia uma tensão de barramento CC praticamente constante para toda a faixa de potência processada pela lâmpada.

A tensão de entrada no CI pode variar de 85 a 265 volts, com um excelente THD (*Total Harmonics Distortion*). A figura 11 mostra o diagrama de blocos das principais funções do circuito. Outras funções não demonstradas são: função de desabilitar implementada no pino

ZCD (*Zero Current Detector* - que garante consumo baixo de corrente em modo *stand by*), proteção de sobretensão na saída, regulador de tensão linear que estabiliza as tensões de referência com erro inferior a 1% e um buffer de saída do tipo *totem pole* com capacidade de comandar diretamente o transistor, além de não necessitar de um filtro externo passa baixas para detecção de corrente. O dispositivo opera em modo de transição e é otimizado para aplicações no uso de reatores eletrônicos.

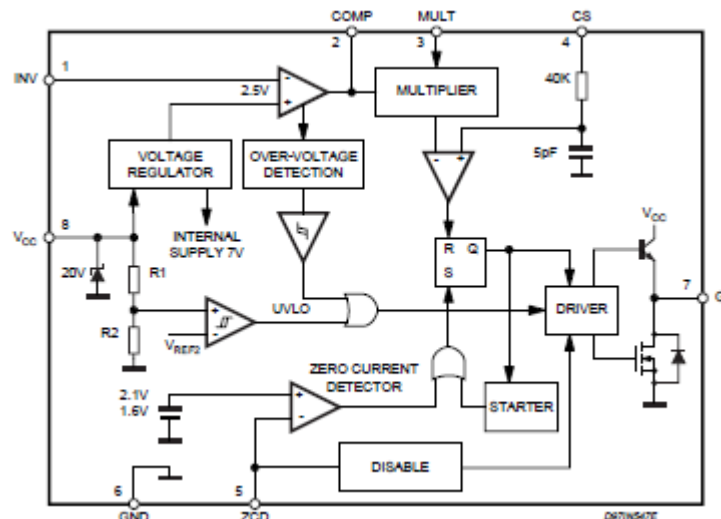


Figura 11 – Diagrama de blocos do funcionamento interno do CI L6561 [10]

Seu funcionamento ocorre a partir de uma tensão de saída que entra no pino 1 e é comparada com uma tensão de referência interna, gerando um sinal de erro que é multiplicado por uma amostra da tensão de entrada retificada no bloco multiplicador (pino 5). Como a constante de tempo do amplificador é elevada em relação ao período da tensão de rede, o resultado da multiplicação será um sinal senoidal retificado cujo valor de pico dependerá do valor de pico da tensão de entrada e do nível do sinal de erro.

O sinal de saída do multiplicador é conectado em um comparador de corrente CCS, que será usado como referência senoidal e definirá o valor da corrente de pico no indutor L_{boost} a cada período de comutação. O CCS compara o valor de tensão no resistor shunt (R6 – pino 4), com o valor da saída do multiplicador e determina o instante em que o transistor deve ser bloqueado. O *Latch RS* evita que ruídos acionem o transistor de forma involuntária.

Após o bloqueio do transistor, o indutor L_{boost} transfere sua energia para a carga até sua corrente se anular. Neste instante, o sinal proveniente do bloco detector de corrente nula (pino 5) faz com que o interruptor seja novamente comandado a entrar em condução. A forma de detectar se a corrente no indutor atingiu o valor zero é através de um sinal obtido de um enrolamento auxiliar de L_{boost} . Quando o conversor é energizado, o circuito de partida faz com que o transistor seja acionado, visto que não há sinal do bloco ZCD.



The diagram shows a power MOSFET driver circuit. The L6574 IC is the central component, with pins 1 through 16 labeled. It is connected to a +HVBus supply. The circuit includes a MOSFET Qh (high-side) and a MOSFET Ql (low-side). A transformer is used for the lamp load, with primary winding L_balast and secondary winding connected to the lamp. Various passive components are used for timing and protection, including resistors R1 through R9, capacitors C1 through C6, and diodes D1 through D4. A reference voltage Ref is applied to pin 4 of the L6574. The circuit is powered by CSupply and connected to ground.

Figura 14 – Sugestão do fabricante para o CI L6574 [12]

Toda sequência de ligação é dividida em três fases (que já foram descritas anteriormente): pré-aquecimento, ignição e de operação em regime permanente.

A etapa de pré aquecimento se caracteriza pela maior frequência de oscilação (f_{max}) por um período T_{pre} . Durante a ignição, a frequência vai de f_{max} para f_{min} (que é a frequência normal de operação) em um período. A figura 15 demonstra as etapas.

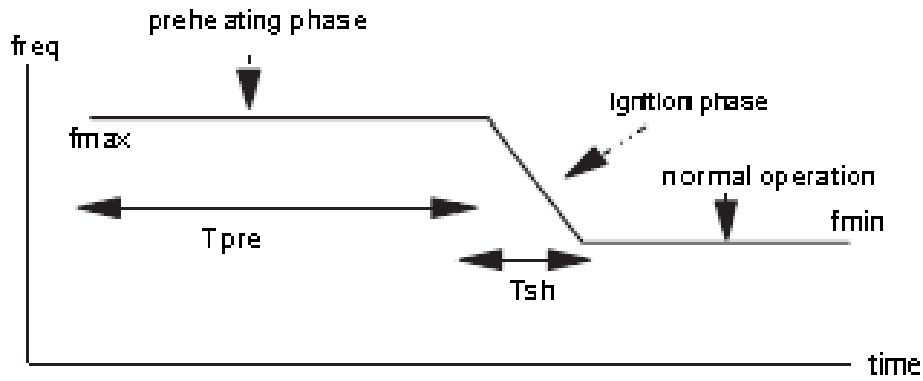


Figura 15 – Etapas do chaveamento de frequência [12]

T_{pre} e T_{sh} são ajustados pelo capacitor C_{pre} que é conectado no pino 1. Durante o tempo de pré aquecimento T_{pre} , o capacitor C_{pre} é carregado a partir de uma corrente I_{pre} gerada internamente, que não depende de componentes externos. A tensão em C_{pre} aumenta linearmente até o limiar em que a fase de pré-aquecimento termina.

$$T_{pre} = C_{pre} \cdot \frac{V_{th}}{I_{pre}} \quad (1)$$

Onde $V_{th} = 3,5V$ e $I_{pre} = 2,3\mu A$. Portanto:

$$T_{pre} = 1.5s/\mu F \cdot C_{pre} \quad (2)$$

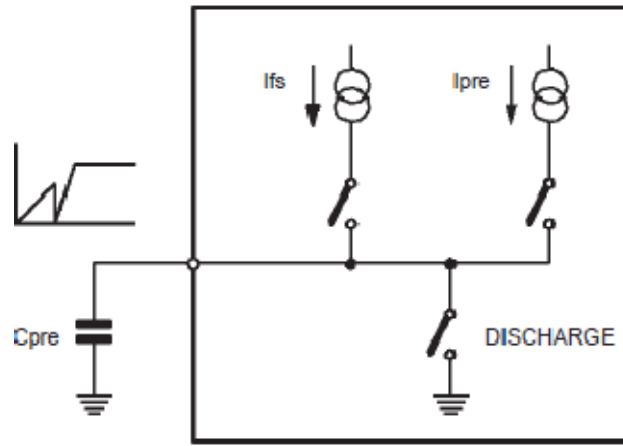


Figura 16 – Bloco temporizador [12]

Depois do tempo de pré aquecimento, o capacitor C_{pre} é rapidamente descarregado e carregado pela corrente I_{fs} , gerando uma segunda rampa de tensão, na qual alimenta um amplificador de transcondutância, como mostrado na figura 17.

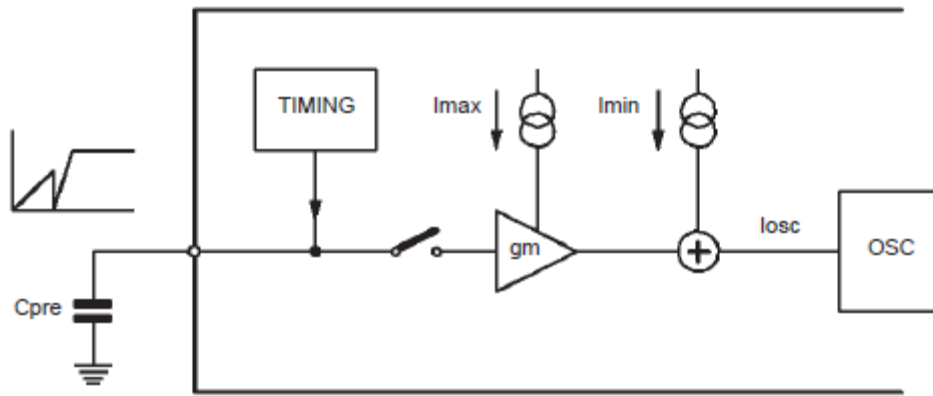


Figura 17 – Bloco do oscilador [12]

Então esse sinal de tensão é convertido em uma corrente crescente na qual é subtraída por I_{max} , para produzir a mudança da frequência de f_{max} para f_{min} . A corrente que comanda a frequência do oscilador durante a mudança é igual a:

$$I_{osc} = I_{min} + (I_{max} - g_m V_{C_{pre}}(t - T_{pre})) = I_{min} + \left(I_{max} - \frac{g_m I_{fs}}{C_{pre}}(t - T_{pre}) \right) \quad (3)$$

Onde,

$$I_{min} = \frac{V_{REF}}{R_{ign}}, I_{max} = \frac{V_{REF}}{R_{pre}}, V_{REF} = 2V \quad (4)$$

R_{ign} e R_{pre} são resistores conectados ao pino 4 e ao pino 2.

