

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA
ÊNFASE ELETROTÉCNICA**

**JOSÉ AUGUSTO CREPALDI
MICHAEL FERMINO CECCON FRIGATTI
RODRIGO LUCKOW**

**ANÁLISE DA VIDA ÚTIL DE LÂMPADAS FLUORESCENTES
UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE CIRCUITOS DE PRÉ-
AQUECIMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2012**

JOSÉ AUGUSTO CREPALDI
MICHAEL FERMINO CECCON FRIGATTI
RODRIGO LUCKOW

**ANÁLISE DA VIDA ÚTIL DE LÂMPADAS FLUORESCENTES
UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE CIRCUITOS DE PRÉ-
AQUECIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica - Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Roger Gules

**CURITIBA
2012**

José Augusto Crepaldi
Michael Fermino Ceccon Frigatti
Rodrigo Luckow

Análise da Vida Útil de Lâmpadas Fluorescentes Utilizando Diferentes Tipos de Circuitos de Pré-Aquecimento

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 30 de julho de 2012.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Coordenador dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Roger Gules, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Roger Gules, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Alceu André Badin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Jair Urbanetz Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

LUCKOW, Rodrigo. FRIGATTI, Michael. CREPALDI, José A. Análise da vida útil de lâmpadas fluorescentes utilizando diferentes tipos de circuitos de pré-aquecimento. 2012. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Atualmente, as lâmpadas fluorescentes vêm sendo empregadas em larga escala. Devido à maior eficácia luminosa, a utilização das lâmpadas fluorescentes resulta em considerável economia de consumo de energia elétrica, quando comparada às lâmpadas incandescentes comuns. No entanto, as lâmpadas fluorescentes apresentam algumas particularidades. Uma importante característica é o fato que, caso a temperatura dos filamentos não seja adequada no momento da partida, faz-se necessário aplicar um alto valor de tensão para ligar a lâmpada. Isto tende a acelerar o desgaste da lâmpada, reduzindo a vida útil desta. Portanto, a presença de um circuito auxiliar de pré-aquecimento para as lâmpadas fluorescentes, especialmente as do tipo T5, é fundamental para evitar o desgaste dos filamentos destas, garantindo uma melhor condição de partida e, conseqüentemente, resultando em um aumento da vida útil. Este trabalho apresenta os principais tipos de circuito de pré-aquecimento em reatores auto-oscilantes para lâmpadas fluorescentes T5. O projeto propõe o desenvolvimento e implementação de um sistema eletrônico de testes autônomo, por meio do qual seja possível realizar um ensaio comparativo entre os tipos de pré-aquecimento mais comuns. Desta forma, o sistema de testes deve ser capaz de avaliar a influência destes circuitos na vida útil da lâmpada fluorescente, através da contagem do número de ciclos de operação realizados até a ocorrência de defeito na lâmpada. Incumbe, também, ao circuito de testes identificar a adequada operação dos circuitos de pré-aquecimento, acarretando o estudo e possível implementação de modificações necessárias ao correto funcionamento desses circuitos.

Palavras-chave: Lâmpadas fluorescentes. Filamentos. Circuito auxiliar de pré-aquecimento.

ABSTRACT

LUCKOW, Rodrigo. FRIGATTI, Michael. CREPALDI, José A. Analysis of the fluorescent lamps' lifetime by using different types of preheating circuits. 2012. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

In the present days, the fluorescent lamps are being widely used. When compared to the incandescent normal lamps, due to its greater luminous efficiency, the use of fluorescent lamps results in considerable energy saving. However, the fluorescent lamps present some particularities. One important characteristic is the fact that, if the temperature of the filaments is not adequate at the ignition moment, it is necessary to apply a high tension to turn on the lamp. This tends to accelerate the lamp's wear, reducing its lifetime. Therefore, the presence of an auxiliary preheating circuit for the fluorescent lamps, especially the T5 type, is fundamental to prevent its filaments from wearing out, guarantying a better condition for the ignition, and, consequently, resulting in a longer lifetime. This paper presents the main types of preheating circuits to self-oscillating ballast for T5 fluorescent lamps. This project proposes the development and implementation of an electronic system of autonomous tests, through which it is possible to perform a comparative test between the most common preheating types. Thus, this system of tests has to be able to evaluate the influence of these circuits in the fluorescent lamps' lifetime, through the number of operation cycles accomplished until the lamps' defects. Also, the test circuit has the incumbency of identifying the adequate operation of the preheating circuits, resulting in the study and possible implementation of needed modifications for the correct functioning of these circuits.

Keywords: Fluorescent lamps. Filaments. Preheating circuits.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - QUANTIDADE DE LÂMPADAS IMPORTADAS PELO BRASIL – 2006.....	27
FIGURA 2 - LÂMPADA FLUORESCENTE T5 (FONTE: OSRAM).....	31
FIGURA 3 - COMPOSIÇÃO DA LÂMPADA FLUORESCENTE.....	32
FIGURA 4 - REATOR MAGNÉTICO.....	34
FIGURA 5 - REATOR AUTO-OSCILANTE	37
FIGURA 6 - PRÉ-AQUECIMENTO <i>PTC</i> COM UM CAPACITOR.....	39
FIGURA 7 - AQUECIMENTO <i>PTC</i> COM DOIS CAPACITORES EM PARALELO	40
FIGURA 8 - CHAVE SIMPLES SEMI-RESSONANTE INVERSORA	42
FIGURA 9 - ESTÁGIO RESSONANTE.....	43
FIGURA 10 - ESTÁGIO LINEAR: A) PERÍODO DE DESCARGA DO INDUTOR; B) PERÍODO DE CARGA DO INDUTOR	43
FIGURA 11 - PORCENTAGEM DA RESISTÊNCIA EM VIRTUDE DO TEMPO DE RESFRIAMENTO.....	45
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE BLOCOS – CIRCUITO TESTE.	48
FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DA LÓGICA DO CIRCUITO DE TESTES.....	50
FIGURA 14 - CIRCUITO DE TESTE - SIMULAÇÃO.....	52
FIGURA 15 - SIMULAÇÃO EM FUNCIONAMENTO.....	53
FIGURA 16 - SIMULAÇÃO - IDENTIFICAÇÃO DE FALHA.....	54
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO EM 3D DO CIRCUITO DE TESTES.....	55
FIGURA 18 - ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO DE TESTES.....	56
FIGURA 19 - CIRCUITO COMPARADOR DE TENSÃO	57
FIGURA 20 - COMPONENTES DA LÓGICA DOS LDRS.....	59
FIGURA 21 - DISPOSITIVOS DE <i>RESET</i> NA PLACA DO CIRCUITO DE TESTES.....	61
FIGURA 22 - DISPLAY LCD E BARRA DE PINOS	62
FIGURA 23 - DISPLAY LCD MOSTRANDO CICLO DE OPERAÇÃO	63
FIGURA 24 - DISPLAY LCD MOSTRANDO MENSAGEM DE FALHA EM UMA DAS LÂMPADAS.....	64
FIGURA 25 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO RELE	65
FIGURA 26 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE ALIMENTAÇÃO DOS REATORES	67
FIGURA 27 - EXEMPLO DE CONTAGEM DE CICLO (CICLO 160).....	69
FIGURA 28 - EXEMPLO DE “CICLO SALVO” (CICLO 16).....	70
FIGURA 29 - CIRCUITO DE TESTES.....	72
FIGURA 30 - COMPARTIMENTO DE LÂMPADAS.....	73
FIGURA 31 - LÂMPADAS QUEIMADAS - REATOR SEM <i>PTC</i>	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RENDIMENTOS DE LÂMPADAS	25
TABELA 2 - TEOR DE MERCÚRIO.	30
TABELA 3 - TIPOS DE LÂMPADAS FLUORESCENTES	30
TABELA 4 - RESULTADOS DE ENSAIOS BASEADOS EM 4 CONFIGURAÇÕES DE TEMPO.	46
TABELA 5 - CONEXÕES DO DISPLAY LCD	63
TABELA 6 - REATORES UTILIZADOS.....	66
TABELA 7 - PINOS DE LIGAÇÃO DO PIC16F877A	68
TABELA 8 - CICLO SALVO NA PRIMEIRA FALHA.....	78

LISTA DE SIGLAS

AC	Alternate Current
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
DC	Direct Current
DSPIC	Digital Signal Programmable Interface Controller
FDTE	Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia
GE	General Electric
IESNA	Illuminating Engineering Society of Northern America
LCD	Liquid Crystal Display
LDR	Light Dependent Resistor
NA	Normalmente Aberto
PIC	Programmable Interface Controller
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PTC	Positive temperature coeficiente
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ACRÔNIMOS

DAELT	Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
LED	Light-Emitting Diode
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ohm
μF	micro Farad
A	Ampère
Hg	Mercúrio
Hz	Hertz
K	Kelvin
$\text{k}\Omega$	kilo Ohm
Lm	Lúmen
mA	mili Ampère
s	Segundo
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 TEMA	13
1.1.1 Delimitação do Tema	13
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
1.5 PROCEDIMENTOS	20
1.5.1 Contexto histórico-econômico.....	20
1.5.2 Análise energética	20
1.5.3 Fundamentação Teórica.....	20
1.5.4 Controle eletrônico.....	20
1.5.5 Construção do ambiente de testes	21
1.5.6 Ensaio Piloto	21
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2 CONTEXTO HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO.....	23
2.1 HISTÓRICO	23
2.2 MUDANÇAS NO CONTEXTO DE ILUMINAÇÃO - SUSTENTABILIDADE.....	26
2.3 PROBLEMA AMBIENTAL – LÂMPADAS FLUORESCENTES	29
3 LÂMPADAS FLUORESCENTES.....	30
3.1 COMPOSIÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES	30
4 REATORES	33
4.1 REATORES MAGNÉTICOS.....	33
4.2 REATORES ELETRÔNICOS.....	34

4.2.1	Reator eletrônico auto-oscilante	36
5	TIPOS DE PRÉ-AQUECIMENTO	37
5.1	PRÉ-AQUECIMENTO POR FONTE DE CORRENTE.....	39
5.1.1	Circuito de Pré-aquecimento por “termistor” e capacitor em paralelo	39
5.1.2	Circuito de Pré-aquecimento por “termistor” e duplo capacitor em paralelo.	40
5.1.3	Circuito de pré-aquecimento por variação de frequência de comutação imposta	40
5.2	PRÉ-AQUECIMENTO POR FONTE DE TENSÃO	41
5.2.1	Circuito de pré-aquecimento auxiliar	41
5.2.2	Circuito de pré-aquecimento de pré-aquecimento auxiliar auto-oscilante.....	42
6	ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE LÂMPADAS FLUORESCENTES DE ACORDO COM O CIRCUITO DE PRÉ-AQUECIMENTO UTILIZADO	44
6.1	ENSAIO ATRAVÉS DE CICLOS RÁPIDOS	44
6.2	DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS NECESSÁRIOS À ESTABILIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS FILAMENTOS.....	45
6.3	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO	46
6.4	DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE TESTES	47
7	CIRCUITO DE TESTE.....	49
7.1	PROGRAMAÇÃO.....	49
7.2	SIMULAÇÃO	51
7.3	DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE TESTES	55
7.3.1	Lista de componentes.....	55
7.3.2	Alimentação do circuito.....	56
7.3.3	Lógica de monitoramento das lâmpadas através dos sensores LDRs.....	57
7.3.4	Dispositivos de Reset.....	60
7.3.5	Display LCD	61
7.3.6	Relé para alimentação dos reatores.....	64

7.3.7	Ligação dos reatores	66
7.3.8	Microcontrolador PIC16F877A.....	67
7.4	TESTES DE FUNCIONALIDADE.....	69
7.4.1	Contagem dos ciclos	69
7.4.2	Simulação de Falha nas Lâmpadas	70
7.4.3	Liberação da Trava para Gravação de Falhas.....	71
7.4.4	Simulação de Falha na Alimentação do Sistema.....	71
8	RESULTADOS	72
8.1	SISTEMA DE TESTES	72
8.2	RESULTADOS DOS TESTES.....	75
8.2.1	Reator desprovido de circuito de pré-aquecimento.....	75
8.2.2	Reator com pré-aquecimento por PTC.....	76
8.2.3	Reator com pré-aquecimento por circuito auxiliar auto-oscilante.....	77
8.2.4	Análise comparativa	78
9	CONCLUSÕES.....	79
	APÊNDICE A – ALGORITMO DO CIRCUITO DE TESTES	84
	APÊNDICE B – LISTA DE COMPONENTES DO CIRCUITO DE TESTES.....	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

1.1.1 *Delimitação do Tema*

As lâmpadas de descarga possuem um princípio de funcionamento diferente ao das lâmpadas incandescentes. Essas lâmpadas começaram a ser utilizadas por volta do século XIX, principalmente como opção às luminárias a gás.

Inventada no começo do século XX, a lâmpada fluorescente é com certeza a mais conhecida lâmpada de descarga do mundo. Possui grandes aplicações nos dias atuais, como em residências, comércio e indústrias.

As lâmpadas fluorescentes produzem luz através da passagem de uma corrente elétrica em um gás ou vapor ionizado sob baixa pressão dentro da lâmpada, contendo uma pequena quantidade de mercúrio em seu interior. A eficácia luminosa dessas lâmpadas é muito superior à eficácia das lâmpadas incandescentes. Com a utilização destas lâmpadas ao invés das incandescentes há uma grande redução no consumo de energia elétrica.

A principal desvantagem da utilização de lâmpadas fluorescentes reside no fato de estas apresentarem uma substância tóxica em sua composição, o mercúrio. Elas precisam ser descartadas em local apropriado para não contaminar o meio ambiente e os seres humanos. Como não existe nenhum tipo de política pública de coleta deste material, os consumidores acabam descartando-as no lixo comum.

O reator que será utilizado no projeto será o reator eletrônico auto-oscilante. Este é um dos mais comercializados atualmente devido ao seu custo ser mais baixo. O problema na aplicação deste reator se deve ao fato de os sistemas de pré-aquecimento utilizados na sua composição não serem muito eficazes e sofisticados.

O correto pré-aquecimento utilizado no processo de ignição da lâmpada é um fator muito importante e relevante na análise da qualidade destes reatores. Os filamentos da lâmpada em condições de baixa temperatura requerem uma tensão alta de ignição, causando um desgaste prematuro no filamento. O sistema de pré-aquecimento foi criado com o intuito de amenizar os problemas de ignição das lâmpadas fluorescentes auto-oscilantes, buscando aperfeiçoar o funcionamento inicial destas.

Não se encontram, na literatura, resultados dos efeitos dos circuitos de pré-aquecimento na vida útil das lâmpadas fluorescentes com reatores auto-oscilantes. Pode-se encontrar apenas informações sobre a vida útil da lâmpada desprovida do pré-aquecimento. Desta forma, há uma insuficiência de informações no estudo do efeito dos sistemas de pré-aquecimento na duração da lâmpada.

O desafio deste trabalho consiste em analisar tanto a vida útil das lâmpadas fluorescentes com a utilização de diferentes tipos de circuito de pré-aquecimento, bem como sem a utilização de qualquer circuito, quanto à adequação destes circuitos às necessidades de operação que devem ser cumpridas no momento da ignição. Através do circuito eletrônico desenvolvido, é possível operar repetidas vezes a ignição nas lâmpadas com o sistema de pré-aquecimento, contabilizar o número de operações, analisar possíveis falhas do conjunto lâmpada fluorescente e reator eletrônico auto-oscilante e identificar o correto funcionamento dos circuitos de pré-aquecimento.

Partindo-se do estudo do funcionamento de um circuito de pré-aquecimento para os reatores auto-oscilantes destas lâmpadas e seguindo para uma análise prática, o presente trabalho objetiva verificar o efeito da utilização deste sistema, através dos pontos de vista funcional, tecnológico, social e ambiental.

A cada ignição da lâmpada ocorre gradativamente a perda da capacidade de emissão de elétrons pelos eletrodos. Em cada processo de partida da lâmpada parte do eletrodo e revestimento é corroída. Para iniciar o funcionamento da lâmpada a temperatura do eletrodo chega a níveis altíssimos causando a evaporação do material de emissão. Todo este processo reduz significativamente a vida da lâmpada. A inibição do desgaste precoce de seus filamentos intrinsecamente aumenta a eficiência energética nos lugares em que o circuito de pré-aquecimento é aplicado.

Dentre os fatores de análise, destaca-se a vida útil da lâmpada, cujo resultado positivo, no que diz respeito à diminuição da velocidade de descarte destas, diminui seus danos ao meio ambiente.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

As lâmpadas fluorescentes possuem uma característica de resistência negativa, ou seja, uma característica volt-ampère negativa. Isto implica que a corrente elétrica da lâmpada tende a aumentar cada vez mais, chegando ao ponto de destruir a lâmpada. Para evitar isto, todas as

lâmpadas fluorescentes são dotadas de um reator, o qual atua limitando a corrente da lâmpada em um valor adequado ao seu funcionamento.

No momento da partida da lâmpada fluorescente, o valor de tensão inicial pode chegar a valores elevados, até cerca de 1200V. A ação do reator diminui esta tensão no momento da ignição, bem como limita também a corrente nominal de funcionamento da lâmpada. (SOARES et al., 2005)

Estas características de sobretensão e temperatura inadequada de ignição das lâmpadas fluorescentes são causa de um excessivo e precoce desgaste dos filamentos da mesma. Esta característica faz com que a vida útil da lâmpada seja prejudicada, fazendo com que a lâmpada seja danificada com pouco tempo de uso.

“A vida das lâmpadas fluorescentes é determinada pela perda da emissão de elétrons sobre os eletrodos. Parte do revestimento é corroída à partir dos eletrodos cada vez que a lâmpada é ligada; evaporação e erosão adicionais também ocorrem durante a operação da lâmpada. A temperatura do eletrodo afeta diretamente a evaporação e erosão do material de emissão, e também afeta a vida da lâmpada. Uma temperatura muito alta do eletrodo reduzirá a vida da lâmpada devido à evaporação do material de emissão, e uma baixa temperatura do eletrodo reduzirá a vida da lâmpada devido a erosão do material de emissão por crepitação.” (Davis, R.; Yufen, J.; Weihong, C., 1996, p. 462. Tradução própria dos autores deste documento).

Com isto, as lâmpadas passam a apresentar durabilidade temporalmente comprometida, deixando muitas vezes de atender requisitos de qualidade e confiabilidade, colocando em discussão questões de cunho sócio-econômico e até ambiental, devido aos problemas que o descarte das lâmpadas pode causar ao meio ambiente.

Existem diversos circuitos de pré-aquecimento de lâmpadas fluorescentes, utilizados conjuntamente com os reatores eletrônicos. Dentre estes, há sistemas simples e de baixo custo como o PTC (*positive temperature coefficient*), porém alguns valores nominais de projeto como tensão pré-ignição, temperatura dos filamentos e corrente de operação das lâmpadas fluorescentes e reatores eletrônicos não são atendidos.

Outra alternativa para o pré-aquecimento dos filamentos das lâmpadas fluorescentes é a variação da frequência de chaveamento. Ou seja, mantém-se a frequência de chaveamento muito maior do que a frequência ressonante do inversor. Após o pré-aquecimento, a frequência é reduzida até o valor nominal. Contudo, esta frequência precisa ser programável, o que não é simples de ser implementado nos reatores auto-oscilantes. (GULES et al., 2011).

Levando em conta a baixa qualidade de algumas medidas de contorno e a complexidade e não adaptabilidade de outros circuitos até então implementados para evitar a ocorrência de

defeitos originados na degradação prematura dos catodos das lâmpadas, bem como a preocupação com fatores socioeconômicos e ambientais é que foi desenvolvido no departamento de eletrotécnica (DAELT) pelo grupo de pesquisa em eletrônica de potência, um sistema auxiliar de pré-aquecimento auto-oscilante, com o intuito de otimizar e adequar as condições iniciais de temperatura e corrente nos filamentos de uma lâmpada no momento que antecede a ignição, aumentando assim o tempo de vida de lâmpadas fluorescentes (GULES et al., 2011).

Este circuito visa reduzir ou até mesmo eliminar as desvantagens presentes nos demais sistemas pré-aquecedores de lâmpadas fluorescentes. Todavia, deseja-se efetuar a comprovação prática do efeito positivo no prolongamento da vida útil das lâmpadas fluorescentes que possam utilizar este sistema de pré-aquecimento acima descrito.

Torna-se, então, imprescindível a realização de uma análise comparativa entre lâmpadas fluorescentes que utilizam sistemas de aquecimento prévio ou que não utilizam nenhum processo de aquecimento anterior ao seu funcionamento. Desta forma, será possível averiguar e comparar a vida útil das lâmpadas utilizando-se cada sistema de pré-aquecimento.

Este trabalho propõe desenvolver um circuito eletroeletrônico destinado a análise da vida útil das lâmpadas fluorescentes, compostas por diferentes métodos de pré-aquecimento. Através de um circuito eletrônico automatizado e devidamente controlado, inserido em um ambiente de ensaio próprio, será possível verificar o desgaste da lâmpada, estimando sua vida útil em termos de número de comutações que ela suportará, ou seja, quantidade de operações “liga/desliga” ocorridas até o momento em que se torne inutilizada.

Com isto, a funcionalidade de cada sistema de pré-aquecimento poderá ser verificada, o que viabilizará a criação de um comparativo que permita uma avaliação sobre as características de cada sistema, bem como concluir que porcentagem do tempo de vida útil é acrescida em lâmpadas fluorescentes com o uso dos diferentes tipos de pré-aquecimento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *Objetivo Geral*

Desenvolver um sistema eletroeletrônico apropriado para testar lâmpadas fluorescentes controladas por reatores auto-oscilantes com diferentes tipos de circuitos de pré-aquecimento, possibilitando posteriores estudos do funcionamento destes e análises comparativas da vida útil destas lâmpadas.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

1. Verificar e sumarizar quais os aspectos e variáveis importantes na análise dos sistemas de pré-aquecimento para lâmpadas fluorescentes.
2. Projetar um circuito eletroeletrônico capaz de avaliar as variáveis relevantes na análise do sistema, efetuando comandos de liga e desliga nas lâmpadas, com o intuito de analisar a vida útil destas.
3. Montar e configurar o protótipo projetado para fazer os testes.
4. Compreender e aplicar as condições de ensaio mais propícias para verificar de forma eficaz a vida útil das lâmpadas fluorescentes.
5. Realizar e acompanhar os testes em: lâmpadas fluorescentes desprovidas de sistema de pré-aquecimento; lâmpadas com sistemas de pré-aquecimento PTC e circuito de pré-aquecimento auto-oscilante.
6. Coletar os resultados e realizar uma análise comparativa entre os diversos tipos de sistemas de pré-aquecimento testados.
7. Relacionar as vantagens e desvantagens da utilização de cada circuito citado acima.
8. Verificar qual sistema possui melhor desempenho no que diz respeito à vida útil das lâmpadas fluorescentes.