No final do tempo de pré-aquecimento ($t = T_{pre}$), o circuito integrado oscila com f_{max} , a partir de:

$$I_{osc}(T_{pre}) = I_{osc}(0) = I_{min} = I_{max} = V_{REF} \left(\frac{1}{R_{ign}} + \frac{1}{R_{pre}} \right) \quad (5)$$

Que significa que a sequência de pré-aquecimento depende de R_{ign} e R_{pre} .

Após o período de T_{pre} e T_{sh} , o segundo termo da equação (3) vai a zero, e a frequência de mudança é comandada somente por I_{min} .

$$I_{osc}(T_{sh}) = I_{min} = \frac{V_{REF}}{R_{ign}} \quad (6)$$

Assumindo que o segundo termo da equação (3), nós temos:

$$I_{max} - \frac{g_m I_{fs}}{C_{pre}} T_{sh} = 0 \rightarrow T_{sh} = \frac{C_{pre} I_{max}}{g_m I_{fs}} \quad (7)$$

Note que não há um limiar de tensão sobre C_{pre} na qual a ignição termina. T_{sh} depende de C_{pre} , I_{max} , g_m , e I_{fs} (equação 7). Fazendo T_{sh} independente de I_{max} , a corrente I_{fs} foi designada para ser somente uma fração de I_{max} então:

$$I_{fs} = \frac{I_{max}}{K} \rightarrow T_{sh} = \frac{C_{pre} I_{max}}{g_m I_{max} K} \rightarrow T_{sh} = \frac{C_{pre}}{g_m K} \rightarrow T_{sh} = k_{fs} C_{pre} \quad (8)$$

Desta maneira, a frequência de mudança depende somente do capacitor C_{pre} . O valor típico da constante k_{fs} (*frequency shift time*) é 0,15s/μF, portanto:

$$k_{fs} = k_{pre}/10. \quad (9)$$

Então escolhendo C_{pre} , você estará escolhendo T_{pre} e T_{sh} .

As frequências f_{min} e f_{max} dependem dos resistores R_{pre} e R_{ign} , mas também do capacitor C_f (pino 3). f_{min} depende de C_f e R_{ign} , então com R_{pre} a variação de frequência é setada. As equações simplificadas a seguir podem ser usadas.

$$f_{min} = \frac{1.41}{R_{ign} \cdot C_f} \quad (10)$$

$$f_{max} = \frac{1.41 \cdot (R_{pre} + R_{ign})}{R_{pre} \cdot R_{ign} \cdot C_f} \quad (11)$$

A figura 18 mostra a relação entre os valores calculados e os valores medidos, mostrando a validação das equações.

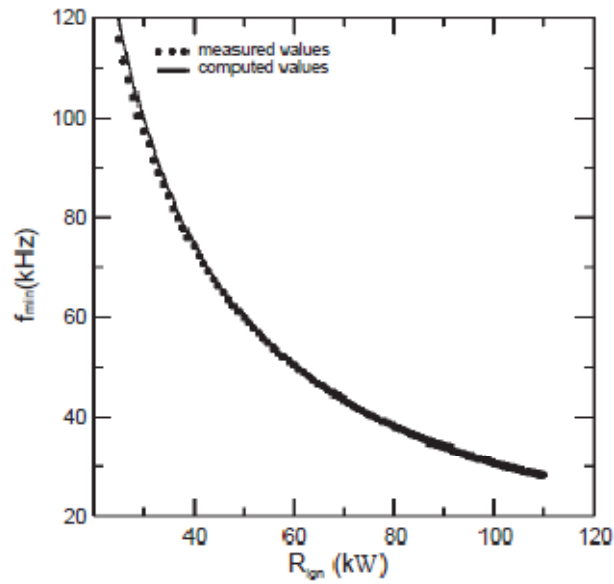


Figura 18 - frequência de operação com $C_f=470\text{pF}$ [12]

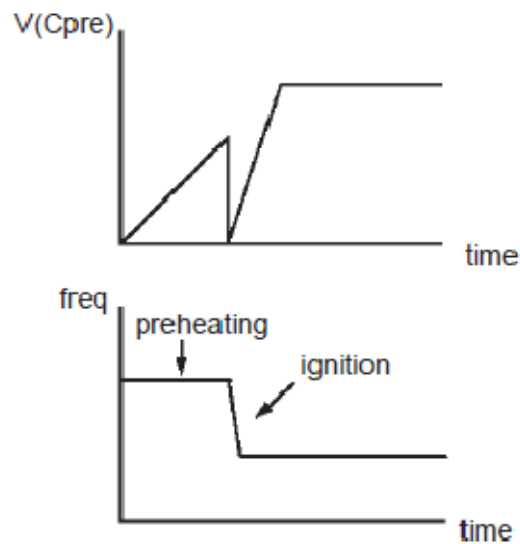


Figura 19 - tensão e chaveamento de frequência em Cpre [12]

O circuito *Bootstrap*:

Este circuito é necessário para que se tenha uma alta tensão na saída do inversor. Este circuito é normalmente acompanhado por um diodo rápido como na figura 20. No circuito integrado L6574 ele não é necessário, existe uma função própria para isso no pino 16 (V_{BOOT} da figura 21).

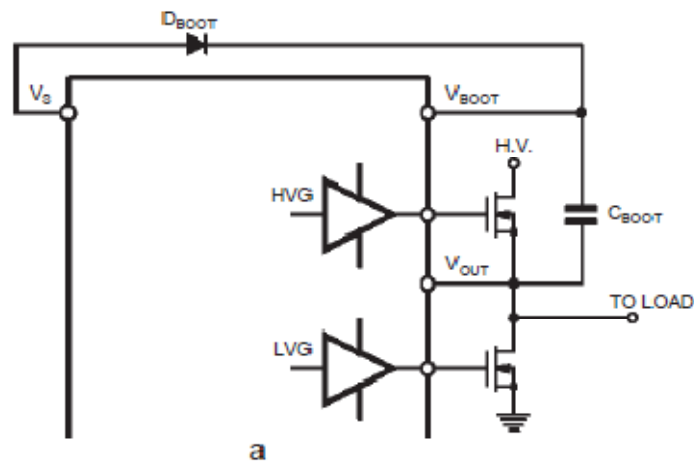


Figura 20 - circuito *Bootstrap* [12]

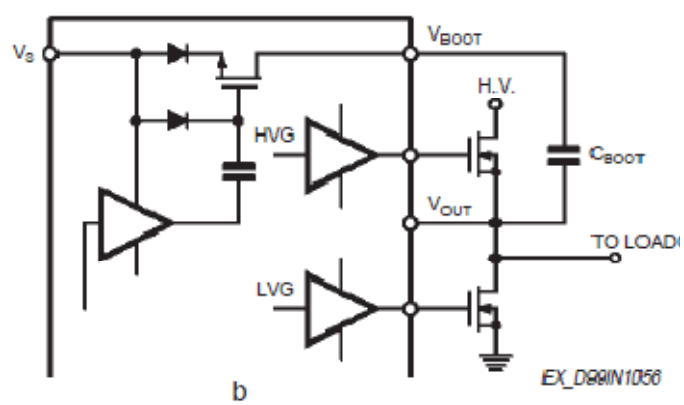


Figura 21 - Circuito *Bootstrap* implementado no CI L6574 [12]

4. Implementação da dimerização

Os reatores de mercado normalmente são aplicados a um par de lâmpadas, e o nosso reator como o seu nome diz (PB-2X54) é para duas lâmpadas de 54 watts. Como o *aplication note* do circuito integrado foi desenvolvido para uma só lâmpada, e a dificuldade existente de se fazer uma solução que eliminasse os efeitos estroboscópicos provocados pela falta de simetria nos dois ramos que ligam as lâmpadas, houve a necessidade de modificação do circuito.

Assim foi retirado um dos indutores do filtro LCC de uma das lâmpadas, e na extremidade da outra lâmpada, houve a necessidade de se ligar um dos ramos do filamento com um ramo do filamento de entrada da mesma.

Com o reator funcionando com uma só lâmpada, a primeira medida tomada para o da dimerização foi o ajuste da resistência R_{IGN} (ou R19) de 100 k Ω para 78 k Ω . Ela é responsável pelo controle da corrente em C_f após a etapa de pré-aquecimento, e como foi mostrado no item 3.3 pela equação 10, R_{ign} participa diretamente da frequência de operação (f_{min}).

Observando agora o funcionamento interno do circuito integrado L6575, vemos um amp-op com entradas no pino 6 e 7, e saída no pino 5. Através do circuito de malha fechada realimentado pelo próprio chaveamento em alta frequência do circuito integrado L6574, podemos fornecer uma tensão de referência na entrada não inversora do amp-op, e assim excursionar a frequência de funcionamento da lâmpada.

A figura 22 mostra a configuração da ligação a que foi referida.