1.4 JUSTIFICATIVA

As lâmpadas fluorescentes são utilizadas em larga escala devido ao seu baixo consumo energético, custo moderado, grande índice de reprodução de cores e considerável durabilidade, a qual é posta em questionamento à medida que os padrões de duração se elevam.

É comum encontrar lâmpadas tubulares do tipo T5 com as extremidades escurecidas e apresentando iluminação intermitente. Esta situação ocorre quando os pólos das lâmpadas fluorescentes sofreram intenso desgaste, em virtude de sobretensões geradas nos pólos de descarga e temperaturas iniciais dos filamentos dos pólos inadequadas no momento da ignição. Essa sobretensão surge nos pólos em decorrência da necessidade de ionização dos gases presentes no interior do bulbo da lâmpada, pois, para que haja a ionização desses gases, é necessário que os filamentos que compõem os pólos estejam aquecidos a temperaturas ideais. Caso contrário, a tensão dos pólos eleva-se até que ocorra a passagem de corrente entre as extremidades da lâmpada através dos gases.

Logo, percebeu-se que essa sobretensão poderia ser evitada aquecendo-se os filamentos dos polos das lâmpadas à temperatura ideal antes que nela fosse aplicada tensão necessária ao seu funcionamento. A exemplo, o fabricante de lâmpadas T5 *GE lighting* afirma em seu catálogo *Starcoat™* (2001) que “o pré aquecimento adequado dos catodos antes da ignição é essencial para a vida longa da lâmpada”. (*General Electric Company*, 2001, p. 13).

Faz-se necessário, então, o estudo da real eficiência dos sistemas de pré-aquecimento, tendo como objetivo a verificação da sua eficácia no aumento da vida útil das lâmpadas fluorescentes. Utilizando-se do estudo teórico junto à análise prática será obtido o conjunto de informações necessárias e suficientes para a análise destes sistemas de aquecimento.

Para tanto, efetuou-se avaliações e ensaios práticos nas diversas topologias de pré-aquecimento utilizadas no mercado. Foi desenvolvido neste trabalho um ambiente de testes visando à comprovação técnica do prolongamento da vida útil das lâmpadas fluorescentes pela utilização dos sistemas pré-aquecedores. Nesse cenário, pretendeu-se ensaiar três conjuntos principais: lâmpada e reator sem sistema de pré-aquecimento, lâmpada e reator com sistema de pré-aquecimento PTC e lâmpada e reator com sistema de pré-aquecimento semi-ressonante.

O cenário de teste é composto por duas regiões, potência e controle. Na região de potência estão os conjuntos “lâmpada/reator” conectados aos sistemas de pré-aquecimento e à

alimentação proveniente da rede elétrica. Já na segunda região é implementado o controle do circuito de ensaio através de um controlador do tipo *DSPic* ou *Pic*, que possibilita a implementação de um algoritmo voltado a realização programada dos ensaios. O controlador tem as funções de acionar e desabilitar a alimentação dos reatores e pré-aquecedores através de relés de potência, executar os comandos para comutação em tempos predeterminados, contabilizar o número de operações realizadas nos tempos estipulados, identificar e armazenar informações com relação à ocorrência da falha no momento da comutação.

Dado que seriam necessários anos até que uma lâmpada fluorescente apresentasse defeito em condições normais, o processo que leva ao seu desgaste será acelerado, com o objetivo de chegar-se ao defeito rapidamente. O tempo entre acionamento das lâmpadas é um fator importante. A literatura apresenta algumas estimativas destes valores, entretanto, bem variáveis, situando-se em torno de 1 minuto com a lâmpada ligada e 1 minuto com esta desligada, por exemplo. No início do processo de testes, este tempo de atuação foi estudado, com o intuito de definir qual o valor mais apropriado, o qual foi utilizado no decorrer dos ensaios.

Com isto, pretende-se avaliar a vida útil da lâmpada em termos de número de comutações, possibilitando uma estimativa real do tempo de utilização até o descarte da mesma.

As lâmpadas foram confinadas em um local que permita a utilização de sensores de iluminação, os quais possam identificar a luminosidade da lâmpada. O controlador será programado para interpretar a leitura dos sensores e cruzar essa informação com o estado de comutação da lâmpada, “on” ou “off”, identificando assim se a lâmpada foi acionada mas não acendeu.

Após efetuarem-se os ensaios com lâmpadas e reatores de diferentes fabricantes, com o intuito de eliminar particularidades de alguns sistemas, os resultados foram analisados a fim de se alcançar médias confiáveis que determinem com precisão os resultados de cada conjunto. Desses resultados esperou-se, por fim, concluir qual sistema de pré-aquecimento é mais eficaz no prolongamento da vida útil das lâmpadas fluorescentes.

1.5 PROCEDIMENTOS

1.5.1 *Contexto histórico-econômico*

Pesquisar o desenvolvimento energético no Brasil relacionado à utilização de lâmpadas de descarga, no caso a fluorescente, para mostrar a importância deste tipo de lâmpada no contexto nacional.

1.5.2 *Análise energética*

Compreender a magnitude de eficiência energética que a lâmpada fluorescente traz e também fatores importantes referentes às precauções sobre como proceder com seu descarte e os seus riscos ambientais quando inutilizável.

1.5.3 *Fundamentação Teórica*

Estruturar e relacionar os conhecimentos das áreas correlatas no projeto, principalmente luminotécnica, eletrônica de potência, e ciências ambientais.

1.5.4 *Controle eletrônico*

Desenvolver um controle eletrônico para contabilizar o número de operações em que a lâmpada manteve-se acesa e identificar o momento de falha da lâmpada.

Este momento de falha ocorrerá quando a lâmpada for operada e não acender mais. Desta maneira é possível analisar a sua vida útil diante da utilização e não utilização do circuito de pré-aquecimento auxiliar.

1.5.5 **Construção do ambiente de testes**

Construir um cenário de testes com lâmpadas fluorescentes e reatores auto-oscilantes para simular de maneira acelerada as condições em que as lâmpadas estão submetidas em seu ambiente usual e buscar o apoio da instituição de modo a fornecer um laboratório de pesquisa para realizar o desenvolvimento do ambiente de teste.

1.5.6 **Ensaio Piloto**

Elaborar ensaios com a utilização do sistema de pré-aquecimento auxiliar auto-oscilante, com o circuito de pré-aquecimento usual (PTC) e também um ensaio desprovido de sistema de pré-aquecimento, de modo a concluir, através de uma análise comparativa, qual a melhor solução de pré-aquecimento para lâmpadas fluorescentes.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Seguindo as diretrizes apresentadas nos procedimentos metodológicos, a estrutura do trabalho está focada em quatro principais pontos de seguimento. Inicialmente a atenção está voltada para um estudo sobre o desenvolvimento energético no Brasil em torno das lâmpadas fluorescentes. Em seguida, é analisado o impacto econômico e ambiental provindos da utilização das lâmpadas fluorescentes com reatores auto-oscilantes.

Completada a segunda etapa, é realizado o ensaio piloto para constatar o funcionamento do sistema de pré-aquecimento auxiliar. Depois de constatado o funcionamento do circuito, começa efetivamente a realização do trabalho. A sequência de desenvolvimento deste objetivo segue os seguintes passos: (a) Embasamento teórico para a estruturação do desenvolvimento técnico e físico do projeto, (b) Realização da construção do ambiente de testes, (c) Desenvolvimento do controle eletrônico para captar as operações nas lâmpadas e (d) Análise de resultados.

A estrutura do trabalho seguirá a distribuição abaixo:

1.Contextualização energética

- Histórico das lâmpadas fluorescentes no Brasil.
- Sustentabilidade energética.
- Riscos ambientais com o descarte incorreto do lixo das lâmpadas de descarga, no caso, a fluorescente.

2.Análise técnica

- Luminotécnica.
- Informações técnicas sobre as lâmpadas, principalmente sobre sua vida útil.
- Classificação dos Reatores e funcionamento dos reatores eletrônicos auto-oscilantes.

3.Estudo de métodos de testes para desenvolver o circuito de controle para testes.

4.Controle eletrônico para avaliação das operações.

- Desenvolvimento de algoritmo e placa de controle.

5.Construção do ambiente de testes

6.Realização de testes e coleta de resultados

- Verificação da eficácia de cada sistema de pré-aquecimento

Os itens 1, 2 e 3 são atividades compreendidas no desenvolvimento do TCC 1, enquanto que os itens 4, 5 e 6 são as atividades desenvolvidas no TCC 2.

2 CONTEXTO HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO

2.1 HISTÓRICO

Desde tempos primordiais da raça humana, sempre foi preocupação desta, buscar meios adequados para suprir a falta da luz natural em seus lares. O expressivo papel da luz na vida e no desenvolvimento do ser humano é inquestionável. O primeiro recurso que o homem dominou, ainda na pré-história, foi o fogo, que produzia calor e luz. Apesar de o homem dominar o fogo, ele continuou buscando mecanismos que pudessem iluminar seus lares após o pôr do sol de forma mais eficiente e simples.

As primeiras buscas por uma tecnologia melhor de iluminação para chegar ao modelo de lâmpada que conhecemos hoje, foram no século XVIII. O primeiro resultado notável foi apresentado em 1802 em Londres, pelo químico do Royal Institution Humphry Davy. A lâmpada de arco carbônico era composta por dois eletrodos de carbono (um pontiagudo e outro com uma cavidade) que, em contato, produziam um ponto luminoso intenso com a passagem da corrente elétrica. A invenção chegou a ser usada em alguns pontos de iluminação pública da Inglaterra, mas logo foi abandonada pela falta de praticidade, pois todos os dias era preciso fazer manutenção com a troca dos eletrodos e limpeza de seu invólucro devido à fuligem do carbono enegrecer o vidro (GOEKING, 2009).

As primeiras lâmpadas eram fabricadas em cerâmica ou metal, e possuíam uma alça para se segurar e um pavio na outra extremidade e utilizavam algum óleo como combustível. Com o aparecimento do petróleo, o gás passou a ser utilizado na iluminação. Em 1851, no Brasil, Irineu Evangelista de Souza, conhecido como Barão de Mauá, iniciou a iluminação de ruas por meio do famoso lampião a gás.

Durante séculos, a iluminação artificial foi constituída de tochas, lampiões a gás e a óleo até se chegar à eletricidade. As primeiras lâmpadas a utilizarem a eletricidade foram as lâmpadas a arco voltaico. Somente em outubro de 1879, que Thomas Alva Edison criou a lâmpada incandescente. Ele baseou-se em um experimento de 1860 do físico e químico Joseph Swan e mudou o filamento antigo, que era composto por resíduo de carvão e alcatrão por um fio de algodão carbonizado e por final colocou este novo filamento em um bulbo de vidro sem ar. Este experimento gerou luz durante dois dias até que o filamento de algodão fosse totalmente consumido. O resultado obtido por Thomas Edison foi um sucesso e já no

ano de 1880 começava a produção de lâmpada incandescente em pequena escala. No entanto, com o tipo de filamento utilizado a durabilidade da lâmpada era muito baixa. Através de pesquisas Edison e um grupo de pesquisadores desenvolveram o filamento de tungstênio, que é comercializado até os dias atuais. Outro problema que na época a lâmpada apresentou foi que as partículas do filamento, em baixa pressão ou vácuo, se desprendiam e se depositavam na parede do bulbo, provocando o seu escurecimento. Para solucionar este problema os pesquisadores introduziram na formação da lâmpada um gás inerte, como argônio ou nitrogênio, reduzindo assim a decomposição do filamento (GOEKING, 2009).

Continuando na busca por tecnologias de iluminação, o homem chegou à invenção das lâmpadas de descarga, as quais funcionam segundo um princípio muito diferente ao da lâmpada incandescente. Essas lâmpadas começaram a ser utilizadas no início do século XIX. Dentre as lâmpadas de descarga, a lâmpada fluorescente é a de maior destaque (GOEKING, 2009).

Da mesma forma que os pesquisadores da lâmpada incandescente buscaram inspiração no Sol para desenvolver um mecanismo de acendimento, podemos dizer que a fluorescente foi inspirada nos raios. Isto porque seu funcionamento consiste em uma descarga elétrica em dois filamentos que lançam elétrons que, ao se chocarem, vaporizam o mercúrio contido no bulbo, produzindo um espectro luminoso pobre, formado basicamente por radiação ultravioleta, que é invisível ao olho humano. Porém, ao entrar em contato com a tinta de fósforo que reveste o bulbo de vidro das fluorescentes, a radiação se transforma em luz visível. Aliás, este é o motivo pelo qual por muito tempo ela foi chamada de lâmpada fosforescente (GOEKING, 2009).

Na década de 1930 surgiram as primeiras lâmpadas fluorescentes para fins comerciais. Estas lâmpadas tem como característica a utilização de reatores para dar partida em seu funcionamento e para limitar a corrente elétrica protegendo o circuito. Atualmente são responsáveis por cerca de 80% da iluminação artificial do planeta. No encontro anual da IESNA (Illuminating Engineering Society of Northern America), em setembro de 1935, foram apresentadas as primeiras lâmpadas fluorescentes.

No começo do século XX a atividade econômica no Brasil era expressivamente agrária e a participação da eletricidade como fonte de energia era inexpressiva. Somente com o início da industrialização e da concentração popular em forma de centros urbanos é que a eletricidade começou a participar de fato no Brasil.

Estima-se que o aumento do consumo de energia elétrica em países emergentes, como o Brasil, por exemplo, seja de 3 a 5% ao ano. O consumo de energia é um dos principais

indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto à capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados que pressionam o consumo de energia elétrica. Grande parte das instalações do planeta utiliza tecnologias obsoletas e pouco eficientes. O investimento em sistemas de iluminação é extremamente necessário para reduzir o consumo de energia e ajudar a preservar o meio ambiente, visto que a iluminação consome em torno de 19% da energia produzida no planeta. Já no Brasil, o consumo de energia elétrica destinado à iluminação é significativo. Aproximadamente 17% do consumo total de energia elétrica estão associados à produção de luz através da energia elétrica (KOZLOFF et al., 2001).

O racionamento de energia elétrica, ocorrido em 2001, mostrou que redução do consumo de energia em iluminação foi uma das medidas de mais fácil implementação e de maior viabilidade econômica. Essa redução ocorreu em todos os setores de atividade (Ministério de Minas e Energia, 2011).

A Tabela 1 mostra os rendimentos em (lm/W) de vários tipos de lâmpadas utilizadas no Brasil atualmente.

<i>Tipos de Lâmpada</i>	<i>Rendimento (lm/W)</i>	<i>Rendimento Energético (%)</i>
Incandescente	13	4,0
Fluorescentes Compactas	45 a 72; média: 56	13,8 a 22,0 ; média 17,2
Fluorescentes Tubulares	75 a 100	21,0 a 28,8
Mista	20 a 35	6,2 a 9,2
Vapor de Mercúrio	45 a 55	10,8 a 13,90
Vapor de Mercúrio Alta Pressão	74 a 86	19,7 a 23,4
Vapor de Sódio	75 a 105	37,0

Tabela 1 - Rendimentos de Lâmpadas

Fonte: FDTE – Fundação para o desenvolvimento tecnológico da engenharia

A eficiência no consumo de energia elétrica é um aspecto muito importante atualmente, já que atualmente a iluminação é responsável por cerca de 20% de toda a energia elétrica consumida no país e 40% no setor de comércio e serviços (Ministério de Minas e Energia, 2011).

2.2 MUDANÇAS NO CONTEXTO DE ILUMINAÇÃO - SUSTENTABILIDADE

A capacidade da sociedade em satisfazer as suas necessidades sem destruir a única forma de obtenção e produção de recursos, no caso o meio ambiente, é chamada de Sustentabilidade. Quando os seres humanos equilibrarem os seus impactos causados no meio ambiente com capacidade de regeneração e suporte ao mesmo, a sociedade estará mais próxima do termo sustentabilidade.

Para o aumento da eficiência em sistema de iluminação algumas alterações são realizadas atualmente, pode-se citar a utilização de lâmpadas fluorescentes no lugar das lâmpadas incandescentes, o emprego de reatores eletrônicos em substituição aos convencionais eletromagnéticos, o uso de luminárias com maior rendimento em conjunto com lâmpadas fluorescentes mais eficientes (SANTOS, 2004).

Apesar de todos os esforços em sistemas de iluminação para ser eficientes no uso de energia elétrica para economizar dinheiro e principalmente preservar o meio ambiente, ainda há padrões de consumo que atrapalham essas mudanças, principalmente no uso de lâmpadas incandescentes.

Estima-se que 51% de todas as lâmpadas importadas para o Brasil no ano de 2006 foram do tipo incandescente, que correspondeu a mais de 173 milhões de lâmpadas trazidas para o Brasil nesse período citado (SOUZA, 2010).

Uma medida que foi adotada na União Européia e começou a valer desde setembro de 2009 foi o banimento da utilização de lâmpadas incandescentes. Quando foi tomada esta medida, a União Européia pretendeu banir totalmente as lâmpadas incandescentes em um período de três anos. Outro ponto importante que já existe na Europa é que vários países possuem leis obrigando os fabricantes a serem responsáveis pela coleta das lâmpadas e reciclagem do mercúrio contido nelas.

No Brasil, no começo de 2011, uma portaria interministerial envolvendo os ministérios de Minas e Energia, Ciência e Tecnologia e Indústria e Comércio foi publicada no Diário Oficial da União exigindo que até 2016 retirem gradualmente do mercado brasileiro as lâmpadas incandescentes de uso comum (superiores a 40 Watts).

Segundo técnicos do Ministério de Minas e Energia, entre o período de 30 de junho de 2012 até 30 de junho de 2016, a não ser que surja uma nova tecnologia que permita às

lâmpadas incandescentes tornarem-se mais eficientes, a lâmpada incandescente deverá ser banida do mercado.

Esta medida do governo é muito positiva para o país e para os consumidores, já que ele busca minimizar principalmente o consumo de energia elétrica e melhorar a qualidade de vida. A ideia do governo é reduzir ao máximo os investimentos em eletricidade, pois além de gerar custos ambientais significativos, também necessita de altos investimentos financeiros. Com a medida se espera o desenvolvimento de novos equipamentos auxiliares para iluminação, luminárias mais eficientes, fontes de luz mais eficientes.

Outro plano do governo, existente há vários anos, que visa à eficiência energética e engloba também eficiência em iluminação é o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Ele foi criado em 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio estabelece metas de conservação de energia que são consideradas no planejamento do setor elétrico, dimensionando as necessidades de expansão da oferta de energia e da transmissão. Dentre elas destacam-se, a redução nas perdas técnicas das concessionárias, racionalização do uso da energia elétrica, aumento da eficiência energética em aparelhos elétricos e lâmpadas (PROCEL, 2011).

A Figura 1 mostra um gráfico dos tipos e quantidades de lâmpadas importadas pelo Brasil no ano de 2006, tendo a China como maior fornecedor de lâmpadas para o mercado brasileiro.

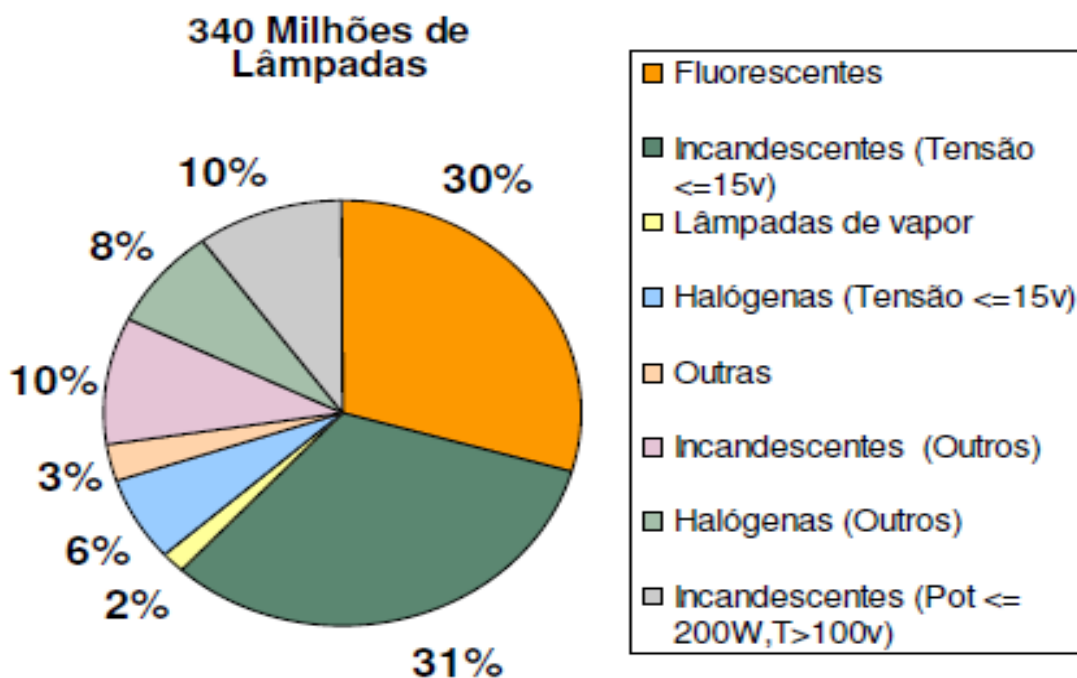


Figura 1 - Quantidade de Lâmpadas importadas pelo Brasil – 2006.
Fonte: ALICE-web

2.3 PROBLEMA AMBIENTAL – LÂMPADAS FLUORESCENTES

As lâmpadas fluorescentes contêm pequenas quantidades do elemento mercúrio (Hg), substância altamente tóxica. No Brasil são consumidas cerca de 200 milhões de lâmpadas fluorescentes por ano. Desse total, 94% são descartadas em aterros sanitários, sem nenhum tipo de tratamento, contaminando o solo e a água com metal pesado. Estas lâmpadas tem elevada capacidade de produzir impactos ambientais. O vapor de mercúrio pode contaminar a atmosfera, podendo ser inalado por humanos e também pode produzir a contaminação de solos e águas (Abilux, 2001).