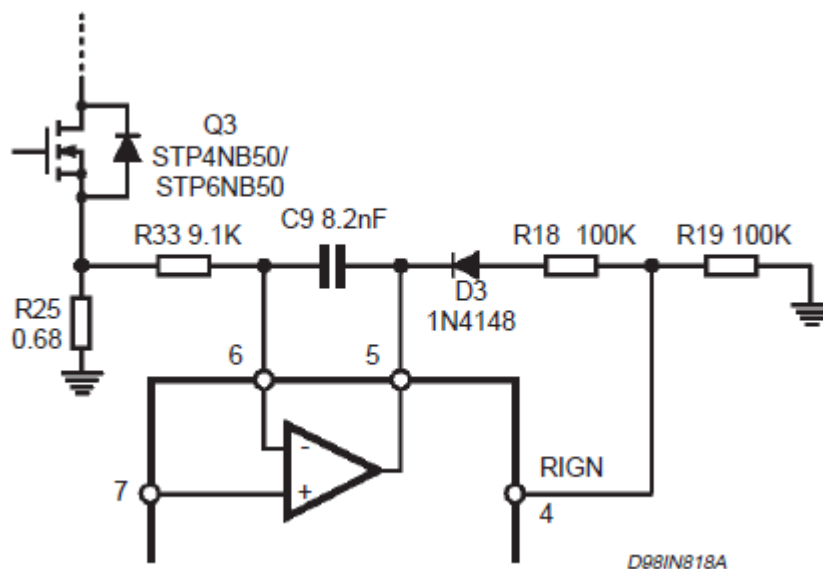


Figura 22 – *feedback* de corrente [12]

Deste modo, podemos variar a tensão do pino 5 (V5) acrescentando uma fonte de tensão variável no pino 7. Assim se a tensão no pino 5 for maior que a do pino 2 ($V_2 = 2V$), não haverá corrente em R18 e a frequência de operação será igual a f_{min} (equação). Porém se a tensão no

pino 5 for menor que a do pino 2, haverá uma corrente que percorrerá a combinação em paralelo de R18 e R19 (R_{ign}). Assim a frequência de operação passará a obedecer a equação 12: [12]

$$f_{work} = \frac{1.41}{(R_{ign} // R18_{equ}) \cdot C_f} \quad (12)$$

Onde $R18_{equ}$ passa a depender das tensões do pino 2 e 5, e do diodo D3 [12]. A equação 13 mostra essa relação.

$$R18_{equ} = \frac{V2 \cdot R18}{V2 - V_{diode3} - V5} \quad (13)$$

Primeiramente foi utilizado o próprio circuito do reator para modificar esse referencial de tensão do pino 7. A figura 23 mostra o divisor de tensão formado pelo potenciômetro R14 com os 2V fixos no pino 2.

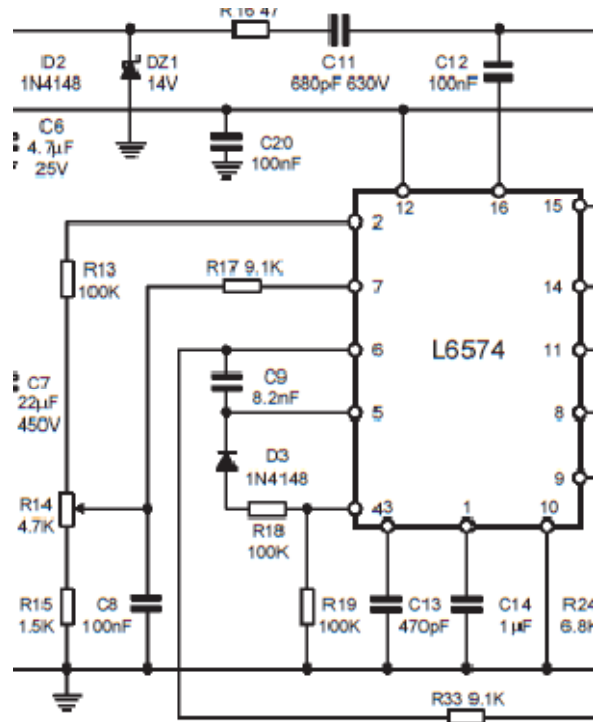


Figura 23 – Referencial de tensão no pino 7 [12]

O próximo passo foi desacoplar essa fonte de tensão do capacitor C8, que está em série com a resistência R17. Através de uma fonte de tensão externa, pode-se variar a intensidade da luz com a mesma tensão que o potenciômetro R14 proporcionava ao capacitor (que era na faixa

de 0 a 200 mV). Valores de resistência R17 menores também contribuíram para o aumento da faixa de intensidade de dimerização.

Assim foram usados dois tipos de implementação para variar a tensão no pino 7 sem o uso de uma fonte. A primeira foi o uso de uma bateria de NiMH, e a segunda através de um PWM do circuito integrado 555.

4.1. Implementação usando uma bateria de NiMH

Para validar a proposta de se variar a intensidade da lâmpada, sem ter que usar uma fonte de tensão, foi montado um circuito divisor de tensão com uma bateria AA de NiMH. Sua tensão é de aproximadamente 1,30V.

A figura 24 mostra uma fotografia do circuito

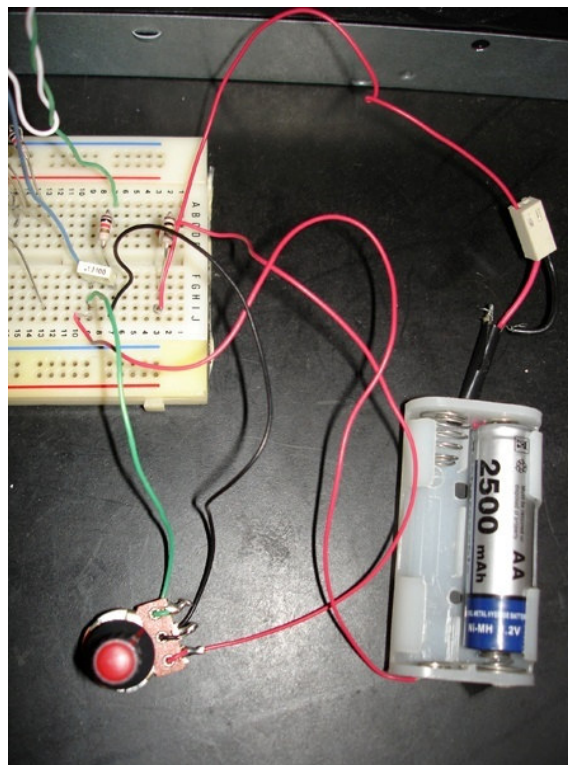


Figura 24 – fotografia do circuito com a bateria NiMH

Para o divisor de tensão, foi utilizado um potenciômetro de 20k Ω em série com uma resistência de 100k Ω . Assim a tensão total em cima do potenciômetro, que está em paralelo com o capacitor do reator, vai de 0 a aproximadamente 220mV. A figura 25 mostra o esquema da configuração do circuito.

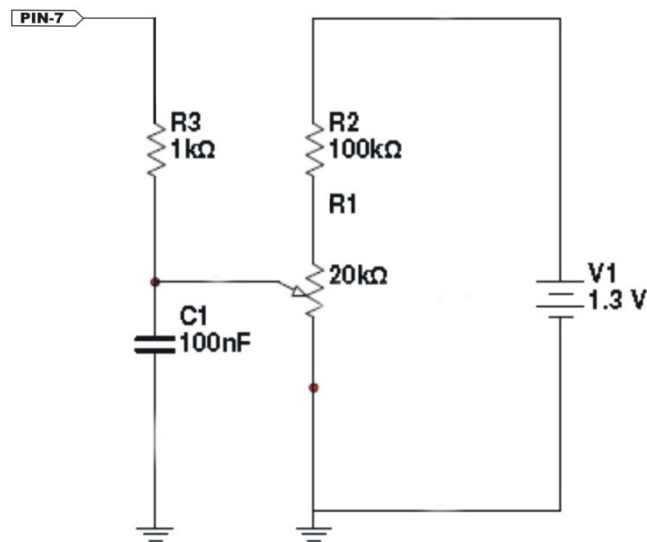


Figura 25 - esquema do circuito usando a bateria

4.2. Implementação usando PWM

Outra forma de se eliminar o uso da fonte de tensão foi utilizando um PWM, que é um trem de pulsos onde dependendo da sua largura se tem uma tensão, através do circuito integrado 555.

Assim será explicado o funcionamento do PWM do circuito integrado 555, e também do circuito montado para os fins deste trabalho.

4.2.1. Modulação em largura de pulso (PWM)

O pulso do PWM é uma onda quadrada, onde dependendo do período que a saída fica em alto, você consegue um valor de tensão RMS correspondente. A figura 26 exemplifica esta propriedade.