Foi sancionada em 2 de agosto de 2010 a lei que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A lei faz a distinção entre resíduo que pode ser reaproveitado ou reciclado e rejeito. Um dos resíduos referentes a essa lei são as lâmpadas fluorescentes (com vapores de mercúrio). Um dos pontos fundamentais dessa lei é a chamada logística reversa, que constitui em um conjunto de ações para facilitar o retorno dos resíduos aos seus geradores para que sejam tratados ou reaproveitados em novos produtos (Abilux, 2001).

Atualmente, quase a totalidade das lâmpadas fora de uso é descartada em aterros sem tratamento prévio, contaminando solo e água com metais pesados. Cerca de 200 milhões de lâmpadas fluorescentes são consumidas e apenas 6% ou 12 milhões, recebem destinação correta - o que inclui a retirada do mercúrio e a reciclagem de seus componentes, como vidro e alumínio.

Apenas 8% dos municípios brasileiros possuem áreas com licença para depósito de lixo tóxico, incluindo lâmpadas, segundo dados da empresa Tramppo, de São Paulo, que desenvolveu tecnologia para o reaproveitamento do resíduo (Abilux, 2001).

Os grandes usuários industriais e comerciais, solicitados pela legislação ambiental e por práticas de normatização e qualificação, já dispõem de políticas próprias eficientes de gerenciamento dos resíduos de lâmpadas fluorescentes.

Empresas como GE, Philips, Osram e Sylvania, distribuidores e varejo já planejam montar gestora independente para operacionalizar descarte e reciclagem segundo a nova legislação. O conjunto formado pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes desses produtos, programa a criação de uma instituição gerenciadora que seria responsável desde o recebimento das lâmpadas após o fim da vida útil até o envio para reaproveitamento dos materiais descontaminados (Abilux, 2001).

A Tabela 2 mostra o teor de mercúrio nas lâmpadas fluorescentes e de descarga à alta pressão.

Tipo de lâmpada	Teor de mercúrio em mg		
	Média inferior	Média	Média superior
Fluorescente tubular (15 W a 110 W)	8	15	25
Fluorescente compacta (5 W a 42 W)	3	4	10
Luz mista (160 W a 500 W)	11	17	45
Vapor de mercúrio (80 W a 400 W)	13	32	80
Vapor de sódio (70 W a 1000 W)	15	19	30
Multivapor metálico (35 W a 200 W)	10	45	170

Tabela 2 - Teor de mercúrio.
Fonte: Abilux (2001).

3 LÂMPADAS FLUORESCENTES

3.1 COMPOSIÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES

As lâmpadas fluorescentes são amplamente utilizadas em diversas aplicações. É uma alternativa adequada às lâmpadas incandescentes, devido ao baixo rendimento destas, o que causa desperdício de energia. Como afirma Rodrigues (2002), a respeito das lâmpadas fluorescentes “Estas lâmpadas são a clássica forma para uma iluminação econômica. Sua alta eficiência e longa durabilidade garantem sua aplicação nas mais diversas áreas industriais e comerciais. A descarga elétrica em seu interior emite quase que totalmente radiação ultravioleta (invisível ao olho humano), gerada pelo vapor de mercúrio, que, por sua vez, será convertida em luz pelo pó fluorescente que reveste a superfície interna do bulbo.”

Há diversos tipos de lâmpadas fluorescentes, tubulares ou compactas. As lâmpadas fluorescentes tubulares são divididas em diversos tipos, entre os quais há uma variação de diâmetro do tubo. A Tabela 3 exemplifica alguns itens desta classificação:

Lâmpada fluorescente	Diâmetro (mm)
T2	7
T5	16
T8	26
T9	29
T12	38

Tabela 3 - Tipos de lâmpadas fluorescentes
Fonte: Osram (2011)

A redução do diâmetro das lâmpadas fluorescentes remete à uma evolução no últimos tempos. Há vantagens quanto a miniaturização destas, conforme explica Rodrigues (2002):

“A grande revolução das fluorescentes ao longo dos anos tem ficado por conta da redução do diâmetro. Quanto menor ele for, maior é a possibilidade de desenvolvimento óptico dos refletores, permitindo melhor eficiência das luminárias. As versões tradicionais da lâmpada são produzidas em T12 (38 mm) ou T10 (33 mm), e as versões mais modernas em T8 (26 mm). O passo mais recente para otimização global dos sistemas fluorescentes é a total miniaturização obtida com a versão T5 (16 mm) que, além do diâmetro de 16 mm, teve uma redução de 50 mm no comprimento total. Compactação, aumento na eficiência luminosa, design mais leve e criativo e operação direta em reatores eletrônicos.” (RODRIGUES, 2002)

O presente trabalho utilizará a lâmpada fluorescente tubular T5 como objeto de estudo e análise. A Figura 2 apresenta um exemplo deste tipo de lâmpada.

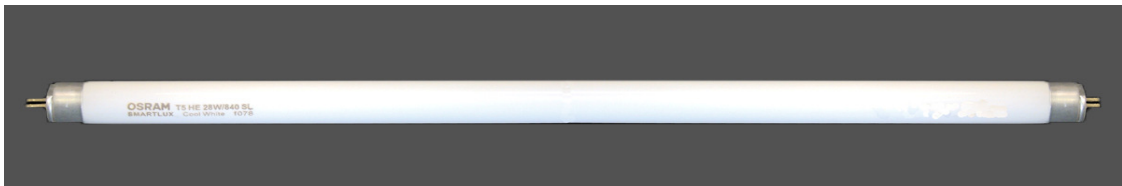


Figura 2 - Lâmpada fluorescente T5 (Fonte: Osram)

A tendência é de que a lâmpada T5 substitua as lâmpadas T8 utilizadas atualmente, como afirma (SANTOS, 2004):

“Atualmente as lâmpadas fluorescentes T5 são pouco utilizadas nas instalações brasileiras por possuírem um preço relativamente maior do que as lâmpadas T8, mas assim como as lâmpadas fluorescentes de 32W/T8 estão substituindo as de 40W/T12, futuramente as lâmpadas de 28W/T5 substituirão as lâmpadas de 32W/T8. As lâmpadas T5 foram desenvolvidas especialmente para operar com reatores eletrônicos e só obtém alta eficiência quando alimentadas em alta frequência. Como estas lâmpadas possuem atualmente um preço maior que as lâmpadas standard, sua vida útil passa a ser um requisito de extrema importância no desenvolvimento do reator eletrônico.” (SANTOS, 2004)

A Figura 3 mostra uma lâmpada fluorescente comum com suas principais partes constituintes. Externamente, é formado por um bulbo de vidro com as duas bases nas extremidades. Nas extremidades há um tubo de exaustão onde estão dispostos os filamentos da lâmpada e onde está acoplado o catodo. No interior do bulbo é formado um arco de descarga sobre o gás (no caso, vapor de mercúrio) que preenche o tubo. Na superfície interna

da estrutura está uma camada de fósforo, responsável pela conversão de radiação ultravioleta em luz visível.

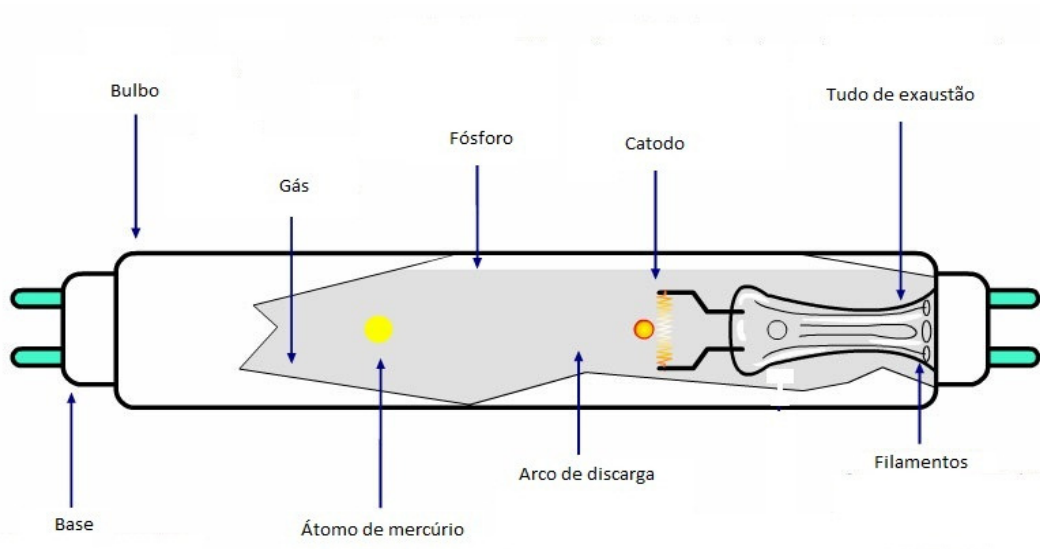


Figura 3 - Composição da lâmpada fluorescente
Fonte: Newmoa (2008)

A aplicação de uma tensão entre os terminais da lâmpada fluorescente aquece a estrutura e permite a descarga através do gás, fazendo com que os elétrons fluam de um catodo para o outro da lâmpada. Quando os elétrons da descarga atingem os átomos de mercúrio presentes no interior do bulbo, é gerada radiação ultravioleta.

Além disso, a lâmpada contém uma camada de fósforo inorgânico na superfície interna. Esta substância, ao receber a radiação ultravioleta, a converte em luz visível, como descreve Xavier (2005):

“Esta radiação, por sua vez, é convertida em luz pelo pó fluorescente que reveste a superfície interna do bulbo. É da composição deste pó que resultam as mais diferentes alternativas de cores de luz adequadas a cada tipo de aplicação, além de determinar a qualidade e quantidade de luz e a eficiência na reprodução das cores. São amplamente utilizadas em setores industriais, comerciais e de serviços.”
 (XAVIER, 2005)

Para ocorrer à ignição da lâmpada é necessário que o catodo atinja um nível de temperatura adequado, ou seja, este aquece e permite que ocorra a descarga de elétrons para a outra extremidade da lâmpada, durante o ciclo AC.

Entretanto, quando a temperatura inicial dos filamentos da lâmpada é baixa, se faz necessário uma alta tensão para efetuar a ignição da mesma. Esta característica provoca uma aceleração do desgaste destes filamentos, através da crepitação e evaporação.

Para evitar este problema, se faz necessário um método que realize o pré-aquecimento dos filamentos. Desta forma, quando a tensão for aplicada aos terminais, os filamentos já estarão com uma temperatura adequada para seu melhor funcionamento, evitando o desgaste do material que os compõe e, por conseguinte, aumentando a vida útil da lâmpada fluorescente.

4 REATORES

As lâmpadas fluorescentes necessitam de um sistema que seja capaz de fornecer níveis de tensão adequados para sua partida e para seu funcionamento. Lâmpadas fluorescentes necessitam de um reator para aplicar tensão de partida para a lâmpada e estabelecer fluxo de corrente – um ‘arco’ – entre os eletrodos da lâmpada. Uma vez que a lâmpada está operando, o reator também regula a corrente e a potência da lâmpada (OSRAM, 2011).

Os reatores podem ser divididos em dois grandes grupos: reatores magnéticos e reatores eletrônicos.

4.1 REATORES MAGNÉTICOS

Os reatores magnéticos são os mais simples em termos de construção. São formados por um núcleo magnético e uma bobina, usados para regular a tensão dos terminais das lâmpadas fluorescentes e permitir as mínimas funções necessárias para a ignição e o funcionamento da lâmpada.

Sua forma construtiva os torna mais robustos, pois são construídos com materiais mais resistentes. Este tipo de reator tem sido usado durante muitos anos, e ainda é aplicado em sistemas mais antigos. Sua estrutura permite que este equipamento suporte a exposição a transientes e flutuações do sistema elétrico e sustente operações com temperaturas variadas, com alta ou baixa temperatura.



Figura 4 - Reator magnético
Fonte: Shopping Construir – Loja Online

Os reatores magnéticos possuem algumas desvantagens quando a sua utilização, como discorre Ferreira, 2008:

“O reator eletromagnético é composto por uma indutância de elevado valor, que limita a corrente drenada pela lâmpada fluorescente, e por relés e/ou capacitores, que fornecem condições necessárias para a ignição da lâmpada. Este tipo de reator é ligado diretamente ao sistema de alimentação, operando a uma frequência de 50 ou 60 Hz e, por este motivo, pode produzir o efeito estroboscópico em ambientes onde a iluminação é realizada através destes dispositivos, causando a impressão de ausência de movimento, podendo até mesmo causar ilusão de ótica em pessoas que operam máquinas rotativas que funcionam a esta frequência ou em múltiplos inteiros deste valor. A presença de um indutor relativamente grande alimentado em baixa frequência é responsável por uma densidade de potência muito baixa. Há a possibilidade de apresentar ruído audível, por operar numa frequência na faixa audível, a eficiência de cerca de 85%, a qual deve-se às perdas por efeito Foucault, perdas por histerese e perdas no cobre dos enrolamentos, comprometendo a qualidade e eficiência do sistema.” (FERREIRA, 2008)

4.2 REATORES ELETRÔNICOS

Os reatores eletrônicos possuem uma topologia mais complexa, em substituição do núcleo magnético e da bobina dos reatores magnéticos. Dessa forma, o tamanho deste tipo de reator é reduzido, facilitando seu manuseio e adequação às luminárias das lâmpadas fluorescentes.

Este tipo de reator traz algumas vantagens em relação ao reator magnético. Um dos principais benefícios é a maior eficiência apresentada pelo reator eletrônico. As perdas magnéticas e do cobre que constitui o enrolamento dos reatores magnéticos são bem maiores, provocando desperdício de energia elétrica e aquecimento do equipamento. Além disso, os reatores eletrônicos são mais leves e mais silenciosos do que os reatores magnéticos, devido à operação em alta frequência.

Ferreira, 2008 afirma:

“Os reatores eletrônicos comumente comercializados são conversores estáticos com característica fonte de corrente na saída (ponto de conexão com a lâmpada), apresentando dois estágios em sua configuração mais comum: estágio retificador e estágio inversor. Para este tipo de reator, as lâmpadas fluorescentes operam em alta frequência, daí a razão para se utilizar um estágio retificador e um estágio inversor.

Por operar em alta frequência, os problemas ligados ao efeito estroboscópico e ao ruído audível são eliminados e as lâmpadas fluorescentes apresentam eficácia luminosa superior àquelas obtidas quando operadas em baixa frequência (50 ou 60 Hz). Isto se deve ao fato do intervalo de tempo da passagem por zero de tensão aplicada sobre a lâmpada ser muito pequeno durante a operação em elevadas frequências, sendo insuficiente para a extinção do arco elétrico na coluna de gás. Quando operadas em baixas frequências, a passagem pelo zero de tensão é mais lenta, sendo o tempo suficiente para que o arco elétrico na coluna de gás da lâmpada se extingue. Deste modo, estima-se que a eficácia luminosa na lâmpada fluorescente aumente em até 12% em função da operação em elevadas frequências. Além do mais, os reatores eletrônicos convencionais apresentam um rendimento em torno de 90%.” (FERREIRA, 2008)

Os reatores eletrônicos podem ser classificados quando ao tipo de partida que será aplicada na lâmpada, sendo divididos em três grupos:

- Reator eletrônico de partida rápida;
- Reator eletrônico de partida instantânea;
- Reator eletrônico de partida programada;

Quando ao reator de partida rápida, (Proarq, 2004) afirma: “O acendimento é controlado eletronicamente pelo sistema de pré-aquecimento dos filamentos da lâmpada. O reator gera uma pequena tensão em cada filamento e, em seguida, uma tensão de circuito aberto entre os extremos da lâmpada. Esta partida possibilita a emissão de elétrons por efeito termo-iônico. O tempo entre a energização do reator e o acendimento da lâmpada é aproximadamente em torno de 1s a 2,5s.”

A pequena tensão em cada filamento é responsável pelo pré-aquecimento destes, permitindo com que a ignição da lâmpada ocorra com um menor valor de tensão de circuito aberto entre os extremos da lâmpada. Esta última é a tensão responsável por gerar, de fato, o efeito luminoso do dispositivo.

O resultado desta aplicação é a preservação dos filamentos da lâmpada fluorescente, o qual resulta em uma maior vida útil da mesma, devido à ignição da lâmpada ocorrer na temperatura adequada e, portanto com uma menor tensão aplicada entre seus terminais.

A desvantagem deste tipo de reator eletrônico é o fato de que a tensão de pré-aquecimento dos filamentos permanece constante durante todo o funcionamento da lâmpada, mesmo após já ter ocorrido a partida desta. Esta atuação desnecessária gera um consumo adicional de potência, causando desperdício de energia elétrica.

O reator eletrônico de partida instantânea opera sem realizar o pré-aquecimento dos filamentos da lâmpada. Assim, uma alta tensão é aplicada entre os terminais da lâmpada para realizar a ignição e isso gera um grande estresse sobre os filamentos. A utilização deste tipo de reator tende a reduzir a vida útil da lâmpada fluorescente. Como não há tensão de pré-

aquecimento, o reator de partida instantânea consome uma quantidade menor de energia elétrica se comparada ao reator de partida rápida.

O reator eletrônico de partida programada eleva a temperatura dos eletrodos da lâmpada para um valor otimizado, através de um circuito de controle, no momento da ignição da lâmpada. Assim, há uma melhora significativa da vida útil da lâmpada, através do aumento do número de ciclos de operação. Este tipo de reator é adequado em locais onde se utiliza sensor de presença para operar a lâmpada, uma vez que esta tende a sofrer um número maior de comandos ON/OFF nesta ocasião.

Além disso, o controle é capaz de adequar o aquecimento dos eletrodos a um nível intermediário, para se obter um balanceamento entre a vida útil da lâmpada e eficiência energética.

Além desta classificação, os reatores eletrônicos também podem ser categorizados quanto à quantidade de lâmpadas: simples (uma lâmpada) ou duplo (duas lâmpadas); e quanto ao fator de potência: alto fator de potência ou baixo fator de potência.

A partir de meados de 2003 foi proibida a fabricação de reatores eletrônicos de baixo fator de potência com potência total (reator mais lâmpada) superior a 60W. Ou seja, reatores duplos para lâmpadas fluorescentes de 32W, 40W e 110W e reatores simples para lâmpada fluorescentes de 110W devem ser alto fator de potência e possuírem proteção contra falha de lâmpada (lâmpada sem gás). (SANTOS, 2004)

4.2.1 **Reator eletrônico auto-oscilante**

A Figura 5 mostra o circuito de um típico reator eletrônico auto-oscilante.

O circuito de início é composto pelo resistor R_{st} , capacitor C_{st} , diodo D_{st} e diac D_{ac} . Quando a entrada DC é alimentada, a tensão do capacitor C_{st} aumenta até alcançar a tensão de ruptura do diac. Com a condução de D_{ac} uma tensão de disparo é aplicada ao gate de S_2 . Quando S_2 é ativado pelo pulso, a tensão de S_2 é rapidamente comutada para o terra, iniciando a oscilação do circuito ressonante.

Enquanto S_2 é disparado em cada meio ciclo, a carga elétrica desenvolvida através do capacitor C_{st} é descarregada através de D_{dis} prevenindo tensão de build-up dos próximos pulsos de start-up.

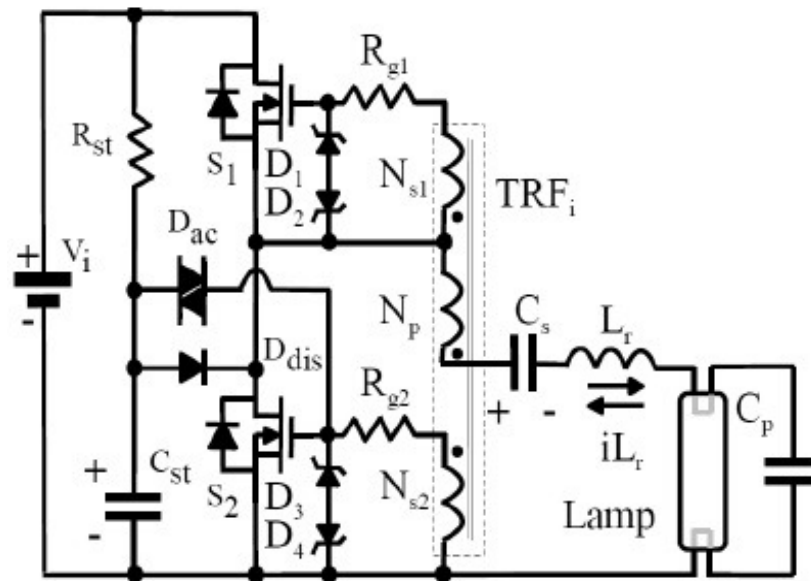


Figura 5 - Reator auto-oscilante
Fonte: Gules (2010)

As chaves de potência S1-S2 e o circuito ressonante L_r , C_s e C_p compõem um circuito ressonante de alta frequência. A corrente do circuito muda de uma maneira ressonante com a condução da chave S2. O circuito de drive auto oscilante é composto por um transformador de corrente TRFi com três enrolamentos (N_p , N_{s1} e N_{s2}), um resistor de gate R_{g1} e R_{g2} , e dois conjuntos de diodos zener back-to-back (D1 a D4). A corrente ressonante do indutor é convertida em um sinal de drive complementar para as chaves S1 e S2 através do transformador TRFi. Logo, haverá uma troca no estado de condução das chaves e o reator irá operar em um modo oscilatório autossustentado (GULES et al., 2011).

5 TIPOS DE PRÉ-AQUECIMENTO

Como já explanado anteriormente, as lâmpadas fluorescentes, acopladas a um reator eletrônico auto-oscilante (Figura 5), apresentam uma grande impedância antes da “ignição”. Para que ocorra a passagem de corrente elétrica através do gás ionizado dentro da lâmpada, a tensão nos pólos da lâmpada e a corrente de ressonância no reator devem elevar-se até que a temperatura e a tensão necessárias para a ignição sejam atingidas. Nesse momento, a tensão de ignição e a corrente de ressonância são extremamente altas, o que acaba por deteriorar os eletrodos das lâmpadas e, conseqüentemente, por reduzir significativamente seu tempo de vida.

Observou-se, então, que as condições iniciais e de regime permanente dos reatores e das lâmpadas fluorescentes apresentam características e condições ideais de funcionamento. Essas condições estão expostas abaixo:

1. O período de pré-aquecimento não pode ser menor que 500ms;
2. A temperatura de emissão termiônica dos eletrodos deve ser próxima a 1000k, para que se reduza a degradação dos eletrodos da lâmpada.
3. A tensão no pré-aquecimento deve ser baixa para não degradar os filamentos da lâmpada.
4. A tensão necessária a ignição da lâmpada deve ser aplicada apenas após ser alcançada a temperatura ideal de ignição dos eletrodos.
5. A excitação forçada dos filamentos da lâmpada deve ser reduzida ao iniciar-se o período de regime permanente, dado que os eletrodos são projetados para a temperatura nominal deste período.
6. O fator de crista durante operação da lâmpada deve ser menor que 1.7, para que grandes densidades de corrente na superfície dos eletrodos da lâmpada sejam evitadas (GULES et al., 2011).

Logo, com o intuito de reduzir o desgaste causado por elevados valores de tensão e pela alta temperatura que surgem nos eletrodos das lâmpadas no momento que antecede a ignição, são utilizados alguns circuitos chamados de “circuitos de pré-aquecimento”. Esses circuitos têm por objetivo “pré-aquecer” os filamentos da lâmpada antes da ignição. Ao mesmo tempo em que pré-aquece os filamentos das lâmpadas, o circuito é responsável por manter a tensão nos eletrodos menor que a tensão nominal, mesmo que o reator auto-oscilante esteja em funcionamento normal nesse período. Logo antes da ignição da lâmpada, a tensão nos eletrodos é elevada, porém a um valor menor que o nominal, preservando a integridade física dos eletrodos.

Deseja-se então analisar os diferentes tipos de pré-aquecimento existentes, para que possam ser estudados e comparados entre si através de ensaios e pela aquisição de dados, que mostrarão as eficiências, qualidades, deficiências e adequações de cada método. Cabe aqui ressaltar que alguns dos vários métodos de pré-aquecimento podem ser aplicados também com reatores eletrônicos de frequência imposta, por exemplo, porém o objeto principal de estudo deste trabalho de conclusão final será a análise de métodos de pré-aquecimento exclusivamente com reatores eletrônicos auto-oscilantes.

A seguir serão citados e explicados alguns dos métodos de pré-aquecimento existentes, os quais serão o alvo dos estudos aqui propostos. Os vários tipos de PTC são divididos em

dois métodos principais, os quais são: pré-aquecimento por fonte de corrente e pré-aquecimento por fonte de tensão.

5.1 PRÉ-AQUECIMENTO POR FONTE DE CORRENTE

O método de pré-aquecimento por fonte de corrente é obtido com uma corrente constante nos filamentos. Quando a corrente do indutor ressonante passa pelos filamentos tem-se esta característica.

O pré-aquecimento por termistores (PTC) e a pela operação com frequência imposta são tipos de pré-aquecimento dos filamentos por fonte de corrente.

5.1.1 Circuito de Pré-aquecimento por “termistor” e capacitor em paralelo

Um dos circuitos já utilizados com reatores auto-oscilantes para lâmpadas tubulares T5 é o PTC (*positive temperature coefficient*). Seu funcionamento baseia-se no conceito de “termistor”, isto é, um componente passivo que tem sua característica resistiva alterada com a mudança no valor de sua temperatura (Figura 6) (GULES et al., 2011).

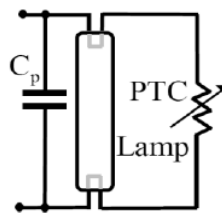


Figura 6 - Pré-Aquecimento PTC com um capacitor
Fonte: Gules (2010)

No caso do PTC, a resistência do termistor aumenta com o aumento da temperatura. O PTC é conectado paralelamente à lâmpada e comporta-se como um curto circuito no momento em que a lâmpada encontra-se “fria”. Em um primeiro estágio, através da corrente de ressonância, tanto o PTC quanto o eletrodo da lâmpada são aquecidos. Como a resistência de um PTC é tão alta quanto sua temperatura, o pré-aquecimento atinge em determinado estágio um valor de temperatura, conseqüentemente de resistência, tão alto que o termistor passa a ser considerado como um circuito aberto, encerrando assim o ciclo de pré-aquecimento. Com a

“abertura” do circuito, a tensão no capacitor C_P em paralelo com a lâmpada eleva-se a um valor suficiente à ignição (GULES et al., 2011).

Porém, neste processo de pré-aquecimento, existem algumas deficiências que tornam o método não tão eficiente, tais como: a tensão nos eletrodos durante o processo não é nula, a tensão e a corrente de ressonância são altas, a tensão de ignição da lâmpada é menor do que na ignição a frio, a temperatura dos filamentos não é a ideal (GULES et al., 2011).

5.1.2 Circuito de Pré-aquecimento por “termistor” e duplo capacitor em paralelo

Para contornar algumas das deficiências apresentadas pela solução de pré-aquecimento com um único capacitor em paralelo com a lâmpada, há um segundo circuito também com a utilização do *PTC*, porém com a adição de mais um capacitor “ C_{P2} ”, este em paralelo com o “termistor” (Figura 7).

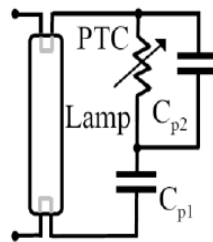


Figura 7 - Aquecimento *PTC* com dois capacitores em paralelo
Fonte: Gules (2010)

Com a adição do capacitor C_{P2} a tensão sobre o *PTC* diminui, devido ao divisor de tensão capacitivo C_{P1} e C_{P2} . Com a diminuição da tensão sobre o termistor, diminui-se consequentemente as perdas resistivas neste. Menos perdas no *PTC* significam menos perdas em todo o processo de pré-aquecimento (GULES et al., 2011).

Em contra partida, mesmo com as alterações no circuito de pré-aquecimento com *PTC*, este método ainda apresenta baixo rendimento e não atende completamente aos requisitos iniciais para uma boa ignição da lâmpada fluorescente.

5.1.3 Circuito de pré-aquecimento por variação de frequência de comutação imposta

Os métodos de pré-aquecimento que controlam a frequência de comutação aplicam-se apenas a reatores eletrônicos de frequência imposta e não a reatores eletrônicos auto-

oscilantes. Logo, esse método será explanado apenas par que se tenha conhecimento dos tipos de circuitos e métodos disponíveis, porém ele não será objeto de estudo nas análises a serem executadas na etapa de ensaios e testes em laboratório.

Nesse método de pré-aquecimento mantém-se a frequência de comutação maior que a frequência do inversor de frequência de ressonância. A tensão do capacitor C (em paralelo com a lâmpada) mantém-se menor que a tensão de ignição e a corrente de pré-aquecimento é obtida pela circulação da corrente de ressonância pelo capacitor C e pelos filamentos desta (GULES et al., 2011).

Após o período de pré-aquecimento a frequência de chaveamento retorna ao seu valor nominal e a tensão no capacitor C eleva-se até a tensão de ignição da lâmpada. Esse método de pré-aquecimento é muito utilizado como reatores eletrônicos de frequência imposta e dependem de um circuito auxiliar microcontrolado, por exemplo, o qual deverá atuar no controle da frequência de chaveamento do circuito (GULES et al., 2011).

5.2 PRÉ-AQUECIMENTO POR FONTE DE TENSÃO

O pré-aquecimento por fonte de tensão caracteriza-se pela aplicação de uma tensão rms constante nos filamentos. O circuito auxiliar e circuito auxiliar auto-oscilante são exemplos de pré-aquecimentos por fonte de tensão e serão, a seguir, explanados.

5.2.1 *Circuito de pré-aquecimento auxiliar*

A utilização de um circuito auxiliar responsável pelo pré-aquecimento dos filamentos de uma lâmpada apresenta várias vantagens. Como um circuito auxiliar, o pré-aquecimento pode ocorrer em uma etapa separada, desvinculando-se do período de funcionamento da lâmpada. A tensão e a corrente que alimentam o circuito pré-aquecedor são independentes do reator eletrônico auto-oscilante, possibilitando que a tensão de operação na lâmpada seja nula durante o processo de pré-aquecimento e que a corrente de ressonância, temperatura dos filamentos e tensão de ignição atinjam valores ideais (GULES et al., 2011).

Porém, circuitos integrados destinados ao pré-aquecimento de filamentos onde a frequência de comutação é controlada não são aplicáveis a reatores eletrônicos auto-

oscilantes. Logo, fez-se necessária a criação de um circuito de pré-aquecimento que fosse aplicável a reatores eletrônicos auto-oscilantes e que apresentasse bom rendimento, confiabilidade e viabilidade.

Atendendo a demanda de um circuito mais simples e funcionalmente compatível com reatores eletrônicos auto-oscilantes, foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa em eletrônica de potência do departamento de eletrotécnica da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) com orientação do professor Eng. Roger Gules, um circuito auxiliar auto-oscilante para reator eletrônico auto-oscilante para lâmpadas fluorescentes.

O circuito desenvolvido utiliza uma topologia com circuito inversor quase-ressonante. A tensão através da indutância ressonante é aplicada aos filamentos da lâmpada através de um enrolamento secundário, de tal forma que a tensão é ajustada através da relação de espiras do transformador (GULES et al., 2011).

5.2.2 Circuito de pré-aquecimento de pré-aquecimento auxiliar auto-oscilante

O circuito auxiliar criado apresenta uma topologia baseada em um circuito inversor semi-ressonante com chave simples. O circuito é composto por um capacitor C_{ra} , um indutor L_{ra} (transformador), uma chave S_a e um diodo D_a .

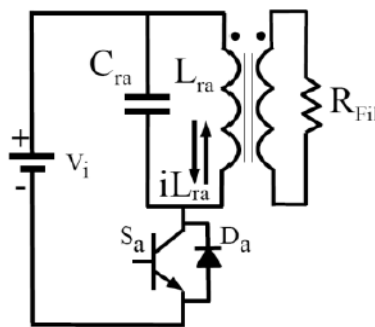


Figura 8 - Chave simples semi-ressonante inversora
Fonte: Gules (2010)

Este circuito divide-se em dois estágios de operação bem definidos. O primeiro chama-se *estágio ressonante*, período tal que a tensão no capacitor C_{ra} vai à zero e retorna ao

seu valor inicial (V_i). No mesmo instante a corrente no indutor L_{ra} altera-se de modo ressonante a partir de I até chegar ao valor de $-I$ (GULES et al., 2011).

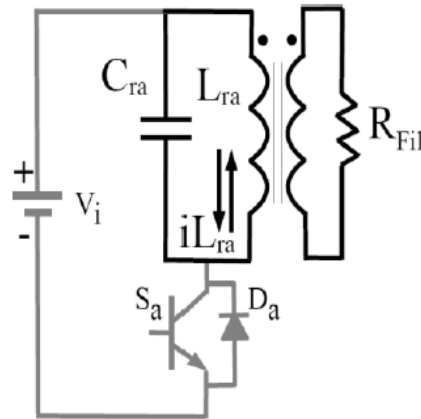


Figura 9 - Estágio ressonante.
Fonte: Gules (2010)

O segundo estágio chama-se *modo Linear* (Figura 10), o qual se divide em duas etapas. Na primeira etapa (a) o diodo D_a conduz a corrente de ressonância do indutor L_{ra} com valor inicial a $-I$. Em uma segunda etapa, a chave S_a , após ser acionada, conduz uma corrente crescente que percorre o indutor L_{ra} dada à tensão constante sobre este igual a V_i . Ao ser S_a comutada novamente, inicia-se novamente o processo (GULES et al., 2011).

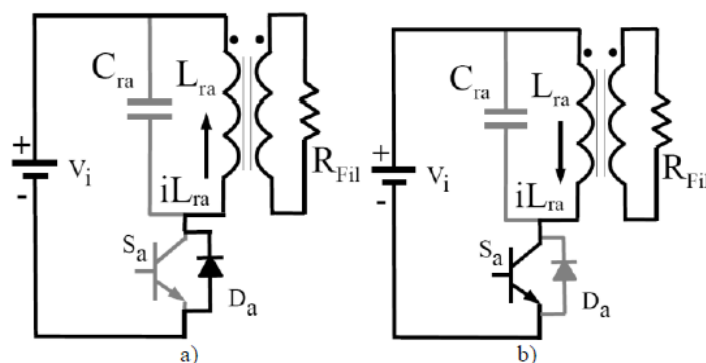


Figura 10 - Estágio Linear: a) Período de descarga do indutor; b) Período de carga do indutor
Fonte: Gules (2010)

O processo de pré-aquecimento pode ter seu tempo de alterado, basta que a relação $\gamma = R_f/R_c$ seja ajustada de acordo com o tempo desejado. Existem circuitos detectores de resistência, os quais são baseados na tensão e corrente dos filamentos da lâmpada, por exemplo, que permitem a identificação instantânea dessa relação. Esse método, porém,

introduz significativa elevação de custo ao circuito de pré-aquecimento, logo é viável que a relação γ seja pré-estabelecida, isto é, um valor fixo seja estabelecido de acordo com o tempo de pré-aquecimento desejado (GULES et al., 2011).

6 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE LÂMPADAS FLUORESCENTES DE ACORDO COM O CIRCUITO DE PRÉ-AQUECIMENTO UTILIZADO

Com o intuito de verificar qual a real influência que os circuitos de pré-aquecimento têm na vida útil de lâmpadas fluorescentes, faz-se necessário o estudo comparativo dos sistemas de iluminação que se utilizam de reatores eletrônicos auto-oscilantes sem pré-aquecimento, com um pré-aquecimento tradicional e com o pré-aquecimento que se utiliza de circuito auxiliar.

6.1 ENSAIO ATRAVÉS DE CICLOS RÁPIDOS

A Sociedade de Engenharia IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) apresenta algumas especificações com relação aos testes de ciclo rápidos que podem ser efetuados com lâmpadas tubulares fluorescentes do tipo T5. Em uma dessas especificações a sociedade determina que o método de ensaio deva dispor de uma grande amostragem de lâmpadas ligadas durante 3 horas e desligada durante 20 minutos, tempo este que representa o tempo necessário para constatação da vida útil de uma lâmpada (norma IES LM-40-1987). (DAVIS et. al., 1996). É observável que o tempo sugerido, dado que este é considerado ideal, não apresenta idealidade quanto ao provável tempo necessário para concluir-se o teste. Logo, surge a necessidade de elaborar-se um ciclo de testes rápido tal que possibilite a conclusão do mesmo em no máximo 30 ou 40 dias. Para tanto é necessário diminuir-se o tempo que a lâmpada irá ficar acesa, assim como o tempo em que ela irá ficar apagada (desligada). No entanto, algumas diferenças relevantes surgem com essas modificações, pois o tempo sugerido por Davis (1996) para os testes de ciclo rápido se deve ao fato da necessidade de garantir-se condições iniciais para cada transitório, isto é, a lâmpada e seus filamentos devem se estabilizar após a ignição e depois de desligada deve voltar às suas condições iniciais. Isso significa que os filamentos da lâmpada devem esfriar completamente após desligada, dado

que se já estiverem aquecidos no momento da ignição os filamentos não serão tão desgastados quanto poderiam ser se estivessem “frios”, tornando as condições de teste não tão extremas quanto deveriam (DAVIS et. al., 1996).

6.2 DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS NECESSÁRIOS À ESTABILIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS FILAMENTOS

Alguns estudos foram feitos para a determinação do tempo suficiente para estabilização das temperaturas dos filamentos para a realização dos ciclos rápidos de ensaio. Um desses estudos foi feito por Robert Davis da IESNA, o qual analisa a resistência dos filamentos para diferentes tempos de resfriamento. Em um primeiro momento as resistências dos filamentos foram medidas e, após um período de 100 horas, as medidas das resistências dos filamentos foram realizadas novamente. Após as lâmpadas serem desligadas a medida da resistência dos eletrodos foram realizadas através de um *Digital Ohmmeter Valalla Scientific 4100 ATC* a uma corrente de 10mA em intervalos de 10 segundos entre cada medida, durante 11 minutos em uma temperatura ambiente de 25°C (DAVIS et. al., 1996). Dessas medidas pode-se obter a seguinte curva para duas lâmpadas de uma determinada amostragem:

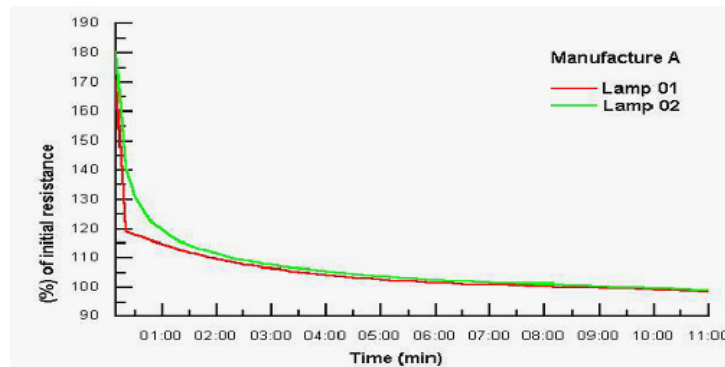


Figura 11 - Porcentagem da resistência em virtude do tempo de resfriamento
Fonte: Santos (2004)

Logo, pode-se perceber que, para uma estabilização completa dos filamentos da lâmpada é ideal que esta seja desativada durante o ciclo por pelo menos 11 minutos até ser ligada novamente. Em contra partida, observa-se que a partir de 5 minutos a estabilidade dos filamentos já é praticamente alcançada. Com isso, pode-se considerar como “ideal” (considerando o tempo de ensaio) que a lâmpada permaneça desligada durante 5 minutos. DAVIS (1996) observa que o *tempo ligado* tem menor influência no resultado dos testes do

que o *tempo desligado*. Na tabela abaixo são apresentados os resultados de ensaios baseados em 4 configurações de tempo (Tempo ligado/Tempo desligado), efetuados até que o número de amostras com falha chegasse a 100% (sobrevivência igual a zero):

% Sobre- vivência	Número de Ciclos até a Ocorrência de Falhas							
	A: 40s/20s		B: 40s/5min		C: 5min/5min		D: 5min/20s	
	Base P/ Baixo	Base P/ Cima	Base P/ Baixo	Base P/ Cima	Base P/ Baixo	Base P/ Cima	Base P/ Baixo	Base P/ Cima
88	17175	26149	14342	14417	15331	16998	24492	26162
75	22730	27165	15705	15063	17336	18648	25681	27275
63	28295	30497	16367	15128	17773	20760	28297	28693
50	40479	36419	16798	17473	18030	20832	28745	32157
38	40751	37650	18454	17957	19726	21581	30290	33560
25	42270	39566	19738	21787	20137	23207	33795	33863
13	50000	40967	22346	25782	21185	24028	34479	37365
0	56057	43360	42054	29180	27929	24032	35843	39026
Média	37220	35272	20726	19598	19681	21261	30203	32263

Tabela 4 - Resultados de ensaios baseados em 4 configurações de tempo.

Fonte: Davis (1996) Traduzido

Baseando-se na tabela acima, pode-se concluir que o tempo ideal para se efetuar um ciclo de ensaios rápidos, e que comprometam a fidelidade do ensaio o mínimo possível, está representado pela configuração “B”. Esta configuração determina para um ciclo de teste o tempo de 40 segundos para “*on-time*” (lâmpada ligada) e 5 minutos para “*off-time*” (lâmpada desligada).

6.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO

Então, baseado nos estudos de ciclo rápido já efetuados e acima mencionados e analisados, o tempo e condições de ensaio serão definidos da seguinte forma:

- O ensaio será realizado simultaneamente com quatro grupos, os quais seguem:
 - 1º Grupo – Reator Fabricante B (Fabricante local) sem circuito de pré-aquecimento com duas lâmpadas tubulares fluorescentes tipo T5 de 28W (cada uma);
 - 2º Grupo – Reator Fabricante B (Fabricante local) com circuito de pré-aquecimento do tipo PTC para duas lâmpadas tubulares fluorescentes tipo T5 de 28W (cada uma) – Fabricante da lâmpada 2;

- 3º Grupo – Reator Fabricante A (Líder de mercado) com circuito de pré-aquecimento do tipo PTC para duas lâmpadas tubulares fluorescentes tipo T5 de 28W (cada uma) – Fabricante da lâmpada 1;
 - 4º Grupo – Reator Fabricante B (Fabricante local) com circuito auxiliar auto-oscilante de pré-aquecimento para duas lâmpadas tubulares fluorescentes tipo T5 de 28W (cada uma);
2. Os reatores das lâmpadas serão comutados simultaneamente, porém o número de operações e identificação de posteriores “falhas” serão registrados individualmente para cada lâmpada.
 3. O tempo de comutação dos reatores, baseado nos estudos efetuados nos tópicos anteriores, será definido da seguinte forma para cada ciclo:
 - Reatores energizados por 40 segundos (Lâmpada ligada);
 - Reatores desenergizados por 5 minutos (Lâmpadas desligadas);
 Esses tempos serão repetidos ciclo a ciclo até que uma “falha” seja identificada. Neste momento, a contagem é interrompida para a lâmpada que apresentou defeito, mas continua para as lâmpadas que ainda apresentam funcionamento normal.
 4. As comutações de cada ciclo serão registradas em uma memória pela sensibilização de sensores colocados em cada lâmpada. Logo, serão registrados em um contador os números de comutação para cada lâmpada individualmente. O término do ensaio será alcançado após a constatação de falha de todas as lâmpadas sob teste.

6.4 DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE TESTES

O projeto do circuito a ser utilizado para realizar os testes nos circuitos de pré-aquecimento é representado pelo diagrama de blocos da Figura 12.

O diagrama de blocos foi elaborado com o intuito de facilitar o entendimento das partes componentes do projeto do circuito elétrico. Desta forma, torna-se mais claro e eficaz o funcionamento geral do sistema, através da representação, a qual antecede a etapa de desenho do diagrama elétrico.

Baseando-se no diagrama de blocos, o circuito elétrico pode ser desenhado com mais clareza e objetividade, com foco no objetivo de funcionamento de cada bloco tanto independentemente, como no conjunto do sistema.