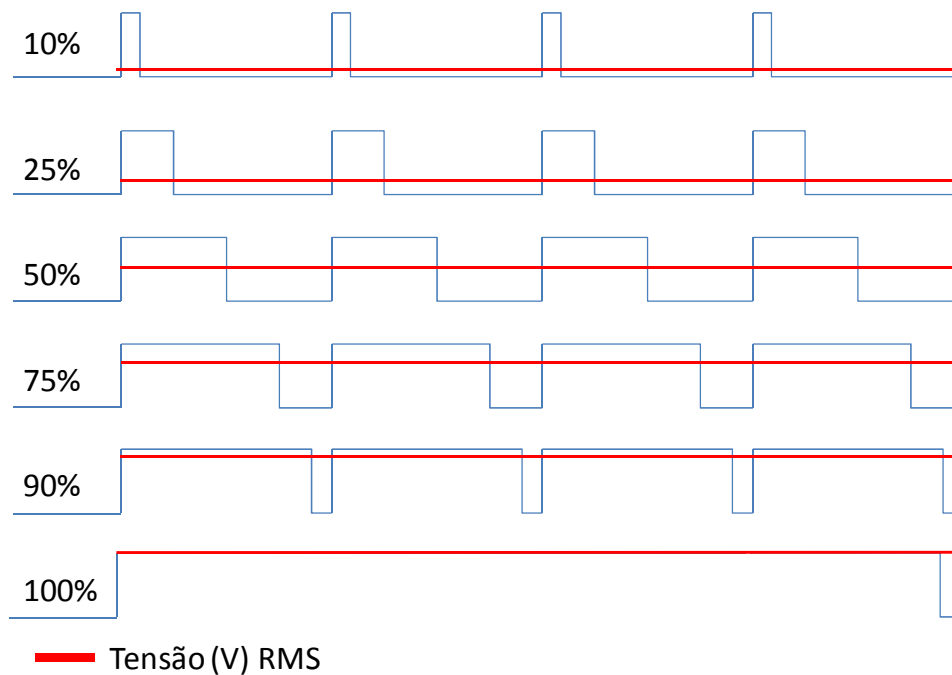


Figura 26 – Pulsos PWM

Esse período em que a onda fica em alto também pode ser chamado de *duty cycle*.

O *duty cycle* é a proporção de tempo durante o qual um componente, dispositivo ou sistema está em operação.

Por exemplo, suponha que um drive de disquete opera por 1 segundo, fica desligado por 99 segundos, volta a estar ativo por mais 1 segundo e assim por diante. Assim, dentro de cada período de 100 segundos, o drive fica ativo por 1 segundo. Neste caso, o *duty cycle* é de 1/100, ou 1%.

Chamando T1 à duração de trabalho (ligado) e T2 à duração do repouso (desligado), a duração total deste ciclo é $T = T1 + T2$. O ciclo de trabalho é a percentagem do tempo total que o dispositivo está na posição de trabalho.

Em um fenômeno periódico, *duty cycle* é razão entre o tempo de duração da onda e o tempo total do período.

$$duty\ cycle = \frac{\tau}{T} \quad (12)$$

Onde τ é o intervalo de tempo no qual a função é não-nula, dentro de cada período, e T é o período da função.

Por exemplo, em um trem de pulsos retangulares ideal, o *duty cycle* é a duração do pulso dividido pelo período. Para um trem de pulsos no qual a duração do pulso é de 1 μs e a duração do período é de 4 μs , o *duty cycle* é de 0,25. Da mesma forma, o *duty cycle* de uma onda quadrada é 0,5, ou 50%

No projeto em questão, em vez de gerar uma tensão contínua, é gerado um trem de pulsos retangulares de alta frequência. Dessa forma, a tensão pode ser regulada com base no *duty cycle* da onda, já que a tensão média gerada é função do tempo que a onda fica em nível alto. Assim a tensão é gerada em paralelo ao capacitor de 100nF do reator, entregando a tensão no pino 7 do circuito integrado L6574.

Por exemplo, uma modulação PWM de amplitude 12V e duty cycle de 75% produz o mesmo efeito de uma tensão contínua de 9V ($12 \times 0,75 = 9$).

4.2.2. O circuito integrado 555

O circuito integrado 555 foi inicialmente introduzido no mercado em 1971 pela Signetics, empresa que mais tarde foi adquirida pela Philips. Ele tem aplicações de temporização ou como multivibrador, e continua ainda sendo usado em larga escala devido a sua simplicidade de uso, baixo preço e boa estabilidade.

Ele é composto por 23 transistores, 2 diodos e 16 resistores em um chip de silício, com um encapsulamento de 8 pinos duplo em linha (DIP). A figura 27 mostra o diagrama de blocos do funcionamento interno do 555. Ele possui três modos de operação: modo monoestável, ástavel e biestável.

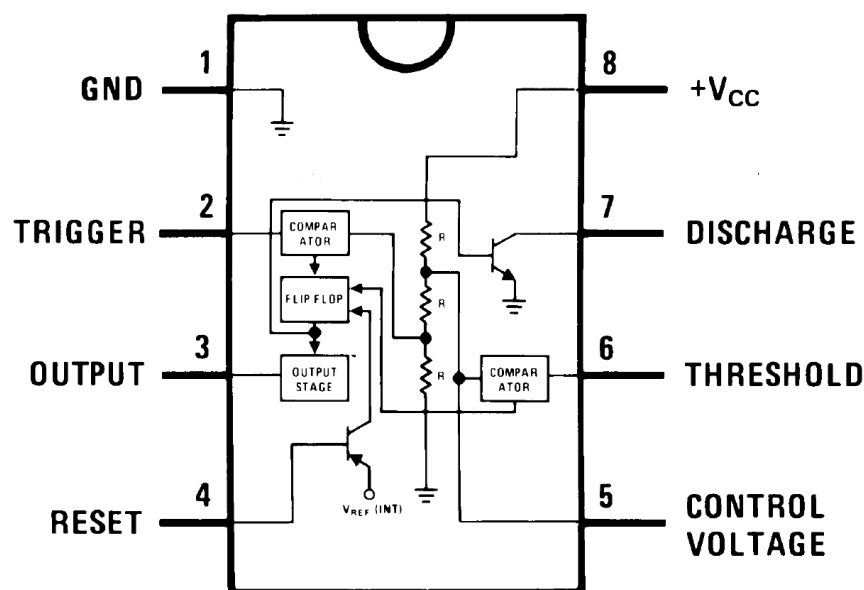


Figura 27 – Diagrama de blocos do circuito integrado 555 [13]

Sua tensão de alimentação deve estar entre +5 e +15 volts. O pino 2 é usado como o trigger, onde um valor de tensão menor que 1/3 de V_{cc} ativa o biestável interno e a saída. O pino 5 permite o controle de tensão no divisor interno. No pino 6, um valor superior a 2/3 de V_{cc} permite o desligamento do biestável interno e da saída. No pino 7 fica o capacitor cujo tempo de descarga irá influenciar no período de temporização. Na saída, que é o pino três,

pulsos de onda quadrada são disparados, onde eles ficam em um período de tempo em alto igual ao valor da resistência multiplicado pelo valor da capacitância do pino 7.

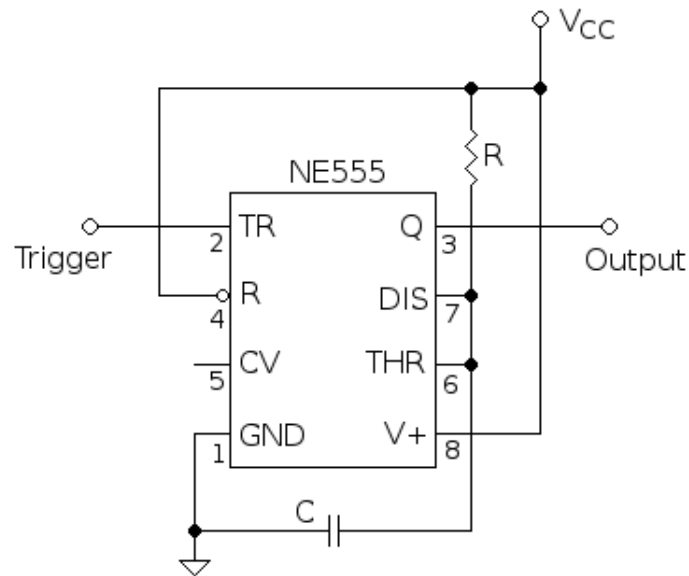


Figura 28 – Exemplo simplificado de configuração do 555 [14]

Assim o circuito integrado pode ser utilizado para inúmeras aplicações, com muitos outros modos de configuração.

Para a configuração de PWM, o temporizador é conectado como monoestável e é disparado por um trem de pulsos contínuo, a largura do pulso de saída pode ser modulada por um sinal aplicado no pin 5. A Figura 39 mostra o circuito do modulador PWM.

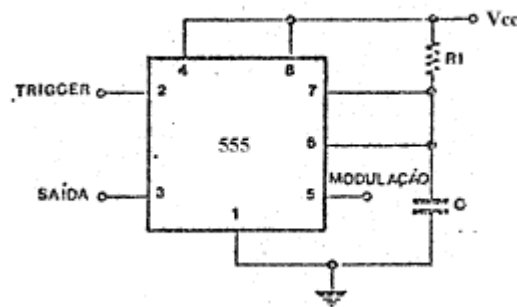


Figura 29 – Configuração do 555 no modo de PWM [15]

4.2.3. O circuito de PWM utilizado neste trabalho

Para este trabalho foi montado o 555 na configuração PWM mostrada na figura 30. Na saída do pino 3 foi montado um divisor de tensão para que se pudesse ter os 200 mV iniciais que haviam no capacitor. Assim temos duas resistências de 100k Ω em série com uma

resistência de $4,7k\Omega$, na qual está em paralelo com o capacitor de $100nF$ do circuito do reator, e fornece uma variação de 0 a aproximadamente $200mV$.

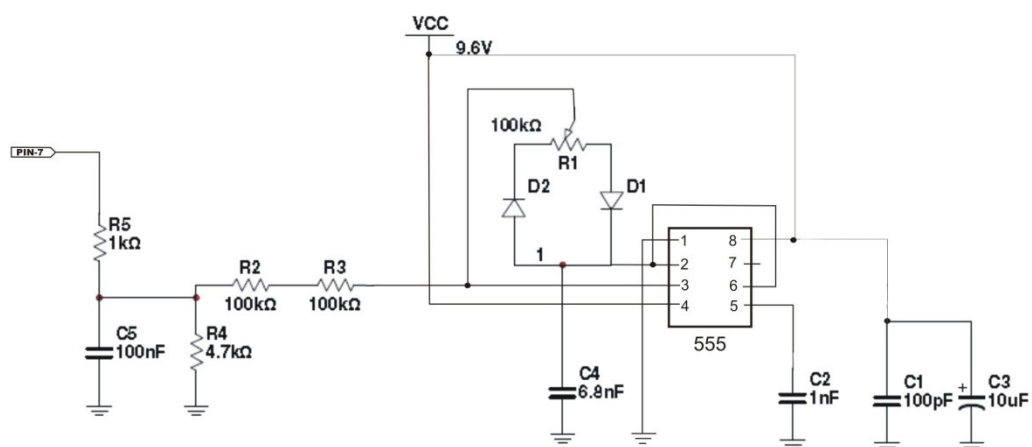


Figura 30 – Esquema usando o circuito integrado 555

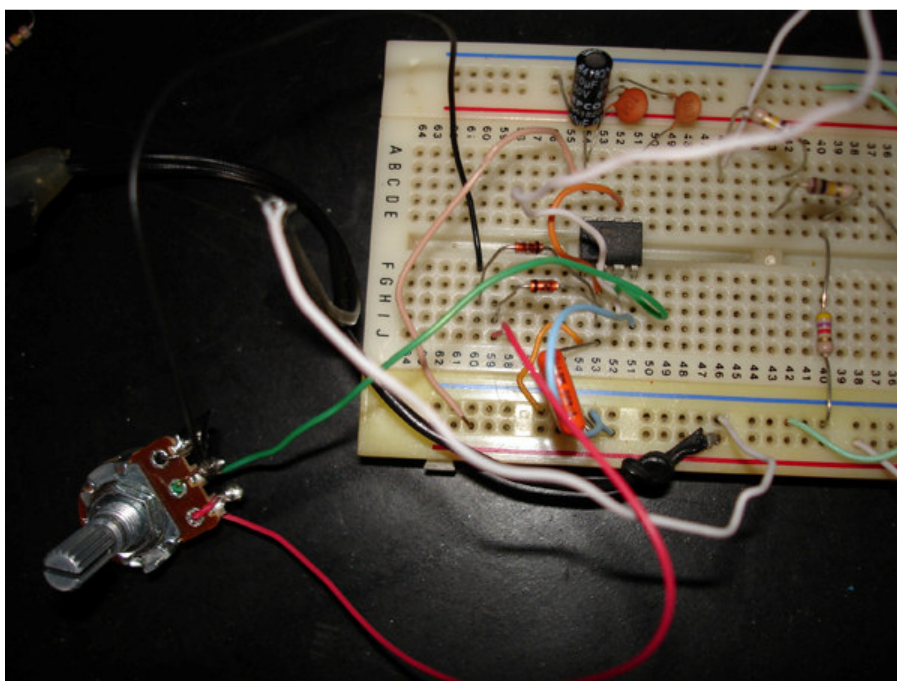


Figura 31 – Fotografia do circuito usando o 555

5. Ensaios e resultados

Para que se fosse possível a realização das medidas deste trabalho, foi utilizado o laboratório de eletrônica de potência do Departamento de Engenharia Elétrica. Assim foi utilizado o osciloscópio digital da Tektronix TDS 3034B para obter as formas de onda.

Primeiramente foi feito um ensaio com a solução que utiliza a bateria de NiMH como fonte de tensão, como teste para o uso de uma tensão externa. A figura 32 mostra as formas de onda na entrada de energia do reator quando a intensidade da luz é mínima.

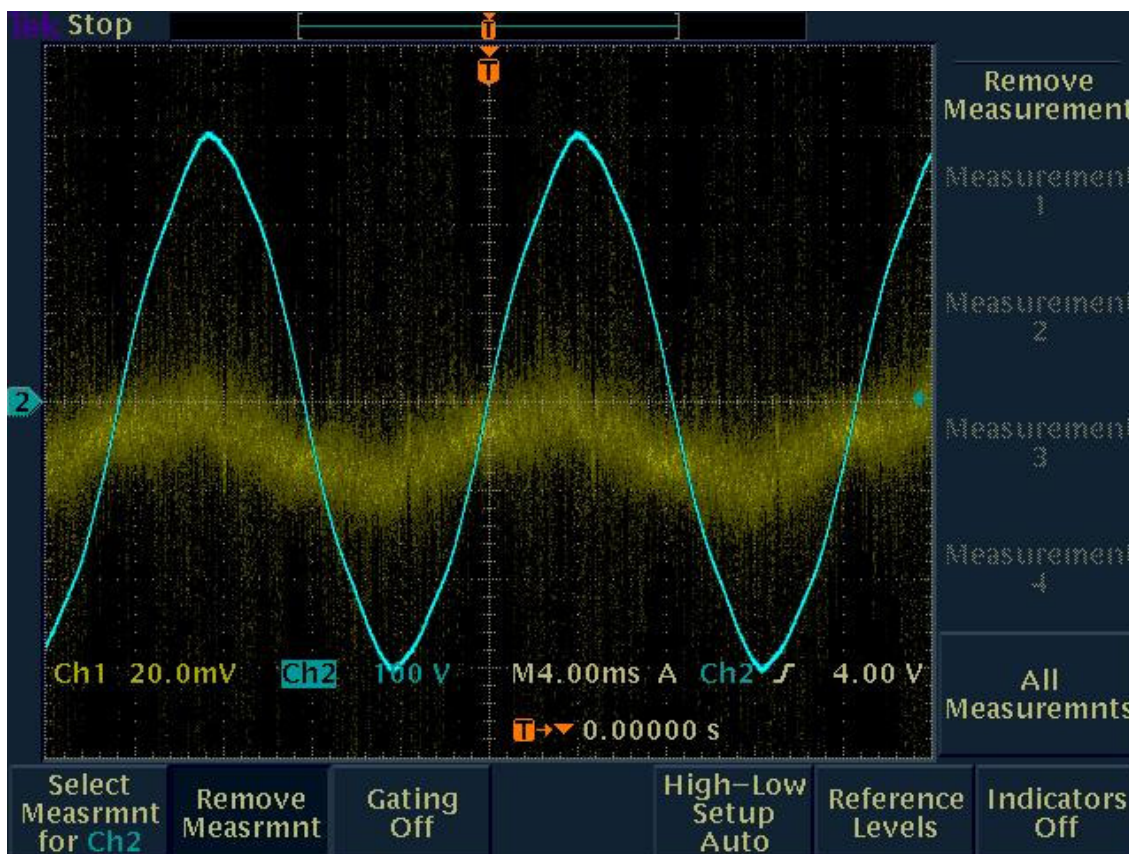


Figura 32 – Formas de onda da entrada usando o circuito da bateria (intensidade de luz mínima)

A curva senoidal azul é a tensão de entrada do reator, de $206 V_{RMS}$, e a curva senoidal amarela é a de corrente (obtida via um resistor shunt de $0,05 \Omega$). Observamos que a corrente se encontra praticamente em fase com a tensão (muito pouco defasada), assim apresentando um valor muito próximo do fator de potência 1. Existe também na forma de onda da corrente um conteúdo de ruído de alta frequência proveniente do circuito de chaveamento do conversor *Boost*, e que está presente em todos os resultados. Ela também apresenta um nível CC negativo em toda faixa de operação (sinal deslocado um pouco abaixo do eixo x), desta forma foi avaliado o valor RMS fundamental.

Portanto no valor de mínima intensidade da luz, onde 20 mV eram entregues ao divisor de tensão, tínhamos 17,5 mV_{RMS} e 862 μV_m , tendo assim uma corrente harmônica de aproximadamente 350 mA.

A figura 33 mostra as formas de onda para a intensidade máxima de luz, onde se tinha uma tensão 68 mV no divisor.