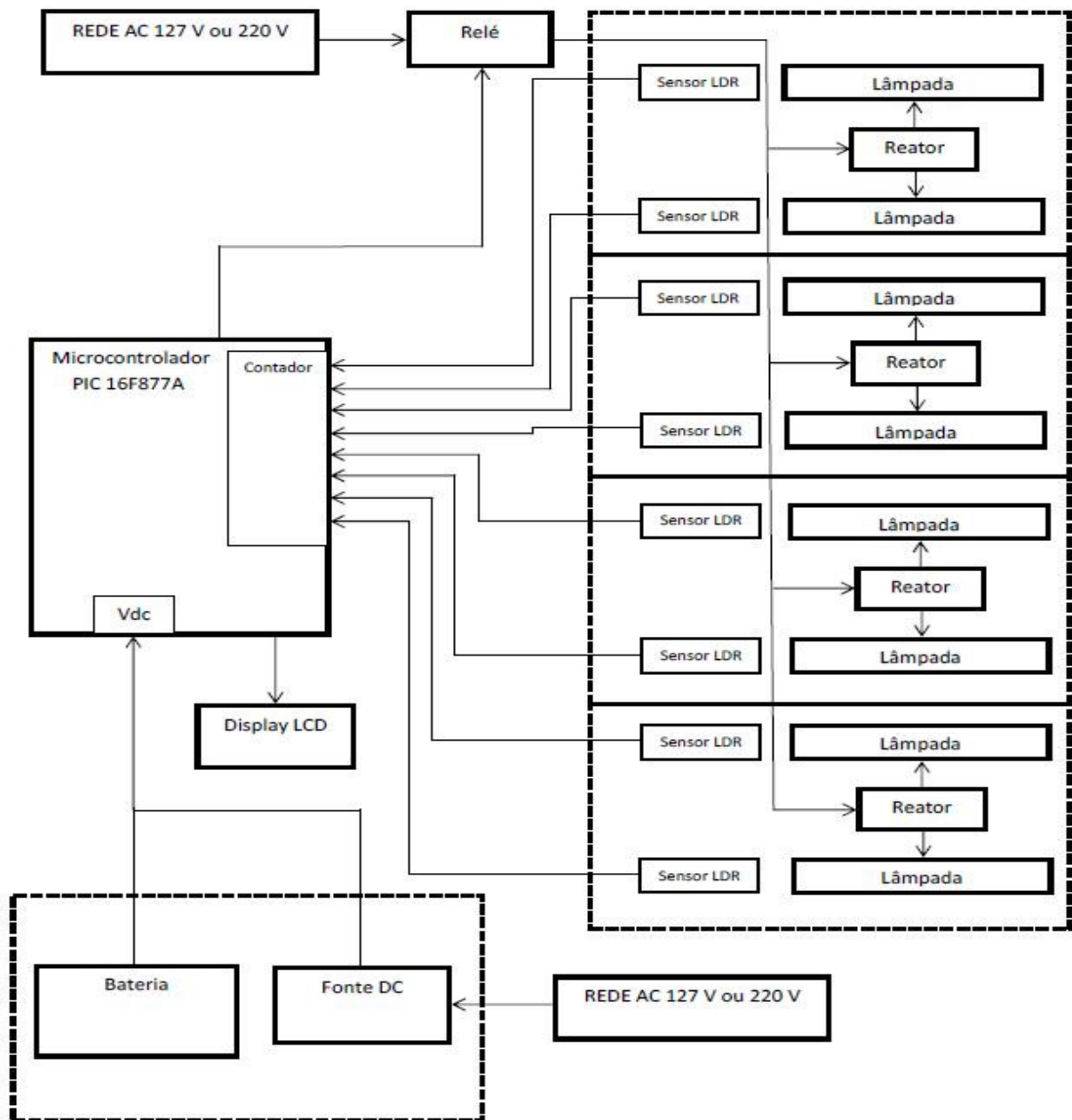


Figura 12 - Diagrama de blocos – Circuito Teste.
Fonte: Autoria própria

O processador PIC16F877A é responsável pelo controle de todo o processo. É este componente que comanda o acionamento do relê, de acordo com o tempo dos ciclos liga e desliga que foram definidos. Este relê, por sua vez, disponibiliza energia elétrica da rede para os reatores das lâmpadas fluorescentes, quando acionado pelo microcontrolador.

Cada um dos quatro reatores possui um tipo de circuito de pré-aquecimento, sendo:

- Reator 1: sem circuito de pré-aquecimento;
- Reator 2 e Reator 3: circuito de pré-aquecimento por PTC;

- Reator 4: circuito de pré-aquecimento auto-oscilante.

Cada um dos reatores estará presente em uma luminária, a qual comporta duas lâmpadas fluorescentes T5.

Há sensores LDR (light dependent resistor – resistor dependente da luz), os quais variam sua resistência de acordo com a intensidade luminosa presentes próximos à extremidade de cada lâmpada. Esses sensores tem o objetivo de verificar se as lâmpadas estão funcionando corretamente. Através de um divisor resistivo, os sinais provenientes dos LDRs serão enviados ao PIC16F877A, o qual administrará os dados recebidos através do *software* desenvolvido para a finalidade do projeto.

Além disso, as informações sobre o *status* do processo e a contagem dos ciclos de acionamento da lâmpada fluorescente podem ser visualizadas através do display LCD, o qual também é controlado pelo PIC.

A alimentação do processador será feita através de uma fonte DC. Contudo, para garantir que o controlador não cesse o seu funcionamento no caso de falta de energia elétrica da rede, uma bateria é ligada em paralelo com a fonte e alimentará o PIC caso seja necessário.

7 CIRCUITO DE TESTE

7.1 PROGRAMAÇÃO

A primeira etapa para a elaboração do circuito de teste foi utilizar um *software* de programação e compilação para fazer o algoritmo de comando do PIC16F877A. No projeto foi utilizado o compilador MikroC da Mikroelektronika. Através desta ferramenta foi realizada a programação em linguagem C juntamente com recursos pré-programados pelo compilador. O fluxograma da lógica de funcionamento do circuito de testes é mostrado na Figura 13:

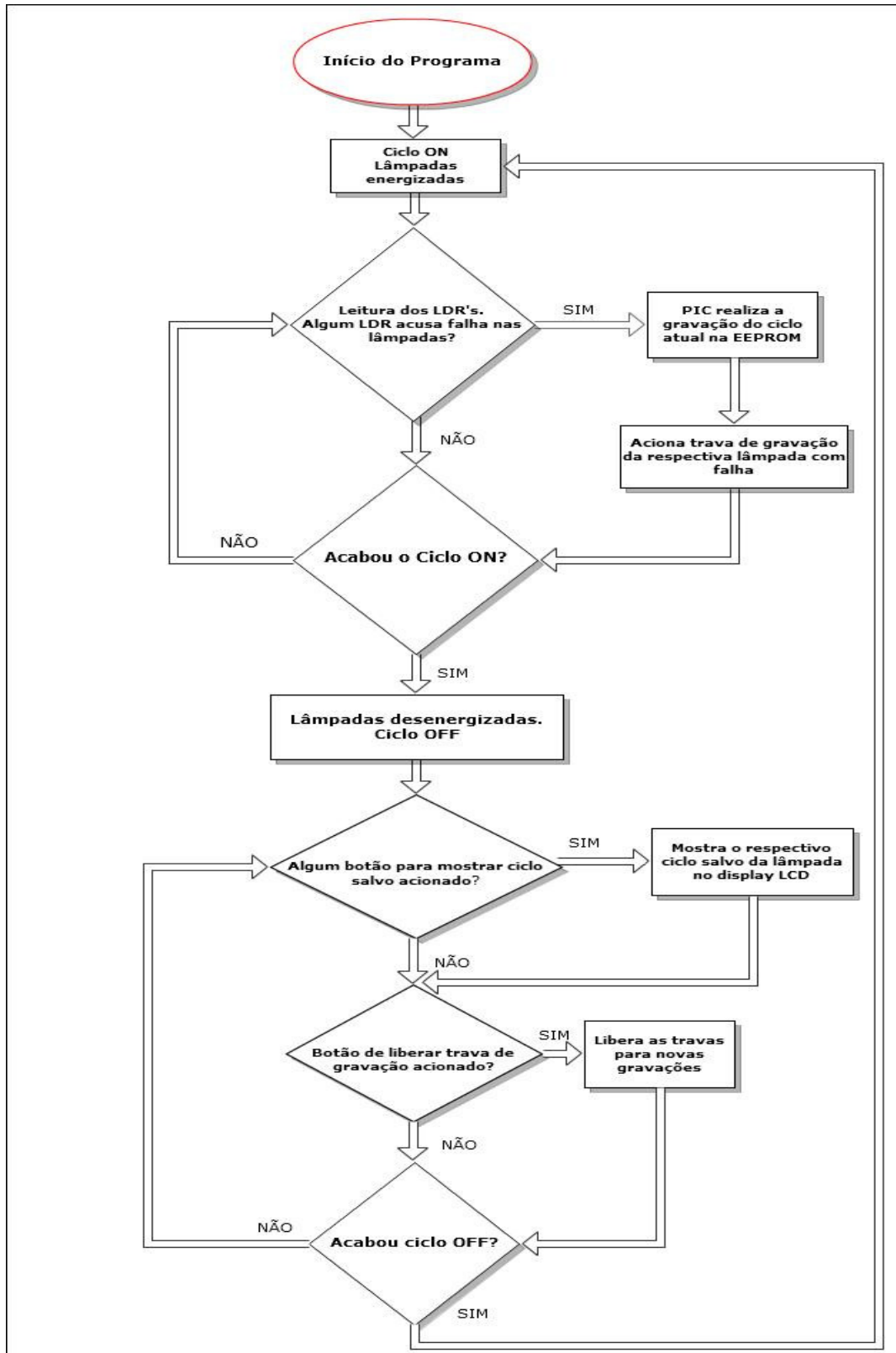


Figura 13 - Fluxograma da lógica do circuito de testes.
Fonte: Autoria própria

De acordo com o algoritmo completo, que se encontra no APÊNDICE A – ALGORITMO DO CIRCUITO DE TESTES, a lógica do programa pode ser basicamente dividida em seis partes principais que são enumeradas da seguinte maneira:

- Parte 1 (Linha 8 até 59): Esta parte mostra a declaração de todas as variáveis do programa, onde serão armazenados os valores, números, textos para o funcionamento do circuito.
- Parte 2 (Linha 71 até 132): Esta parte do programa tem a declaração do método responsável pela gravação das falhas em cada endereço da EEPROM pré-selecionado do PIC16F877A.
- Parte 3 (Linha 136 até 161): Esta parte do programa é responsável pela leitura dos estados dos LDR's para identificar uma possível falha na lâmpada e conseqüentemente ordenar a gravação do valor do contador.
- Parte 4 (Linha 192 até 333): Esta parte do programa faz a leitura dos botões preparados para acessar os ciclos salvos de cada conjunto lâmpada-LDR. Através do acionamento destes botões é possível ver em qual ciclo ocorreu à falha de cada lâmpada.
- Parte 5 (Linha 337 até 371): Esta parte faz o tempo de acionamento e desligamento da lâmpada, obedecendo ao ciclo de 40 segundos (ON) e 5 minutos (OFF) determinado durante a fundamentação teórica do projeto.
- Parte 6 (Linha 376 até 419): Esta é a parte principal do programa, ou seja, é o *loop* de funcionamento do circuito, onde é mostrado a contagem dos ciclos no display LCD, o acionamento das temporizações dos ciclos (ON/OFF), a varredura de falhas nas lâmpadas, gravação do ciclo principal a cada mudança de ciclo e por fim a leitura dos ciclos de falha salvos.

7.2 SIMULAÇÃO

Para acompanhar o desenvolvimento da programação e analisar o possível efeito desta no circuito de maneira prática foi necessário simular o circuito de teste. A simulação foi realizada na ferramenta ISIS, recurso do *software* Proteus. No simulador é possível carregar o programa no microcontrolador virtual e observar seu funcionamento no circuito. A Figura 16 mostra o circuito elaborado para simulação.

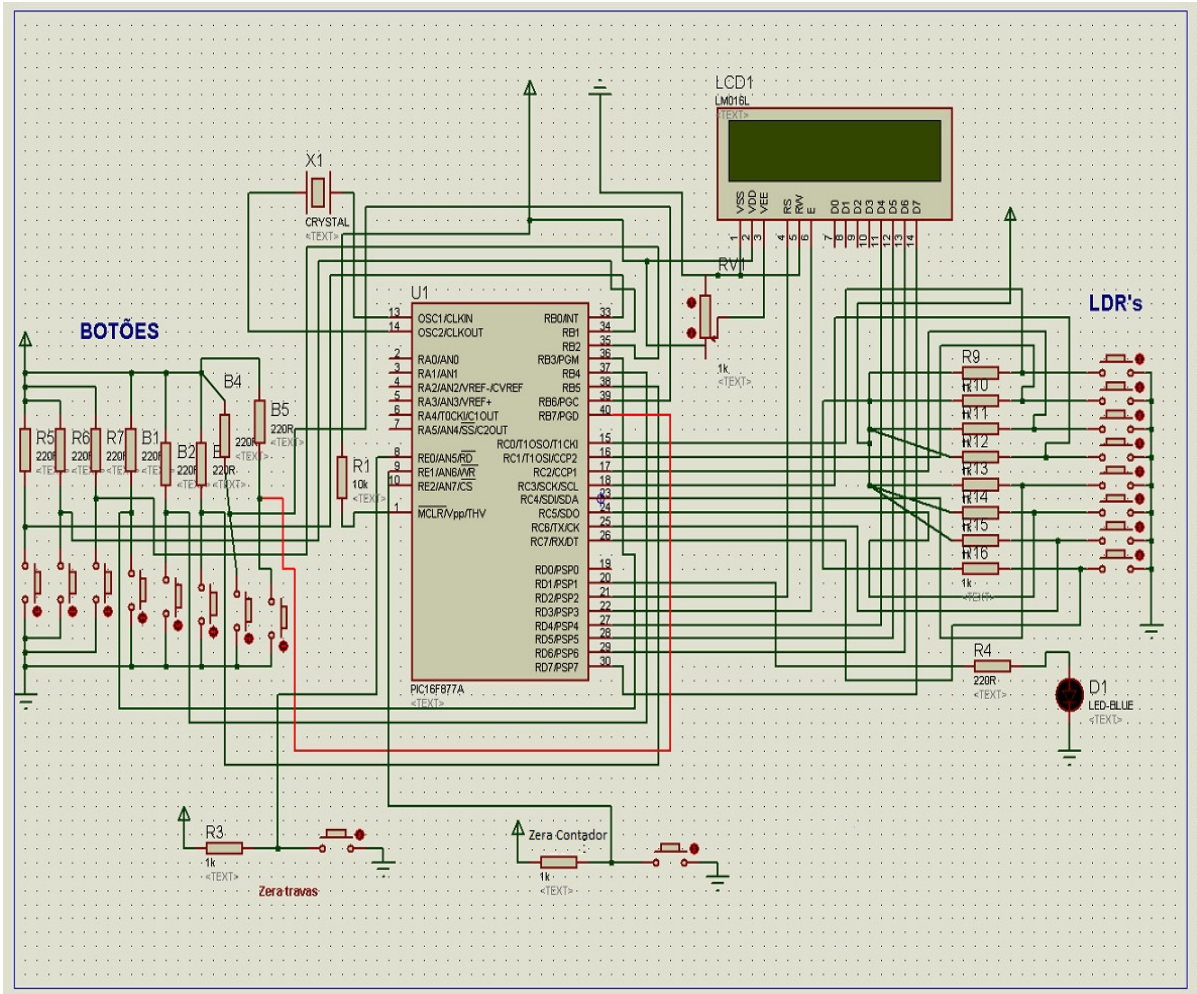


Figura 14 - Circuito de teste – Simulação
Fonte: Autoria própria

No circuito de teste simulado, os LDR's são representados por botões e o funcionamento do relé é simbolizado por um led. Ainda no circuito de simulação, há um PIC 16F877A virtual onde é carregado o código de programação feito no compilador, um display LCD virtual que mostra o ciclo, os botões de leitura dos ciclos de falhas salvos e também os botões responsáveis por zerar o contador e as travas de gravação.

Na Figura 15, é possível observar o funcionamento do circuito de simulação durante um ciclo normal de funcionamento.

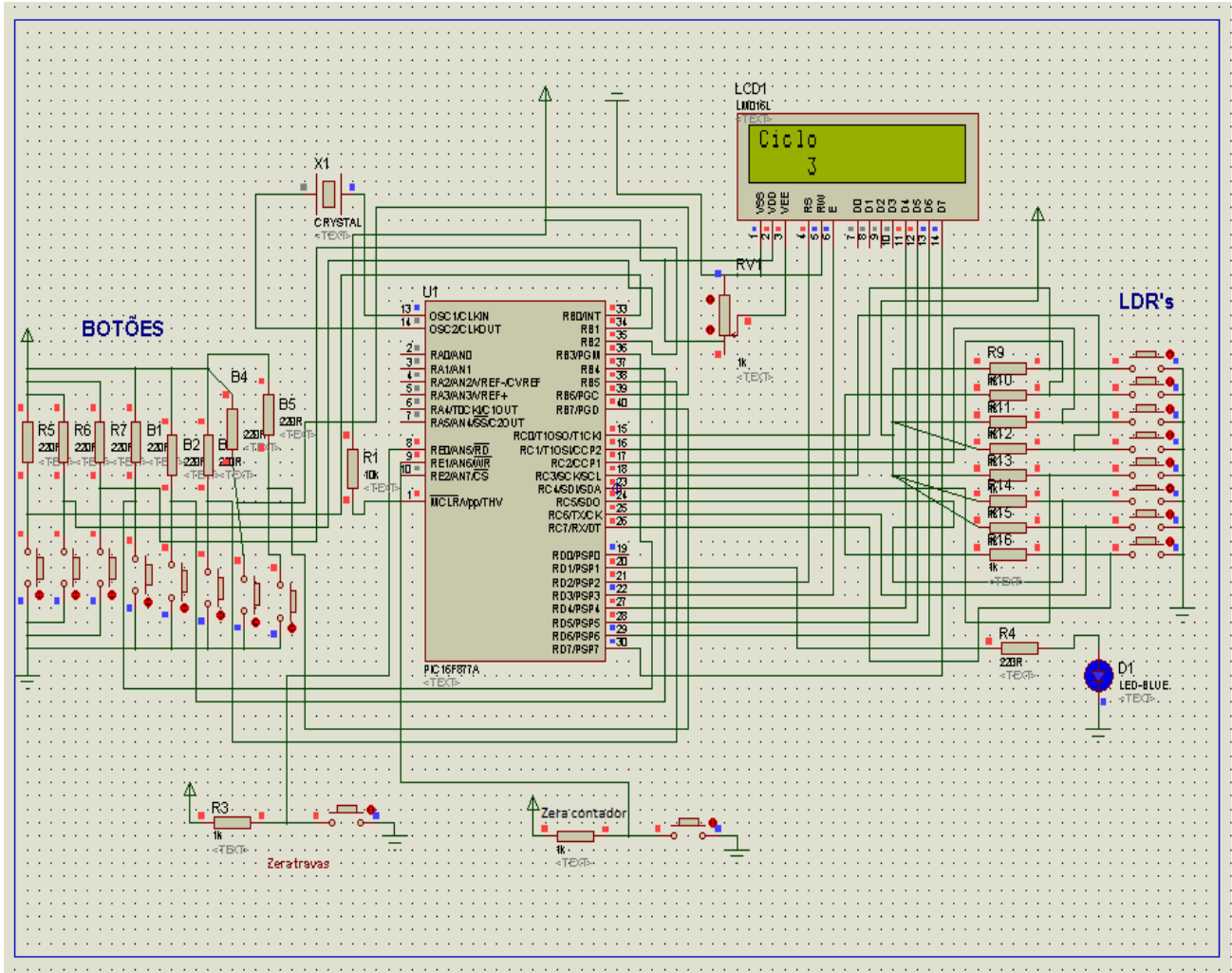


Figura 15 - Simulação em funcionamento.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 15, o circuito está no modo de operação ON, onde o relé encontra-se acionado. Portanto as lâmpadas fluorescentes estão energizadas. Neste momento, se um dos botões que simulam os LDR's for acionado, o microcontrolador identificará como uma possível falha na lâmpada e salvará o valor do ciclo na memória eeprom do PIC16F877A.

7.3 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE TESTES

7.3.1 *Lista de componentes*

A lista de componentes do circuito de testes pode ser consultada no APÊNDICE B – LISTA DE COMPONENTES DO CIRCUITO DE TESTES.

O circuito desenvolvido para a realização dos testes é apresentado na Figura 17. Pode-se observar a PCB com todos os componentes utilizados, além do display LCD posicionado na parte superior da mesma, o qual apresenta informações úteis a respeito do circuito, como a contagem de ciclos e dados sobre a gravação de falhas nas lâmpadas.

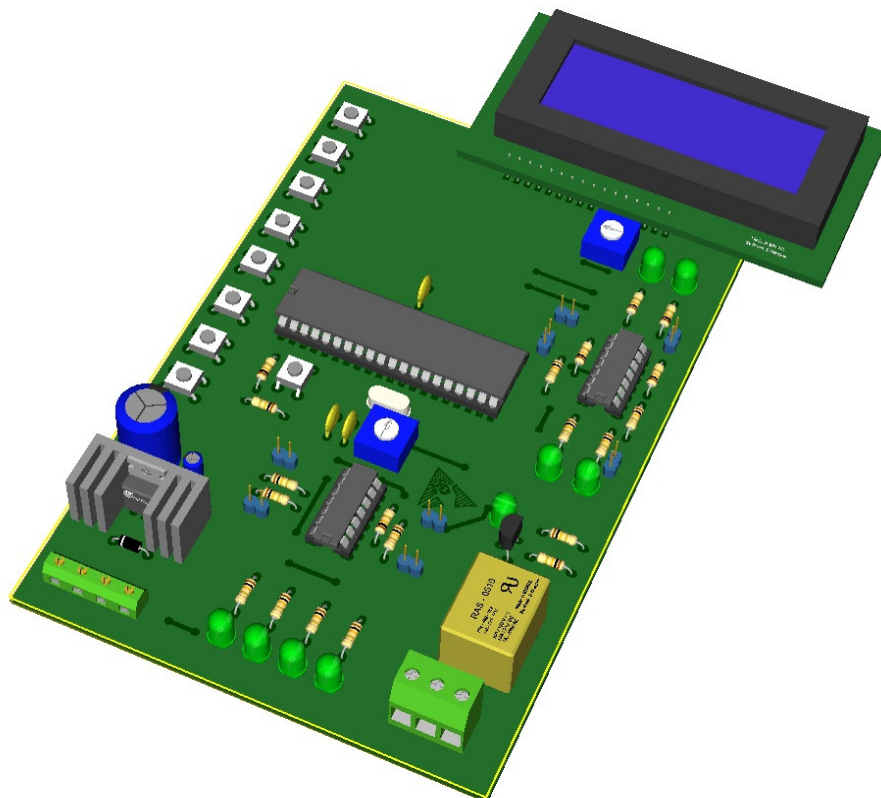


Figura 17 - Representação em 3D do circuito de testes
Fonte: Autoria própria

7.3.2 Alimentação do circuito

O circuito é alimentado através de uma fonte externa de alimentação de 12 V c.c. e corrente máxima de 3A. A tensão de 12 V disponibilizada pela fonte é utilizada para alimentar a bobina dos reles. Este funcionamento será explicado mais detalhadamente no item 1.6. Além disso, esta alimentação de 12 V passa pelo regulador LM7805, responsável por regular a tensão em 5V c.c. Como este componente aquece ligeiramente, um dissipador foi acoplado ao seu encapsulamento, para garantir que este permaneça em uma temperatura adequada ao seu funcionamento. Além disso, um capacitor de entrada (C1) de 0,33 μ F e um capacitor de saída (C2) de 0,1 μ F foram adicionados para atuar como filtro.

A tensão de 5 V, por sua vez, é utilizada para alimentar todas as outras partes do circuito necessárias, sendo estas: microcontrolador PIC16F877A, display LCD e lógica de sensoriamento por LDRs.

A Figura 18 mostra o posicionamento da entrada de alimentação e do regulador LM7805 na placa do circuito de testes.

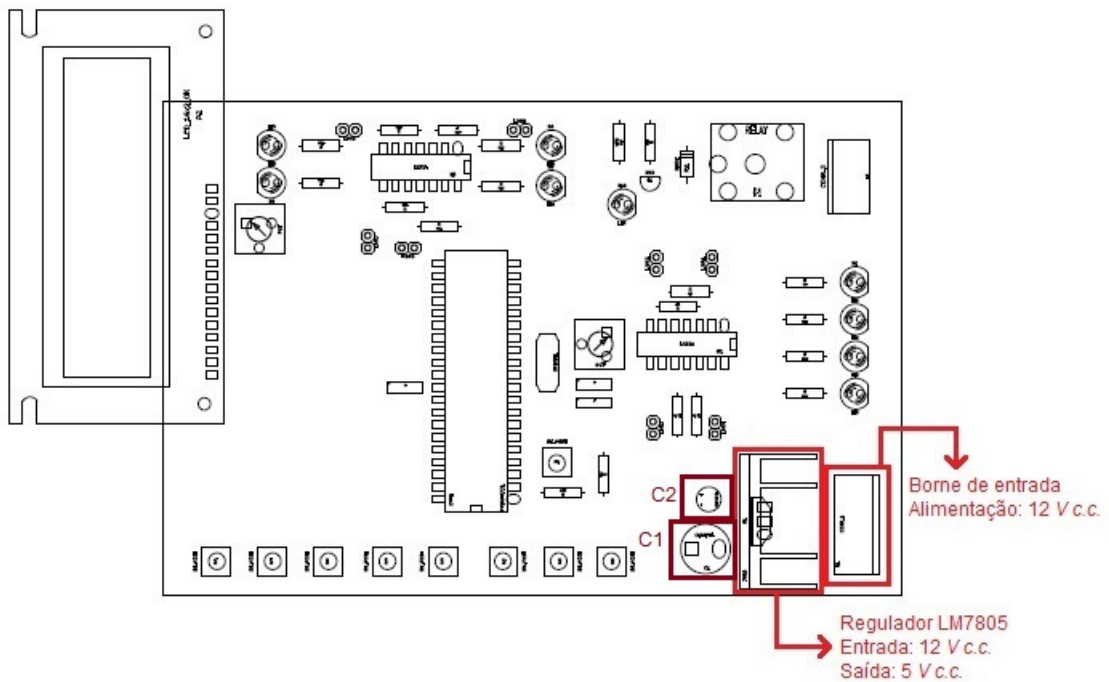


Figura 18 - Alimentação do circuito de testes
Fonte: Autoria própria

7.3.3 Lógica de monitoramento das lâmpadas através dos sensores LDRs

O sensor LDR é uma espécie peculiar de resistor, dotado de uma resistência variável, inversamente proporcional à luminosidade incidente em sua superfície. Quanto maior a incidência de luz sobre este componente, menor é a sua resistência elétrica.

Os sensores de luminosidade LDRs são responsáveis pelo monitoramento das lâmpadas fluorescentes. Há um LDR posicionado próximo a cada lâmpada fluorescente para verificar se esta se encontra acesa ou apagada.

Como cada LDR deve ser sensibilizado por uma única lâmpada fluorescente, esta teve que ser mantida em um compartimento bem isolado, para evitar que a luz externa ou até mesmo a luz das outras lâmpadas à sua volta interferisse na variação de resistência do sensor LDR.

Com isto, um circuito comparador foi elaborado para, através dos valores de resistência dos LDRs, enviar um sinal alto ou baixo para o microcontrolador, “informando” se as lâmpadas estão adequadamente acesas ou se apresentam algum problema em seu funcionamento.

O circuito para tal operação pode ser visualizado na representação abaixo.

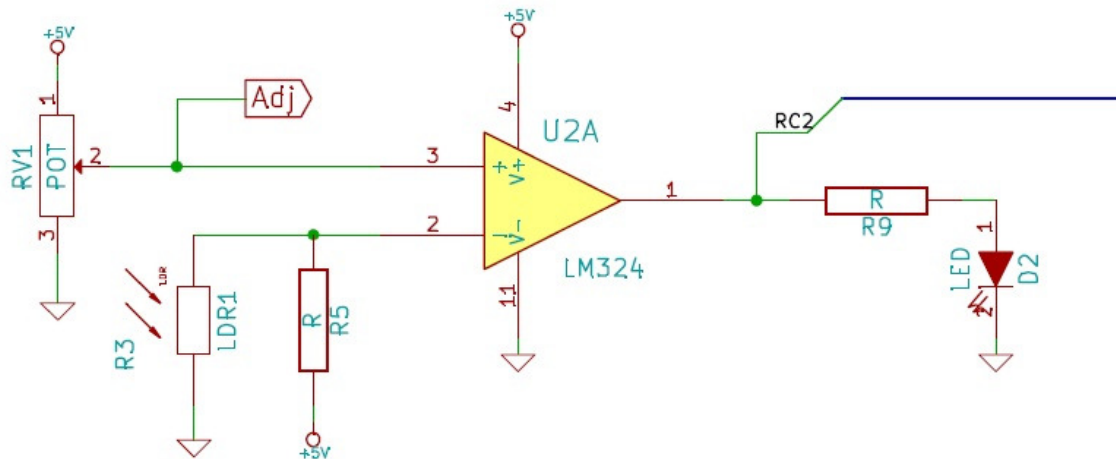


Figura 19 - Circuito comparador de tensão
Fonte: Autoria própria

O circuito acima representado monitora apenas uma das oito lâmpadas fluorescentes. As outras sete lâmpadas utilizam o mesmo circuito, cada qual com seu respectivo LDR, LED sinalizador e saída, a qual é ligada a diferentes entradas do microcontrolador. Já o

potenciômetro é comum a todos os circuitos e envia um sinal de tensão de referência para a entrada de cada amplificador operacional.

Este circuito funciona da seguinte maneira: o amplificador operacional recebe dois sinais de entrada. Na porta não-inversora, um sinal de tensão de referência é aplicado através de um potenciômetro. Já na porta inversora, um divisor resistivo é utilizado, formado por um resistor fixo de $10k\Omega$ e o LDR corresponde a uma determinada lâmpada, com o intuito de gerar um valor de tensão proporcional à variação de resistência do LDR.

Se a luminosidade aplicada ao LDR for baixa, sua resistência aumentará. Assim, a tensão de entrada na porta inversora do amplificador operacional também aumentará, tornando-se maior do que a tensão de referência na porta não-inversora. Isto fará com que um sinal baixo apareça na saída, mantendo o LED indicador apagado e emitindo “sinal 0” para o PIC.

Por outro lado, caso a luz incidente sobre o LDR possua um nível elevado, a resistência do sensor diminuirá. Deste modo, a tensão na porta não-inversora também diminuirá. No momento em que esta tensão ficar menor do que a tensão gerada pelo potenciômetro, a saída do ampop estará com sinal alto, fazendo com que o LED indicador acenda e enviando “sinal 1” para o microcontrolador.

O PIC será responsável por interpretar estes sinais e manuseá-los de forma adequada, gravando o ciclo em que determinada lâmpada venha a apresentar uma falha.

Desta forma, os LEDs nas saídas de cada comparador acendem e apagam concomitantemente com a lâmpada fluorescente correspondente, indicando seu funcionamento. Além disso, o potenciômetro ligado na saída não-inversora de todos os comparadores funciona como um regulador de sensibilidade: pode-se regular qual nível de luminosidade é necessário para indicar que a lâmpada está realmente acesa, funcionando adequadamente.

Os amplificadores operacionais são disponibilizados em dois CIs LM324. Cada um desses circuitos integrados possui 4 ampops. Assim, há dois LMs324 para monitorar as 8 lâmpadas fluorescentes existentes no circuito.

Na Figura 20, segue a identificação dos componentes mencionados acima. Os significados das siglas da imagem estão descritos abaixo:

- LI 1: LED indicador 1;
- LI 2: LED indicador 2;
- LI 3: LED indicador 3;
- LI 4: LED indicador 4;
- LI 5: LED indicador 5;
- LI 6: LED indicador 6;
- LI 7: LED indicador 7;
- LI 8: LED indicador 8;
- LDR 1: conector para ligação do sensor LDR 1;
- LDR 2: conector para ligação do sensor LDR 2;
- LDR 3: conector para ligação do sensor LDR 3;
- LDR 4: conector para ligação do sensor LDR 4;
- LDR 5: conector para ligação do sensor LDR 5;
- LDR 6: conector para ligação do sensor LDR 6;
- LDR 7: conector para ligação do sensor LDR 7;
- LDR 8: conector para ligação do sensor LDR 8;
- LM324: CI com 4 amplificadores operacionais;
- TRIMPOT: potenciômetro para regular a sensibilidade dos comparadores.

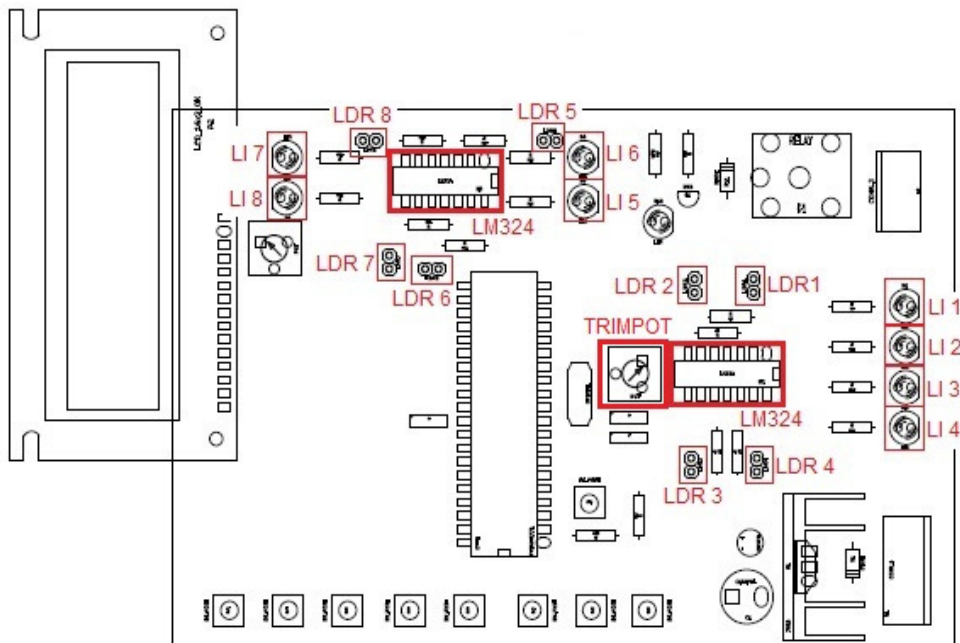


Figura 20 - Componentes da lógica dos LDRs
 Fonte: Autoria própria

7.3.4 Dispositivos de Reset

O funcionamento do circuito de testes requer dois tipos de *reset*. O primeiro deles é acionado através de um microbotão que, ao ser acionado, emite um sinal baixo em uma porta de entrada do PIC (Porta RE0).

Quando uma falha ocorre em alguma lâmpada, uma “trava” é habilitada. Esta trava nada mais é que um recurso de *software*, responsável por bloquear (travar) a gravação de dados em um endereço da memória EEPROM.

O resultado que se pretende obter durante os testes é o ciclo em que a primeira falha ocorreu em determinada lâmpada. Desta forma, uma vez ocorrida a falha, e a informação sobre o ciclo gravada na EEPROM, a ocorrência de outras falhas na mesma lâmpada não deve mais ser gravada. Assim, a trava é acionada para impedir que falhas posteriores sejam regravadas no mesmo endereço, apagando a informação anterior.

O primeiro *reset* libera a gravação de dados na memória EEPROM do PIC, desativando a trava. Esta funcionalidade é útil no momento em que alguma lâmpada apresentar um defeito. Pode-se então, substituir esta lâmpada por uma nova e acionar o *reset* da gravação de erros, para que esta nova lâmpada também seja testada, ou seja, para que a ocorrência de uma falha possa ser novamente gravada na memória EEPROM. Todavia, deve-se observar em qual ciclo a lâmpada foi substituída, para que se calcule quantos ciclos de operação ocorreram até que a nova lâmpada apresentou um defeito:

$$VU = C_f - C_i$$

Onde tem-se que:

- VU: vida útil da lâmpada que foi substituída;
- C_f : ciclo final, em que a lâmpada substituída apresentou defeito;
- C_i : ciclo inicial, em que a lâmpada foi substituída e o *reset* de gravações foi acionado.

O segundo *reset* é acionado através de um *jumper*. O funcionamento elétrico é igual ao primeiro *reset*, contudo é utilizada a porta RE1 do PIC. Quando os dois pinos do *jumper* são interligados, o sinal baixo é enviado para esta entrada do microcontrolador e a contagem de ciclos é reiniciada, começando novamente do ciclo zero. A Figura 21 abaixo mostra o

posicionamento dos dispositivos de *reset* na placa do circuito de testes. Na imagem, o número “1” corresponde ao microbotão de *reset* da gravação de falhas na EEPROM do PIC, enquanto o número “2” corresponde aos pinos que devem ser interligados (*jumper*) para efetuar o *reset* da contagem dos ciclos de operação.

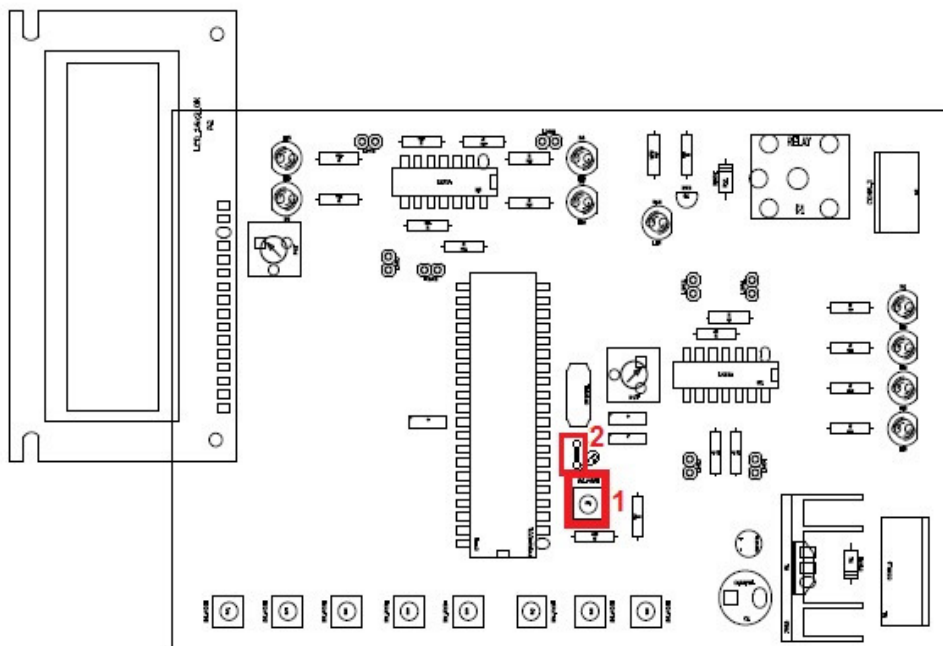


Figura 21 - Dispositivos de *reset* na placa do circuito de testes
Fonte: Autoria própria

7.3.5 **Display LCD**

O display LCD é utilizado para a visualização das informações importantes a respeito dos ciclos de funcionamento e da gravação de falha das lâmpadas. Está posicionado na extremidade da placa, como mostra a Figura 22. Uma barra de pinos foi utilizada para fixar o display e disponibilizar as conexões dos pinos do mesmo.

O display é alimentado com a tensão de 5V oriunda do regulador de tensão. Um TRIMPOT é ligado ao pino 3 (VEE) para regular o contraste da tela, permitindo uma otimização na visualização das informações.

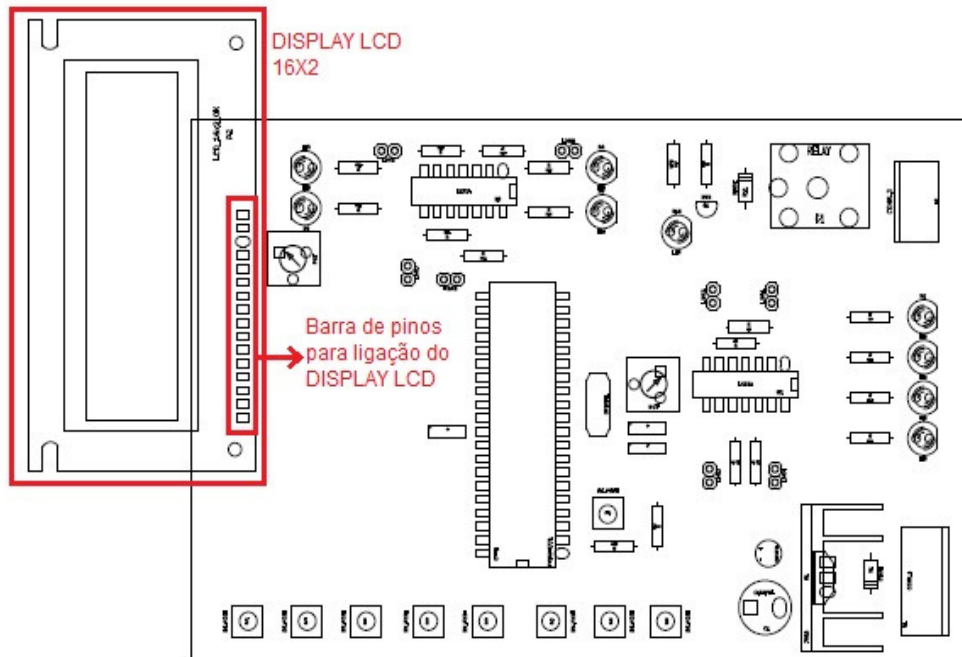


Figura 22 - Display LCD e barra de pinos
Fonte: Autoria própria

Os outros pinos do *display* são ligados aos pinos da porta D do PIC16F877A (RD2 até RD7), o qual controla através do *software* toda a informação transmitida para o *display*. Na tabela abaixo, são apresentadas todas as ligações do display LCD.

Display LCD		Ligação	
Pino	Descrição	Ponto de ligação	Descrição
1	VSS	GND	Terra do circuito
2	VDD	+5V	Vindo do LM7805
3	VEE	TRIMPOT	Contraste
4	RS (register select)	Pino 21 do PIC	Porta RD2
5	RW (read/write)	GND	Não utilizado
6	E (enable)	Pino 22 do PIC	Porta RD3
7	D0 (data bus)	Não utilizado	Não utilizado
8	D1 (data bus)	Não utilizado	Não utilizado
9	D2 (data bus)	Não utilizado	Não utilizado
10	D3 (data bus)	Não utilizado	Não utilizado
11	D4 (data bus)	Pino 27 do PIC	Porta RD4
12	D5 (data bus)	Pino 28 do PIC	Porta RD5

13	D6 (data bus)	Pino 29 do PIC	Porta RD6
14	D7 (data bus)	Pino 30 do PIC	Porta RD7

Tabela 5 - Conexões do Display LCD
Fonte: Autoria própria

Ao ligar o circuito, a contagem de ciclos é iniciada. O display LCD exibe constantemente a informação de qual ciclo de operação está sendo processado no momento, como mostra a Figura 23, abaixo:



Figura 23 - Display LCD mostrando ciclo de operação
Fonte: Autoria própria

Há no circuito 8 microbotões, posicionados um ao lado do outro. Cada um desses dispositivos está associado a uma lâmpada fluorescente e é responsável por disponibilizar a informação sobre o ciclo em que ocorreu falha na lâmpada, se for o caso.

Quando uma lâmpada falhar, o ciclo em que esta falha ocorreu ficará gravado na memória EEPROM do PIC. Esta informação sobre o ciclo pode ser visualizada no display LCD. Para isso, deve-se pressionar o botão correspondente à lâmpada em que a falha ocorreu, e mantê-lo pressionado durante certo tempo (no máximo 6 segundos, intervalo em que o *software* faz uma varredura, verificando se algum botão está acionado). Neste momento, com o botão pressionado, o PIC irá buscar a informação na memória EEPROM e disponibilizar a mensagem no display LCD, informando em qual ciclo ocorreu a primeira falha na lâmpada correspondente. Na Figura 24, pode-se observar o display LCD informando a ocorrência de uma falha, neste caso ocorrida no ciclo 106. Após o decurso de 3s, o *display* volta a seu estado inicial, mostrando o “ciclo” de operação.



Figura 24 - Display LCD mostrando mensagem de falha em uma das lâmpadas
Fonte: Autoria própria

Caso nenhuma falha tenha ocorrido nesta lâmpada o display mostrará a mensagem “ciclo salvo 0”. Isto significa que não ocorreu nenhuma falha na lâmpada, portanto não há registro de gravação de ciclo na memória EEPROM.