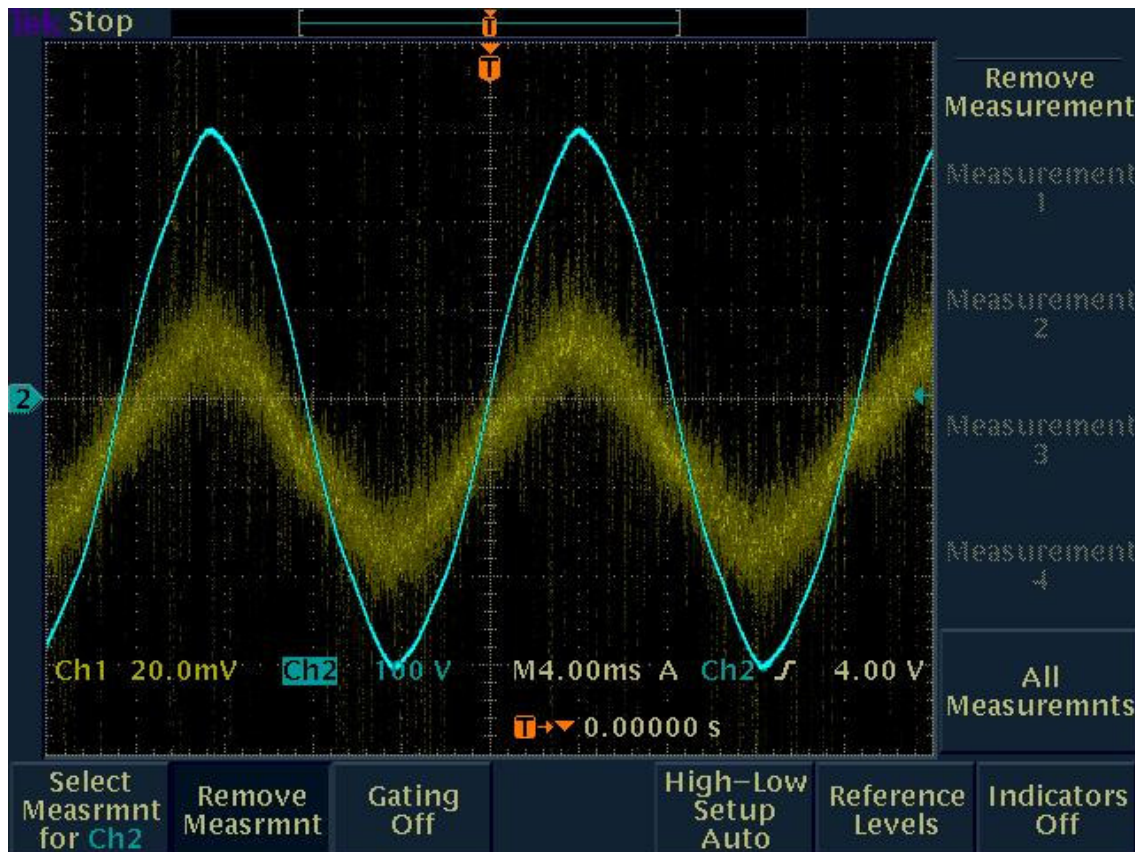


Figura 33 – Formas de onda da entrada usando o circuito da bateria (intensidade de luz máxima)

Assim temos um valor de aproximadamente 463 mA de corrente.

Sendo possível o uso de uma fonte de tensão externa sem alterar o fator de potência, o próximo passo feito foi a montagem do circuito que usa o PWM do 555 como fonte de tensão. A figura 34 mostra as formas de onda da saída do pino 3 do 555, aonde sai o PWM.

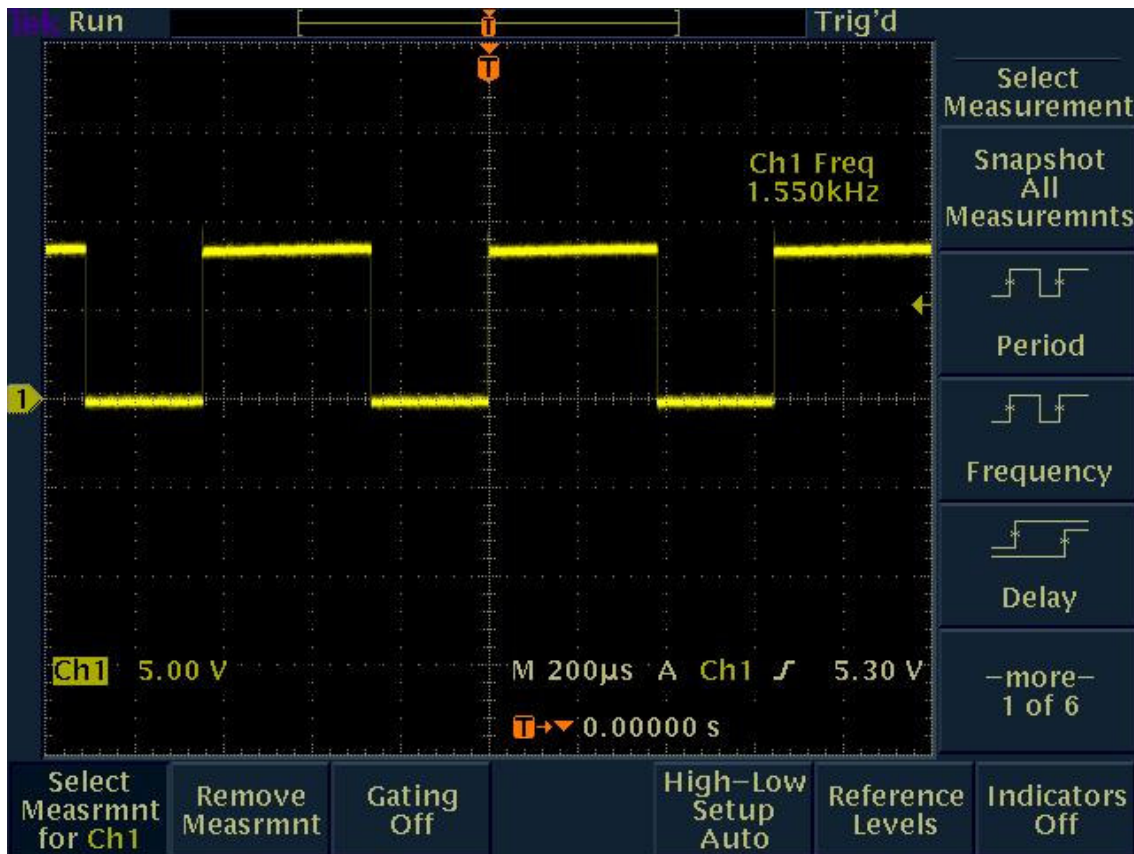


Figura 34 – Formas de onda no pino 3 do 555(PWM)

Observamos que o valor da frequência dos pulsos é de 1550 kHz.

O valor fornecido pelo PWM no divisor de tensão, para que se houvesse uma intensidade mínima de luminosidade, foi de 860 mV. A corrente de entrada tem valor de aproximadamente 430 mA.

Para um valor de máxima intensidade de luz, o PWM fornece uma tensão de 2,3. Temos portanto o valor de aproximadamente 466 mA de corrente.

As figuras 35 e 36 mostram as formas de onda encontradas usando o circuito do 555 com uma intensidade mínima e máxima de luz respectivamente.

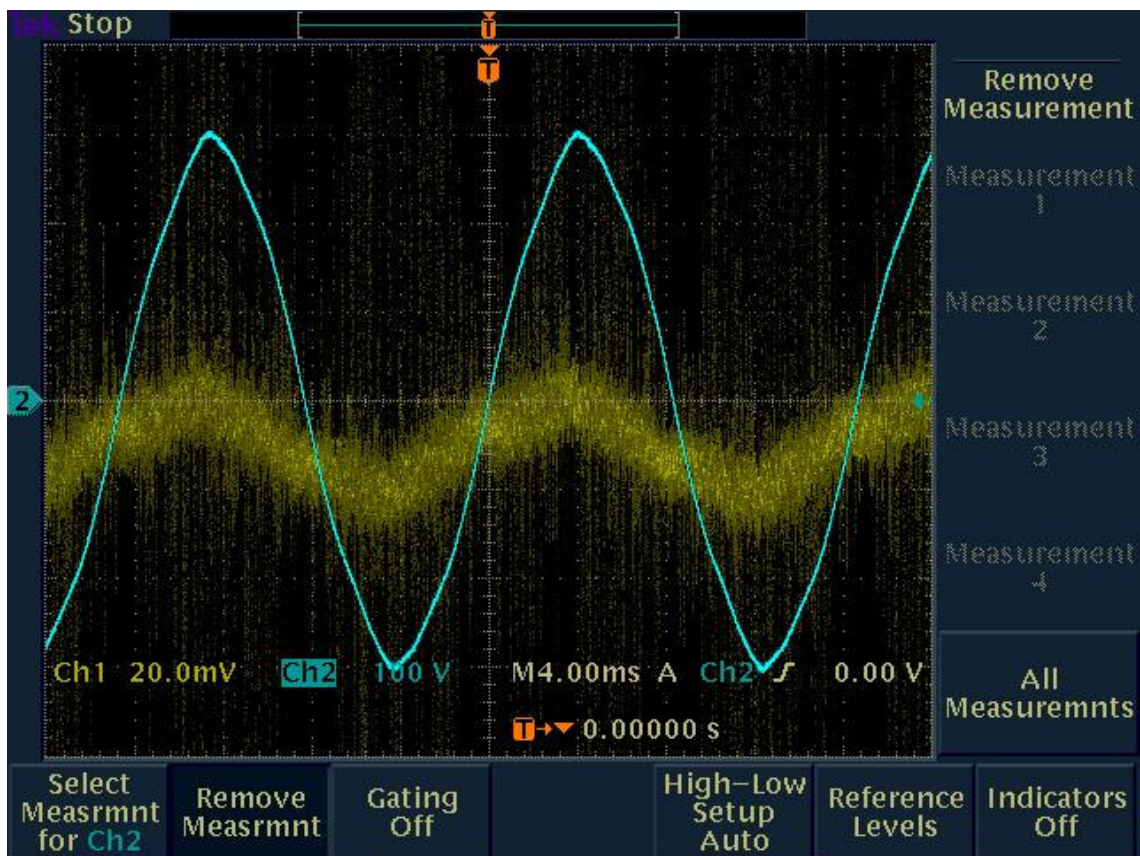


Figura 35 – Formas de onda da entrada usando o circuito com o 555 (intensidade de luz mínima)