7.3.6 Relé para alimentação dos reatores

Os relés do circuito de testes são utilizados para ligar e desligar os reatores e, conseqüentemente, as lâmpadas fluorescentes a serem testadas. A bobina de cada rele é alimentada com a tensão de entrada de 12 V proveniente da fonte de alimentação, ou seja, a tensão de entrada do circuito antes de passar pelo regulador LM7805. O circuito abaixo mostra o esquema de ligação do rele (o outro rele está ligado em paralelo com o rele abaixo representado).

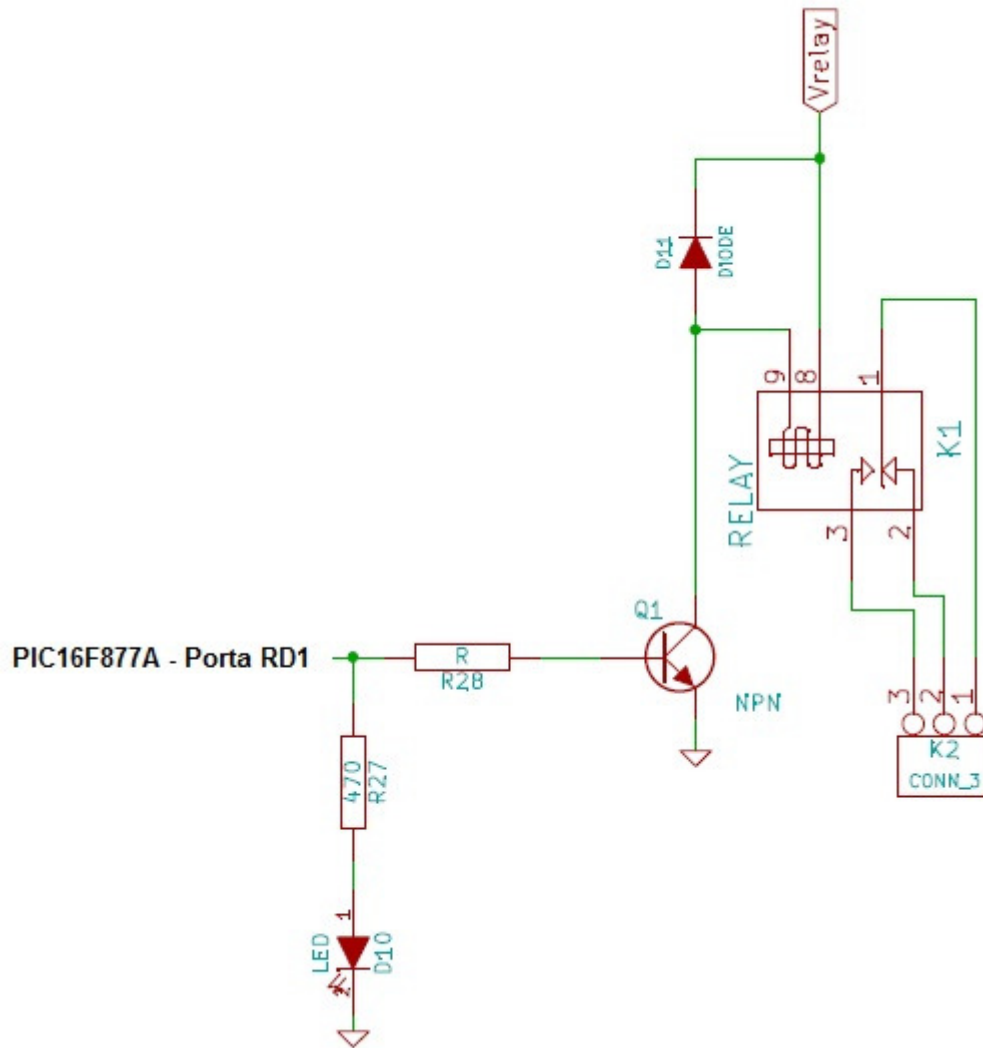


Figura 25 - Circuito de acionamento do relé
Fonte: Autoria própria

O acionamento do relé é controlado pelo microcontrolador, através da porta RD1 (pino 20). Na posição de repouso, o pino 8 do relé está conectado à tensão de 12V. Contudo, o relé não atua, pois o pino 9 (terra) está desconectado. Quando as lâmpadas devem acender, o PIC envia um sinal de tensão para o *gate* do transistor, que fecha, permitindo que o GND seja ligado ao pino 9 do relé. Assim, a bobina é alimentada e o relé atua, permutando seus contatos.

Em paralelo com a bobina do relé é colocado um diodo de roda-livre. Este é necessário, pois, no momento do desligamento do relé, uma força eletromotriz é responsável por induzir uma tensão de polaridade oposta à alimentação. Esta tensão é relativamente elevada e pode danificar o transistor. Desta forma, o diodo de roda-livre gera um curto circuito na bobina, anulando a geração desta tensão.

7.3.7 *Ligação dos reatores*

Os reatores utilizados para os testes das lâmpadas fluorescentes estão descritos na Tabela 6.

Reator	Fabricante	Tensão de alimentação	Pré-Aquecimento
1	Fabricante B	220V	Sem pré-aquecimento
2	Fabricante B	220V	PTC
3	Fabricante A	220V	PTC
4	Fabricante B	127V	Circuito auxiliar auto-oscilante

Tabela 6 - Reatores utilizados
Fonte: Autoria própria

Para os reatores 1, 2 e 3, a ligação foi feita da seguinte maneira: uma das fases foi ligada direta em um dos terminais de cada reator, através de um conjunto de bornes. A outra fase foi ligada à chave normalmente aberta (NA) de um dos reles (rele 1), o qual é acionado pelo comando do microcontrolador. O retorno da chave do rele foi, então, ligada no outro terminal de cada um dos reatores. Desta forma, os dispositivos são acionados e ligam as lâmpadas, apenas quando o rele é acionado pelo PIC.

A ligação do reator 4 foi feita de forma semelhante. O neutro foi ligado direto em um de seus terminais. Já a fase foi ligada à chave NA do outro rele (rele 2). O retorno sai deste rele e é ligado ao outro terminal do reator, fazendo com que este seja ativado apenas com a energização da bobina do rele correspondente.

A figura abaixo ilustra de maneira simplificada as ligações descritas acima, onde tem-se que:

- F1: fase 1
- F2: fase 2
- R1: retorno da fase 1
- R2: retorno da fase 2
- N: neutro

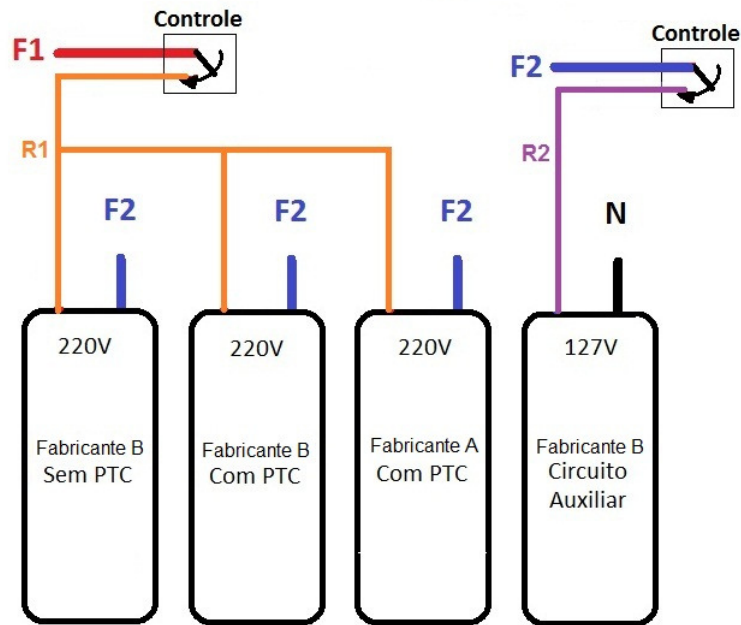


Figura 26 - diagrama simplificado de alimentação dos reatores
Fonte: Autoria própria

7.3.8 Microcontrolador PIC16F877A

O microcontrolador PIC16F877A é responsável pelo controle e monitoramento da grande maioria das operações realizadas no circuito de testes das lâmpadas fluorescentes.

Abaixo segue tabela com todas as ligações dos pinos do microcontrolador.

PIC16F877A		Ligação	
Pino	Descrição	Ponto de ligação	Descrição
1	MCLR	Resistor de MCLR	-
2	RA0/AN0	Não utilizado	-
3	RA1/AN1	Não utilizado	-
4	RA2/AN2	Não utilizado	-
5	RA3/AN3	Não utilizado	-
6	RA4/T0CKI/	Não utilizado	-
7	RA5/AN4/SS/C2OUT	Não utilizado	-
8	RE0/RD/AN5	Microbotão de reset	Reset das gravações
9	RE1/WR/AN6	Jumper de reset	Reset dos ciclos
10	RE2/CS/AN7	Não utilizado	-
11	VDD	+5V	Alimentação
12	VSS	GND	Alimentação - terra

13	OSC1/CLKI	Cristal oscilador	clock
14	OSC2/CLKO	Cristal oscilador	clock
15	RC0/T1OSO/T1CKI	LM324	Detecção do estado da lâmpada 1
16	RC1/T1OSI/CCP2	LM324	Detecção do estado da lâmpada 2
17	RC2/CCP1	LM324	Detecção do estado da lâmpada 3
18	RC3/SCK/SCL	LM324	Detecção do estado da lâmpada 4
19	RD0/PSP0	Não utilizado	-
20	RD1/PSP1	Transistor BC548	Comando dos reles
21	RD2/PSP2	Display (pino 4 – RS)	Comando do display LCD
22	RD3/PSP3	Display (pino 6 – E)	Comando do display LCD
23	RC4/SDI/SDA	LM324	Detecção do estado da lâmpada 5
24	RC5/SDO	LM324	Detecção do estado da lâmpada 6
25	RC6/TX/CK	LM324	Detecção do estado da lâmpada 7
26	RC7/RX/DT	LM324	Detecção do estado da lâmpada 8
27	RD4/PSP4	Display (pino 11 – DT4)	Transmissão de dados para display LCD
28	RD5/PSP5	Display (pino 12 – DT5)	Transmissão de dados para display LCD
29	RD6/PSP6	Display (pino 13 – DT6)	Transmissão de dados para display LCD
30	RD7/PSP7	Display (pino 14 – DT7)	Transmissão de dados para display LCD
31	VSS	GND	Alimentação - terra
32	VDD	+5V	Alimentação
33	RB0/INT	Microbotão lâmpada 1	Comandar visualização do display
34	RB1	Microbotão lâmpada 2	Comandar visualização do display
35	RB2	Microbotão lâmpada 3	Comandar visualização do display
36	RB3/PGM	Microbotão lâmpada 4	Comandar visualização do display
37	RB4	Microbotão lâmpada 5	Comandar visualização do display
38	RB5	Microbotão lâmpada 6	Comandar visualização do display
39	RB6/PGC	Microbotão lâmpada 7	Comandar visualização do display
40	RB7/PGD	Microbotão lâmpada 8	Comandar visualização do display

Tabela 7 - Pinos de ligação do PIC16F877A

Fonte: Autoria própria

O microcontrolador é responsável por contar o tempo de cada ciclo e enviar o sinal para acionar os reles, no momento devido, conforme o tempo de ciclo anteriormente definido.

O PIC recebe o sinal vindo dos amplificadores operacionais e, dessa forma, identifica se cada lâmpada está devidamente acesa ou apagada. Caso a lâmpada esteja apagada no momento em que deveria estar funcionando, o PIC entende isto como falha, e grava do ciclo correspondente na memória EEPROM.

Além disso, o PIC envia as informações para o display LCD, conforme a contagem de ciclos. Ao receber o sinal de um dos 8 microbotões ligados à porta RB (RB0 até RB7), o PIC

enviará outras informações ao display, de modo que este mostre o ciclo em que uma gravação de falha ocorreu na lâmpada correspondente.

7.4 TESTES DE FUNCIONALIDADE

Após a construção e implementação do circuito de testes, sua funcionalidade necessitava ser testada e comprovada. Era necessário efetuar algumas simulações, com intuito de comprovar o correto funcionamento de todas as configurações possíveis.

Logo, os testes de funcionalidade foram organizados de tal forma a comprovarem a correta operação do circuito de testes, com o intuito de avaliar a performance do circuito, assim como falhas que possivelmente poderiam ocorrer durante os ensaios. Os testes de funcionalidade estão detalhados nos capítulos que seguem.

7.4.1 *Contagem dos ciclos*

A contagem dos ciclos deveria ocorrer de forma periódica. Um ciclo representava a operação de uma lâmpada por exatamente 40 segundos ligada e 5 minutos desligada. Logo, energizou-se o circuito de testes e verificou-se que o relé que ligava os reatores “atracava” durante 40 segundos e “abria” durante 5 minutos, conforme previsto. A cada ciclo completado a contagem deveria ser incrementada e mostrada pelo display de LCD. Enquanto os ciclos eram completados, pode-se observar que o número de ciclos mostrado pelo display estava correto. A figura abaixo mostra um exemplo do número de ciclos mostrado pelo display:



Figura 27 - Exemplo de contagem de ciclo (ciclo 160)

Fonte: Autoria própria

Um botão de *reset* havia sido instalado na porta 9 do PIC16F877A para que os ciclos, após os testes, pudessem ser “zerados”, possibilitando assim o reinício da contagem de ciclos. Nos testes de funcionalidade o botão foi acionado 3 vezes e pode-se observar que a contagem dos ciclos voltava a zero e reiniciava automaticamente em cada uma das simulações.

7.4.2 *Simulação de Falha nas Lâmpadas*

Além de identificadas, as falhas deveriam ser gravadas individualmente na memória do PIC, registrando em que ciclo cada lâmpada deixou de operar normalmente.

Para verificar se o circuito estava identificando as falhas e gravando-as na memória do PIC adequadamente, ligou-se o circuito de testes e deixou-se de energizar o reator do Fabricante B com circuito auxiliar auto-oscilante. Imediatamente após a conclusão do ciclo, pressionou-se o botão destinado à verificação de gravação de ciclo de uma das lâmpadas conectadas ao reator desligado. O “Ciclo Salvo” correspondeu precisamente ao ciclo em que as duas lâmpadas que foram utilizadas na simulação de falha estavam desligadas. O mesmo teste foi efetuado com apenas uma das oito lâmpadas e o “ciclo salvo” registrou, também corretamente, o ciclo em que a falha foi simulada naquela lâmpada.



Figura 28 - Exemplo de “ciclo salvo” (ciclo 16)

Fonte: Autoria própria

Com este teste pode-se verificar simultaneamente a identificação da luz das lâmpadas pelos LDRs. Ao tirar-se uma das lâmpadas de operação, foi possível não apenas verificar a gravação da falha, mas também a identificação pelo LDR da lâmpada defeituosa, através do desligamento do LED correspondente.

7.4.3 Liberação da Trava para Gravação de Falhas

Uma vez que uma falha fosse identificada pelo circuito, esta deveria ser gravada no PIC e falhas posteriores seriam desconsideradas, ou seja, após a primeira gravação de falha o “Ciclo Salvo” não gravaria outras falhas. Para efeitos de testes, porém, implementou-se um botão de *Lock Reset*, o qual, quando pressionado, “destravaria” a gravação de falhas, permitindo que uma nova falha fosse gravada, substituindo a gravação anterior.

Simulou-se, então, uma falha em uma das lâmpadas e conferiu-se a gravação correta no “Ciclo Salvo”. Retornou-se à contagem de ciclos normalmente e, enquanto as lâmpadas estavam desligadas, pressionou-se o botão que destravava a gravação das falhas. Uma nova falha foi gerada na mesma lâmpada e observou-se que o “Ciclo Salvo” gravou a nova falha, substituindo a que estava anteriormente gravada. Uma terceira falha foi gravada, mas como o botão de destrava não havia sido pressionado, o “Ciclo Salvo” manteve gravada a falha anterior.

7.4.4 Simulação de Falha na Alimentação do Sistema

O circuito de testes foi desenvolvido para que mantivesse o ciclo de contagem e os ciclos salvos gravados mesmo após o desligamento do sistema.

Logo, após alguns ciclos de operação, a fonte de alimentação que supria o circuito de testes foi retirada, até que os dados de ciclo desaparecessem do display. Aguardou-se alguns minutos e voltou-se a alimentar o circuito de testes, o qual permaneceu no ciclo de contagem que estava antes do desligamento e manteve, também, inalterados os “ciclos salvos” de cada entrada.

Uma falta na alimentação da rede de curta duração foi simulada. Verificou-se que até aproximadamente 5 segundos de falta não são suficientes para desligar o circuito. Logo, diante de variações de curta duração da rede, o circuito de testes continuará operando normalmente sem interrupções.

8 RESULTADOS

8.1 SISTEMA DE TESTES

O sistema de testes foi desenvolvido com êxito. Para a montagem do circuito de testes foram utilizados componentes *THT* (listados no Apêndice B). A placa de circuito foi confeccionada de forma artesanal, através da impressão do layout do circuito desejado em impressora a laser e posterior transferência para placa de cobre, a qual foi corroída em solução de *percloro de ferro*. A Figura 29 apresenta o circuito de testes em sua versão final. A única adaptação feita na placa foi a inserção de um relé adicional, para que a comutação dos reatores de 220V pudesse ficar independente da comutação dos reatores de 127V.

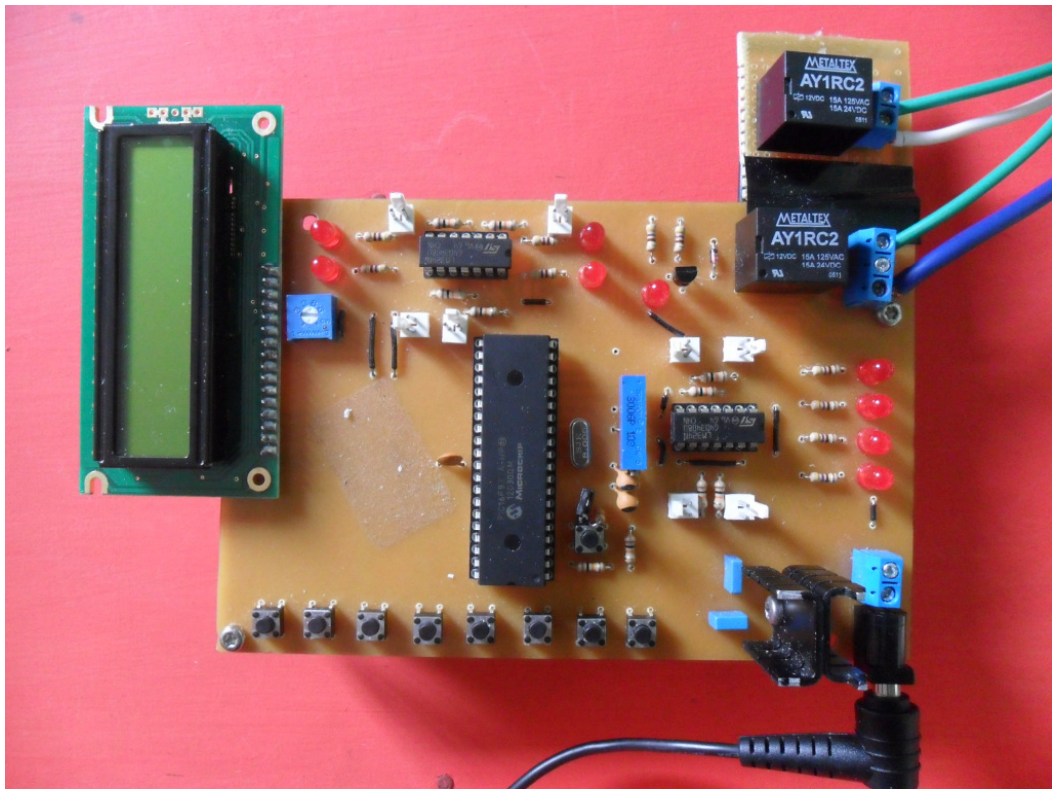


Figura 29 - Circuito de Testes
Fonte: Autoria própria

A imagem a seguir mostra o compartimento montado para acomodar as lâmpadas. Divisórias ainda foram adicionadas entre as lâmpadas de modo a evitar que a luminosidade de uma lâmpada fosse detectada pelo sensor LDR posicionado para efetuar o sensoriamento de outra lâmpada próxima.

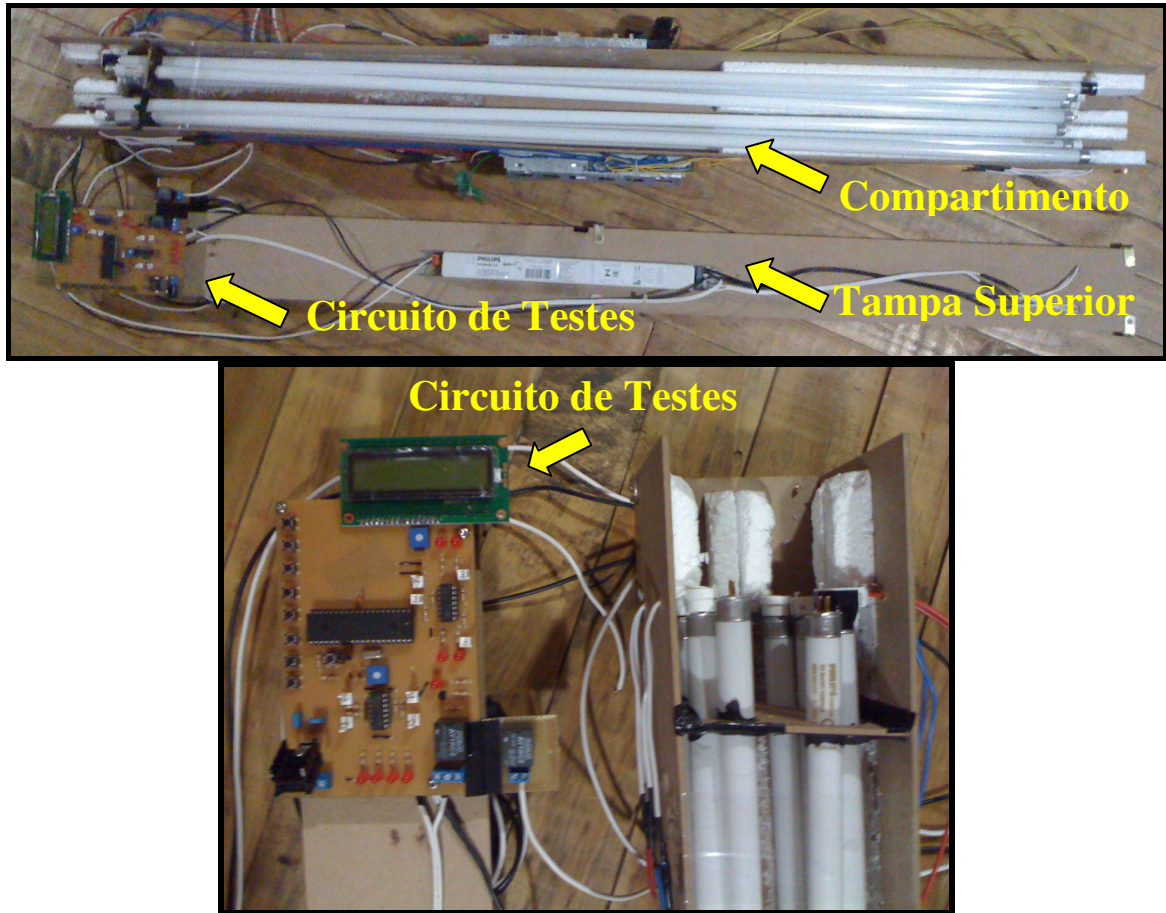


Figura 30 - Compartimento de lâmpadas
Fonte: Autoria própria

Como se pode observar na Figura 30, a tampa superior cobre o último lado do compartimento, fechando completamente o recinto das lâmpadas e mantendo-as totalmente isoladas do ambiente externo, no que diz respeito às interferências luminosas.