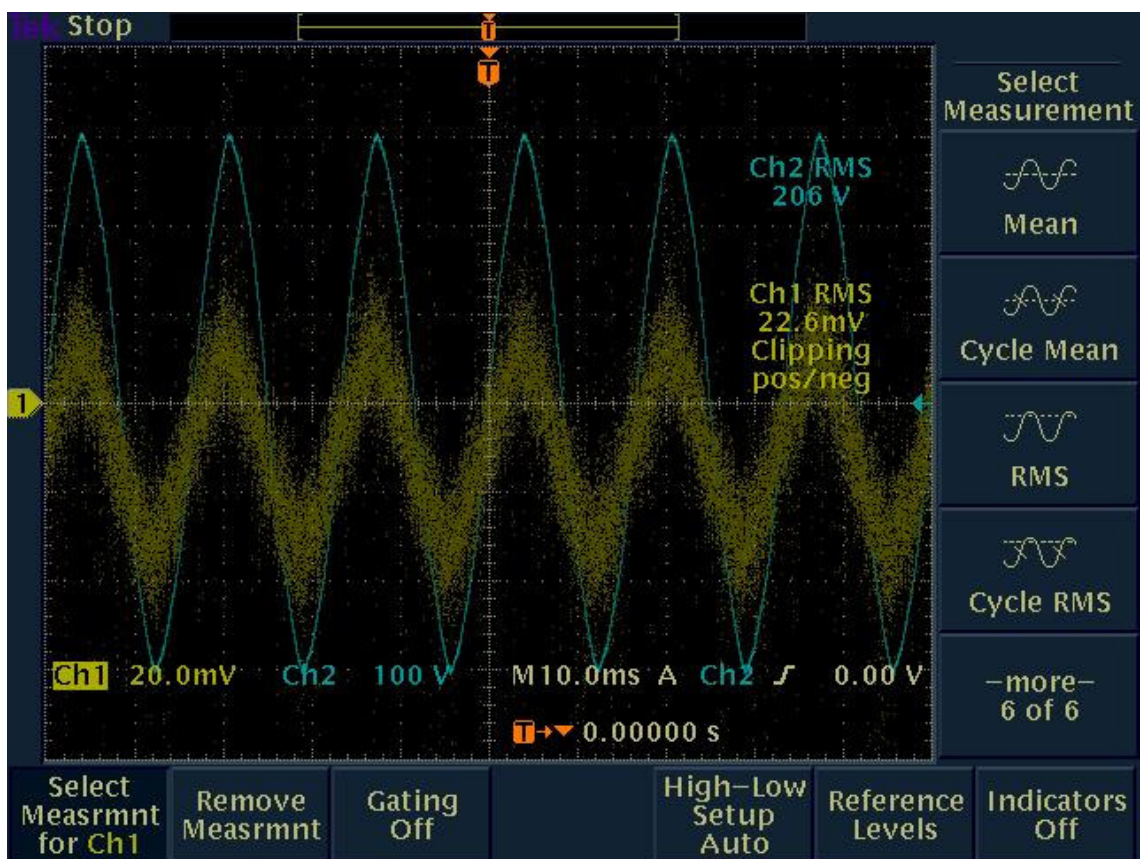


Figura 36 – Formas de onda da entrada usando o circuito com o 555 (intensidade de luz máxima)

Portanto, tanto na intensidade máxima de luz quanto na mínima, o circuito que foi acoplado junto com o reator eletrônico não afeta o conjunto em termos de fator de potência.

Para poder comprovar a dimerização da lâmpada foram medidos a frequência, corrente (com o resistor shunt $0,05\Omega$) e tensão da lâmpada fluorescente, em função da tensão entregue pelo circuito PWM. A tabela 7 mostra os valores obtidos.

PWM (V)	V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	Frequência (kHz)
2,97	108	1,14	31,50
2,50	107	1,16	31,50
2,01	107	1,10	31,30
1,55	131	1,04	40,42
1,23	147	1,44	50,20
0,98	162	1,84	53,38

Tabela 7 – Tensão, corrente e frequência na lâmpada em função da tensão do PWM

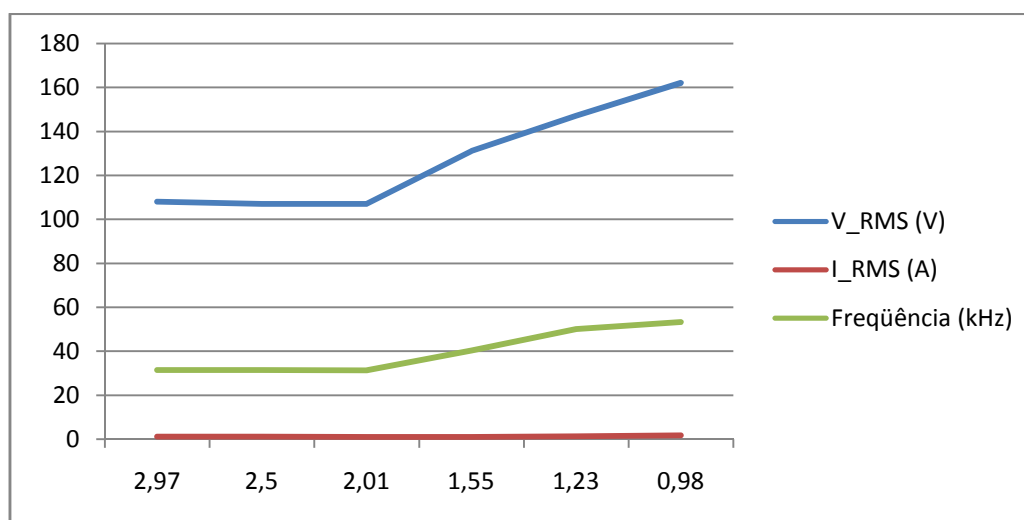


Figura 37 – V_{RMS} (V), I_{RMS} (A), Frequência (kHz) da lâmpada x PWM (V)

Podemos observar a característica de resistência negativa controlada por corrente que a lâmpada apresenta após o arco ser formado. Quanto menor a tensão entregue pelo PWM maior a tensão e corrente em cima da lâmpada, e conseqüentemente a frequência (onde quanto maior a frequência, menor a intensidade de luz). O valor de 53,38 kHz para intensidade mínima de luz obtida está de acordo com o que o *application note* propunha para essa configuração de circuito (53 kHz). [12]

As figuras 38 e 39 mostram as formas de onda na lâmpada próximas ao ponto de máxima e de mínima intensidade de luz.

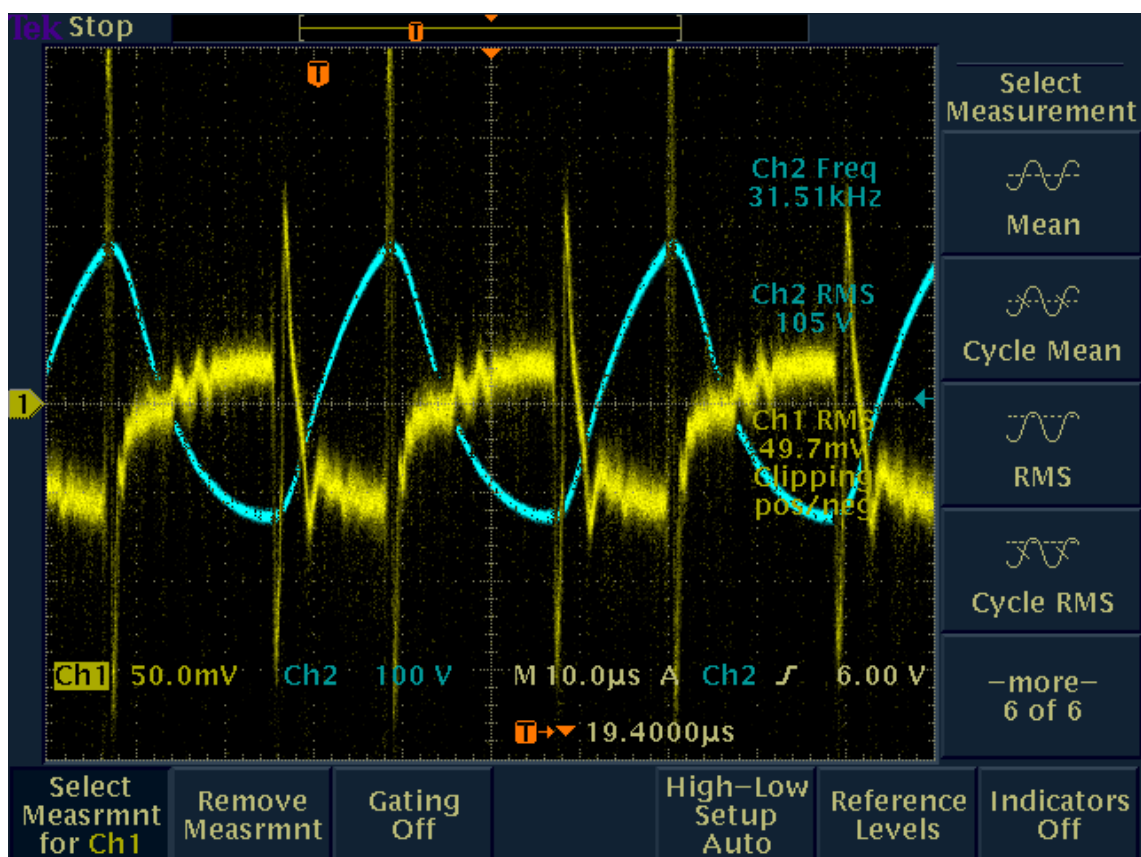


Figura 38 – formas de onda na lâmpada com uma intensidade de luz máxima

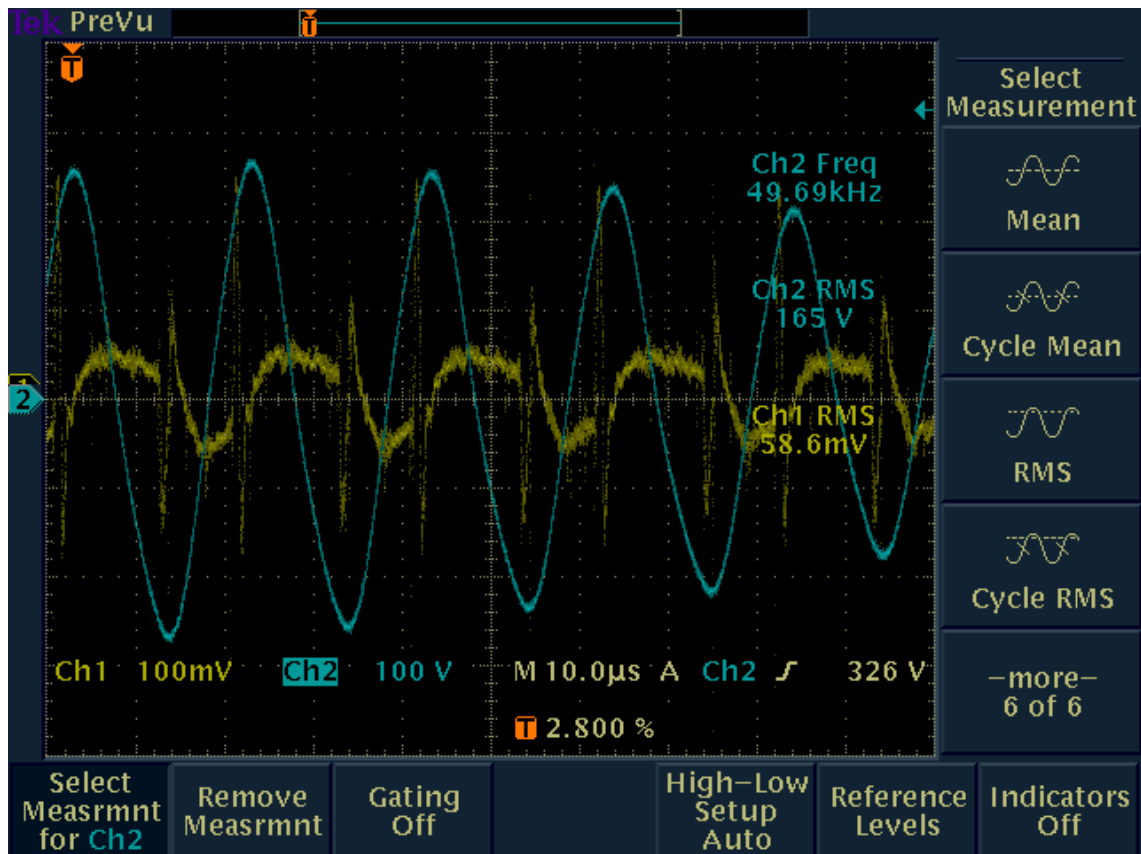


Figura 39 – formas de onda na lâmpada na proximidade de intensidade de luz mínima

Para completar, foram medidas a tensão nos pinos 2 e 5 (V2 e V5) para podermos observar a característica de resposta do circuito, com relação as equações 12 e 13. Os resultados obtidos estão na tabela 8.

PWM (V)	V2 (V)	V5 (V)
2,40	2	4,70
2,16	2	1,80
2,05	2	1,40
1,85	2	0,95
1,53	2	0,45
1,25	2	0,28
1,04	2	0,13

Tabela 8 – Tensão dos pinos 2 e 5 em função da tensão do PWM

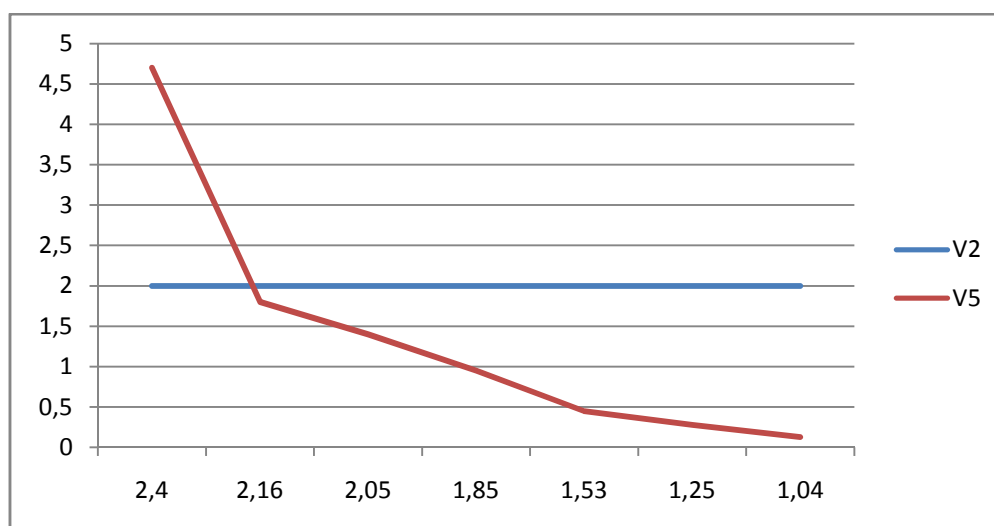


Figura 40 – V2 (V), V5 (V) x PWM (V)

Vemos que a tensão do pino 2 permaneceu constante, porem a do pino 5 foi diminuindo a medida que diminuíamos a tensão do PWM (tensão que alimenta o divisor no pino 7). Assim, a tensão V5 influi diretamente na equação 13, fazendo com que a equação 12 aumente (maior frequência de operação), como queríamos mostrar.

6. Conclusão

Este trabalho de conclusão de curso fez uma breve apresentação das estruturas de um reator eletrônico comercial, que é formado por: circuito inversor, conversor *Boost* para o estágio corretor de fator de potência e de um filtro EMI para reduzir a interferência eletromagnética. Foi mostrado também que o uso das lâmpadas fluorescentes T5 é mais vantajoso, visto que são mais econômicas e tem melhor desempenho em altas temperaturas, comparado às suas antecessoras (como a T8). [5]

A parte principal desse trabalho foi a implementação de dimerização de um reator comercial a partir do circuito integrado da ST Microelectronics L6574. Este reator eletrônico também utilizava o circuito integrado L6461, também da ST Microelectronics, para o controle do conversor *Boost*. Graças ao crescente uso deste tipo de reator no mercado, vem sendo desenvolvidos cada vez mais circuitos integrados dedicados para esse tipo de aplicação.

Através das implementações utilizadas para a variação da luminosidade da lâmpada do reator, vimos que a dimerização não é um processo tão simples levando em conta as características elétricas das lâmpadas fluorescentes e a complexidade das estruturas. Vimos também que a faixa de dimerização não é muito abrangente se comparado com a de uma lâmpada incandescente, onde um simples divisor de tensão faz a lâmpada dimerizar de um valor que vai de zero até a máxima iluminação.

Por essas razões, não encontramos facilmente reatores eletrônicos dimerizáveis no mercado nacional. Seria de grande interesse econômico produzir esses reatores a partir das estruturas dos reatores eletrônicos já existentes, como este que foi utilizado neste trabalho. Ele poderia ser comercializado com um valor superior ao de um reator eletrônico normal (já que os reatores encontrados com essa propriedade são importados e custam na faixa de 200 reais), e também teriam pouca concorrência.

7. Bibliografia

- [1] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C., “*Microeletrônica*”, quarta edição, editora Makron Books.
- [2] Norma NBR14418, “*Reatores Eletrônicos Alimentados em Corrente Alternada para Lâmpadas Fluorescentes Tubulares – Prescrições de Desempenho*”, Rio de Janeiro, 1999. Normas – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- [3] SANTOS, Anderson S.; REIS, Fernando S.; TOSS, Marcelo; TONKOSKI, Reinaldo, “*Multifrequency Electronic Ballast For T5 Fluorescent Lamps with Voltage-Preheating*”, Brazilian Power Electronics Conference (COBEO’05).
- [4] http://www2.electronicproducts.com/All_about_EMI_filters-article-farr_lambda_oct2008-html.aspx, visitado em 8 de novembro de 2009.
- [5] <http://www.lrc.rpi.edu/>, visitado em 3 de novembro de 2009.
- [6] <http://www.national.com/mpf/LM/LM555.html#Datasheet>, visitado em 9 de novembro de 2009.
- [7] QIAN, J; LEE, F. C., “*Charge Pump Power-Factor-Correction Dimming Electronic Ballast*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No 03.
- [8] BEDIN, Juliano, “*Reatores eletrônicos dimerizáveis para lâmpadas fluorescentes com elevado fator de potência*”, tese de mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2008.
- [9] ST Microelectronics, folha de dados, “*L6574 - CFL/TL Ballast Deriver Preheat and Dimming*”.
- [10] ST Microelectronics, folha de dados, “*L6561- Power Factor Corrector*”.
- [11] ST Microelectronics, *application note*, “*AN1320 L6574 & Microcontroller in Ballast Applications*”.
- [12] ST Microelectronics, *application note*, “*AN993 – Electronic Ballast with PFC using L6574 and L6561*”.
- [13] Fairchild Semiconductor, folha de dados, “*LM555/NE555/SA555 Single Timer*”.
- [14] Phillips Semiconductors, *aplication note*, “*AN170 - NE555 and NE556 applications*”.
- [15] ITA, Divisão de Engenharia Eletrônica, Departamento de Eletrônica Aplicada, “*Timer 555*”, ELE-59 – Circuitos de Chaveamento.

Anexo 1