Ainda na tampa superior, a placa do circuito de testes foi fixada, de modo a facilitar as conexões elétricas dos sensores LDRs na tampa lateral da caixa e também possibilitar a leitura dos dados no display LCD.

As lâmpadas foram adicionadas conforme o previsto: duas lâmpadas conectadas a cada um dos seguintes reatores:

- Reator 1 (Fabricante B): sem pré-aquecimento;
- Reator 2 (Fabricante B): com pré-aquecimento através de PTC;
- Reator 3 (Fabricante A): com pré-aquecimento através de PTC;
- Reator 4 (Fabricante B): com pré-aquecimento através do circuito auxiliar auto-oscilante.

Todas as lâmpadas utilizadas nos testes eram novas e do mesmo fabricante, de modo a minimizar resultados errôneos devido a diferenças de fabricação e qualidade.

Os sensores LDR foram posicionados bem próximos às lâmpadas para captar de maneira eficaz a luminosidade da mesma. Estes sensores tiveram de ser colocados próximos ao centro do bulbo de cada lâmpada, pois, após a ocorrência de diversos ciclos de operação, é notável o escurecimento prematuro das extremidades das lâmpadas fluorescentes em teste. Este escurecimento visível na extremidade faz com que o brilho da lâmpada seja consideravelmente reduzido neste local, de modo que o sensor LDR pode vir a acusar falha na lâmpada, mesmo que esta ainda esteja em operação. O posicionamento do sensor LDR no centro do bulbo evita que este resultado incorreto aconteça, já que o centro da lâmpada não tende a perder o brilho da mesma forma que a extremidade.

O sistema foi colocado em operação e os testes descritos no item 7.4 foram realizados, com o intuito de garantir a eficácia e o bom funcionamento do sistema de testes.

Uma das características importantes do sistema de testes é o fato de o circuito poder ser desligado a qualquer momento, sem prejudicar a continuidade dos ensaios. Quando o sistema é desenergizado o circuito para de funcionar, contudo os dados sobre a contagem de ciclos e a gravação de falhas continuam armazenados na memória EEPROM do PIC. Ao ligar o sistema novamente, os testes continuam automaticamente do ponto onde haviam sido interrompidos.

Esta funcionalidade é importante, visto que pode ser necessário realizar algum tipo de manutenção nos reatores, substituição de lâmpadas defeituosas por lâmpadas novas, ou outro tipo de modificação que venha a ser conveniente. Desta forma, o circuito pode ser desligado quando for necessário, retornando ao funcionamento normal ao ser religado.

O circuito de testes desenvolvido apresenta, também, grande versatilidade quanto a sua adaptação a outros tipos de lâmpadas, que por ventura possam ser testadas. Um exemplo de lâmpada a ser futuramente testado é a lâmpada compacta, que, em alguns modelos, apresenta também circuito de pré-aquecimento. Para testar as lâmpadas compactas através do circuito de testes desenvolvido, basta que os novos tempos de operação sejam gravados no firmware do PIC controlador do circuito e que seja criado um novo compartimento, onde os sensores de luz poderão captar a luminosidade dessas lâmpadas. Logo, o circuito de testes pode ser largamente utilizado, basta que pequenas adaptações sejam implementadas.

8.2 RESULTADOS DOS TESTES

8.2.1 *Reator desprovido de circuito de pré-aquecimento*

Como foi apresentado na seção 3.1, sabe-se que uma lâmpada fluorescente T5 sem um circuito auxiliar de pré-aquecimento em seu respectivo reator tende a sofrer desgastes e danos precoces em seus filamentos, fazendo com que sua vida útil seja consideravelmente reduzida.

Desta maneira, como previsto, o conjunto reator/lâmpada fluorescente um (Reator 1 - Fabricante B) que não apresentava nenhum circuito auxiliar de pré-aquecimento foi o primeiro a apresentar falhas nas lâmpadas, sendo que as duas lâmpadas ligadas a este reator suportaram, concomitantemente, 3160 (três mil, cento e sessenta) ciclos de operação, até que fossem completamente danificadas. Na Figura 32 é possível observar as lâmpadas fluorescentes após a detecção de falha, as quais apresentaram acentuado escurecimento na extremidade do bulbo, resultado da deposição de mercúrio, oriundo de características de ignição inadequadas.

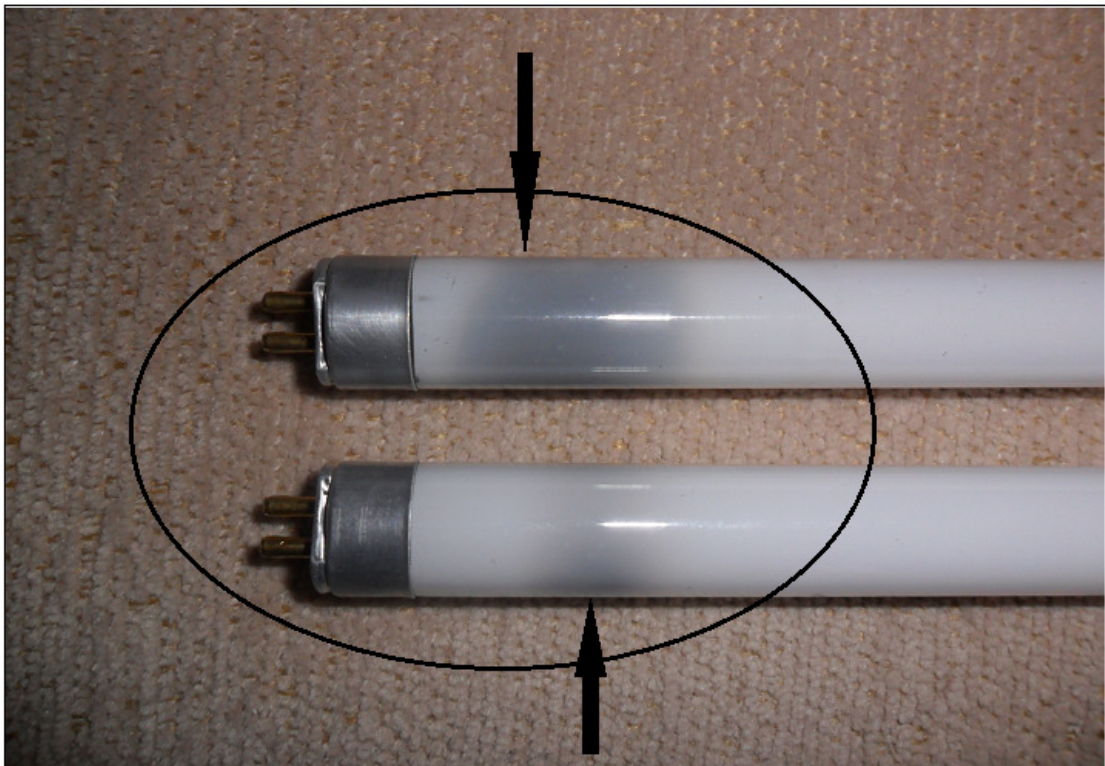


Figura 31 - Lâmpadas queimadas - reator sem PTC.
Fonte: Autoria própria

Muito antes da ocorrência da falha propriamente dita, as lâmpadas do reator sem circuito de pré-aquecimento já começaram a apresentar um leve escurecimento, enquanto as lâmpadas ligadas aos outros reatores não apresentavam ainda este comportamento.

O escurecimento do bulbo na extremidade da lâmpada é uma evidência concreta do desgaste dos filamentos. Este escurecimento é resultado da evaporação do material componente dos filamentos da lâmpada, o qual é degradado pouco a pouco cada vez que a lâmpada fluorescente é ligada.

8.2.2 Reator com pré-aquecimento por PTC

No ciclo de operação 6650, verificou-se a ocorrência de falha em um dos reatores com PTC (Fabricante B). O sistema de testes acusou falha em ambas as lâmpadas ligadas a este reator. No entanto, analisando o evento ocorrido, foi possível observar que um dos PTCs do circuito do reator estava danificado. Por esta razão as lâmpadas apagaram e o sistema de testes gravou o ciclo de operação em que tal fato ocorreu.

A Figura 33 mostra a comparação entre o PTC danificado durante os testes e um PTC em bom estado.



Figura 33 – Comparação entre PTC defeituoso e PTC em bom estado
Fonte: Autoria própria

O sistema de testes acusa falha através da detecção de falta de luminosidade em alguma das lâmpadas. Logo, ao se detectar uma falha, uma análise dos reatores e das lâmpadas correspondentes é realizada, de modo a descobrir qual foi o real motivo deste acontecimento. Neste caso, o defeito foi detectado no circuito do reator, de modo que o resultado gravado não é relevante na análise da vida útil das lâmpadas e, por este motivo, foi desconsiderado nesta análise.

O PTC defeituoso foi substituído por um componente novo e similar. O circuito foi ligado novamente e um reset da “trava” que bloqueia a gravação de falhas foi acionado, permitindo novamente a gravação, na memória EEPROM, de eventuais defeitos.

Os reatores com pré-aquecimento por PTC continuam operando sem que falhas tenham ocorrido nas lâmpadas, ao menos até o ciclo 9000.

8.2.3 Reator com pré-aquecimento por circuito auxiliar auto-oscilante

Durante a realização dos testes de verificação do sistema de testes, um inconveniente foi detectado no circuito auxiliar auto-oscilante. Este fato foi verificado no momento do teste de gravação de falhas. Para simular a falha de uma das lâmpadas, esta foi propositalmente desconectada do reator em funcionamento. Contudo, neste momento, o circuito auxiliar auto-oscilante sofreu alguns danos e ficou comprometido.

Quando uma das duas lâmpadas é desconectada de um reator ainda em funcionamento, a proteção do reator atua, fazendo com que ambas as lâmpadas não acendam. Entretanto, quando a proteção do reator é acionada, a tensão no barramento de entrada continua presente, logo o circuito auxiliar entra novamente em período de operação, pois para o circuito auxiliar o estado de proteção é idêntico ao estado inicial de operação do reator. O problema principal é que o circuito auxiliar permanece em operação contínua, uma vez que o reator está em estado de proteção, permitindo a ocorrência de sobreaquecimento nos componentes do circuito auxiliar, sobretudo no MOSFET, causando o dano permanente de alguns componentes.

Pensou-se, inicialmente, em substituir o transistor que desliga o circuito auxiliar por um tiristor, mas a corrente de base era insuficiente para a polarização deste componente.

Algumas topologias de comutação estão sendo estudadas para que o circuito de pré-aquecimento auto-oscilante possa ser habilitado e desabilitado de forma independente, isto é, sem que o reator tenha influência em sua comutação. A remodelagem deste circuito, porém, dependerá de várias análises e o estudo de métodos que sejam adequados ao tipo de operação

desejada. Estes estudos poderão se utilizar do circuito de testes desenvolvido para ensaiar soluções implementadas e verificar suas funcionalidades.

8.2.4 *Análise comparativa*

A Tabela 8 apresenta um comparativo entre os reatores testados, apresentando seus respectivos tipos de circuito de pré-aquecimento e o número total de ciclos de operação ocorridos até a incidência de falha nas lâmpadas.

<i>Reator</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Tensão de alimentação</i>	<i>Pré-Aquecimento</i>	<i>Falha nas lâmpadas</i>
1	Fabricante B	220V	Sem pré-aquecimento	Ciclo 3160
2	Fabricante B	220V	Com PTC	Ciclo 10976 Sem falhas
3	Fabricante A	220V	Com PTC	Ciclo 10976 Sem falhas
4	Fabricante B	127V	Com circuito de pré-aquecimento auxiliar auto-oscilante	Ciclos de operação desconsiderados

Tabela 8 - Ciclo salvo na primeira falha
Fonte: Autoria própria

9 CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido para testar os diferentes tipos de pré-aquecimento, bem como a influência destes na vida útil das lâmpadas fluorescentes do tipo T5, apresentou resultados satisfatórios, de acordo com o comportamento que era esperado. O circuito desenvolvido teve seu funcionamento comprovado através de testes básicos, simulando as possíveis situações as quais poderia estar sujeito durante sua operação.

A análise das lâmpadas fluorescentes através do número de ciclos de operação é uma maneira eficaz de diagnóstico e comparação em termos de vida útil, dado que o momento da partida da lâmpada realmente é um fator crítico, que impacta na duração do tempo de funcionamento desta, principalmente quando não existe o devido dispositivo para pré aquecer os filamentos.

Durante a operação do sistema de testes, foi possível notar o gradativo escurecimento das extremidades das lâmpadas fluorescentes. Este escurecimento é resultado da degradação dos filamentos das lâmpadas, os quais sofrem deterioração no momento da ignição. O material desprendido dos filamentos durante este processo é depositado nas paredes internas do bulbo da lâmpada, possibilitando visualizar a olho nu o resultado deste fenômeno.

A presença de um circuito de pré-aquecimento nos reatores auto-oscilantes para lâmpadas fluorescentes T5 é fundamental para garantir a operação destas por um tempo prolongado, no que diz respeito ao número de ciclos de operação. Este fato foi comprovado durante os testes das lâmpadas fluorescentes, através dos quais foi possível observar que as lâmpadas ligadas ao reator operando sem nenhum circuito de pré-aquecimento, apresentaram defeito prematuramente.

No decorrer dos testes, as lâmpadas cujo reator associado estava desprovido de qualquer sistema de pré-aquecimento, foram as primeiras a apresentar sinais visíveis de deterioração dos filamentos. O acentuado escurecimento das extremidades de ambas as lâmpadas conectadas a este reator deixou claro o fato de estas estarem sofrendo um alto grau de degradação.

O fato de a degradação estar ocorrendo acentuadamente e prematuramente nestas lâmpadas ficou comprovado quando, no ciclo três mil, cento e sessenta, o sistema de testes acusou falha nas duas lâmpadas conectadas ao reator auto-oscilante sem circuito de pré-aquecimento.

Além da falha antecipada nessas lâmpadas, demonstrando o quão curto pode ser o período da vida útil, notou-se que o escurecimento das extremidades da lâmpada fluorescente, quanto mais acentuado se torna, mais tende a diminuir consideravelmente o brilho da lâmpada, de modo que impede a correta e eficaz propagação da luz através do bulbo. Esta observação foi possível nas primeiras lâmpadas que apresentaram defeito, nas quais o escurecimento nos cantos da mesma fez com que o brilho nas extremidades ficasse excessivamente comprometido, enquanto que a região central da lâmpada continuava apresentando o funcionamento adequado.

O sistema de pré-aquecimento através de PTC mostrou-se eficaz em comparação à operação do reator sem nenhum sistema de pré-aquecimento. As lâmpadas ligadas aos reatores que apresentavam PTCs para pré-aquecer os filamentos não apresentaram escurecimento tão acentuado quanto as lâmpadas cujos reatores não possuíam circuito de pré-aquecimento.

Além disso, o sistema de testes não acusou falhas nas lâmpadas conectadas aos reatores com PTC, até o ciclo dez mil, novecentos e setenta e seis. A continuidade dos testes nestas lâmpadas visa definir qual o número de ciclos aproximado suportado pelas mesmas. Entretanto, com este valor, denota-se que a presença de um circuito de pré-aquecimento traz grandes benefícios às lâmpadas fluorescentes, de modo que preserva os filamentos da mesma, permitindo a elas obter uma vida útil prolongada.

O sistema de testes pode, através de uma análise de vida útil com um maior número de amostras de lâmpadas fluorescentes, definir um valor médio de vida útil para as lâmpadas fluorescentes, baseado na contagem do número de ciclos, operando com cada tipo de circuito de pré-aquecimento. É evidente que este tempo de vida útil depende da qualidade da própria lâmpada, o que pode variar de acordo com o fabricante. Contudo, selecionando o mesmo fabricante para realizar os testes, é possível fazer uma análise comparativa eficaz entre os tipos de pré-aquecimento. Quanto maior o número de amostras testadas, maior a confiabilidade do resultado a ser obtido através do sistema de testes.

O circuito desenvolvido para os testes foi capaz de detectar uma inconformidade no funcionamento do circuito auxiliar de pré-aquecimento. Este fato foi reportado para os desenvolvedores do circuito auxiliar, de modo a permitir a implementação de um aprimoramento deste, visando adequar sua utilização nos reatores das lâmpadas fluorescentes.

Este fato provou que o sistema de testes é eficaz não apenas na verificação da vida útil das lâmpadas fluorescentes, mas também na descoberta de possíveis defeitos, falhas ou

inconformidades que se manifestem nos reatores ou nos circuitos de pré-aquecimento que os compõe.

O sistema de testes desenvolvido pode, ainda, ter sua utilização estendida para outros tipos de lâmpada, através da simples adequação do compartimento para acomodar as lâmpadas. Um dos exemplos é a lâmpada compacta, a qual pode ser facilmente testada, nas mesmas condições que as lâmpadas fluorescentes.

Através do sistema de testes desenvolvido, foi possível realizar uma análise aprofundada dos efeitos que os sistemas de pré-aquecimento dos filamentos produzem no funcionamento das lâmpadas fluorescentes, sobretudo de sua vida útil. A utilização deste sistema de testes em ensaios futuros é de extrema importância na verificação da eficácia dos circuitos de pré-aquecimento, visando chegar a uma solução que traga os maiores benefícios à vida útil das lâmpadas fluorescentes, resultando em uma maior qualidade destas e reduzindo os efeitos indesejáveis gerados pelo descarte excessivo deste tipo de lâmpada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABILUX. Associação Brasileira da Indústria de Iluminação.
Disponível em <http://www.abilux.com.br/> (Acessado em 25/09/2011)
- ALICE-web. Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior via Internet.
Disponível em <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/> (Acessado em 25/09/2011)
- ATIYEL, Said Oliveira. **Gestão de resíduos sólidos: o caso das lâmpadas fluorescentes.** Dissertação de pós graduação em administração. Porto Alegre, RS. Nov, 2001.
- BRASIL, Agência. **Lâmpadas incandescentes devem sair do mercado até 2016.**
Disponível em <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=lampadas-incandescentes-sair-mercado&id=020175110110> (Acessado em 25/09/2011).
- DAVIS, Robert et al. **Rapid Cycle for Fluorescents Lamps – What Do the Results Mean?** IESNA Annual Conference. 1996.
- DOS REIS, Fernando Soares. et al **A influência do reator com partida programada na vida útil da lâmpada fluorescente t5.** IEEE Industrial Electronic.
- ELETROBRAS. Disponível em www.eletrobras.gov.br/elb/procel (Acessado em 22/09/2011).
- FDTE. Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia.
Disponível em <http://www.fdte.org.br/> (Acessado em 22/09/2011)
- FERREIRA, Castellane Silva. **Sistema de Gerenciamento Automático de Reatores Eletrônicos com Ajuste do Nível de Luminosidade para Múltiplas Lâmpadas fluorescentes.** Dissertação de mestrado em engenharia elétrica. Ilha Solteira, SP. Dez 2008.
- GOEKING, Weruska. **Lâmpadas e Leds.** 2009. Disponível em www.osetoelettrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/176-lampadas-e-leds.html (Acessado em 10/09/2011).
- HAUSMANN, Romeu. **Sistema inteligente de iluminação para duas lâmpadas fluorescentes de 40W,** Florianópolis, 2000, tese de mestrado, UFSC.
- KOZLOFF, K.; COWART, R.; JANNUZZI, G. DE M.; MIELNIK, O. , 2001 – **Energia:Recomendações para uma Estratégia Nacional de Combate ao Desperdício - USAID,** Campinas, 193p.
- MME. Ministério de Minas e Energia. Disponível em <http://www.mme.gov.br> (Acessado em 14/09/2011).
- NEWMOA. **IMERC Fact Sheet. Mercury Use in Lighting.** Ago, 2008. Disponível em www.newmoa.org/prevention/mercury/imerc/factsheets/lighting.cfm (Acessado em 25/09/2011).

- OSRAM, Sylvania. **Ballast Technology**. Disponível em: <http://www.sylvania.com/Lighting101/LearnLighting/LightAndColor/Ballasts/> (Acessado em 25/09/2011).
- PROARQ. **Cadernos do proarq**. Programa de pós-graduação em arquitetura. Rio de Janeiro, vol. 8, nº 8, Dez 2004.
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Disponível em: www.eletronbras.gov.br/procel (Acessado em 02/09/2011)
- ROCHA, Délcio. **Usar lâmpadas fluorescentes é uma decisão em prol do planeta**. Disponível em <http://brasilatual.com.br/sistema/?p=1153> (Acessado em 22/09/2011).
- RODRIGUES, Pierre. **Manual de iluminação eficiente**. PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 1ª edição. Julho, 2002.
- GULES, Roger. et al. **“An Auxiliary Self-Oscillating Preheating System for Self-Oscillating Fluorescent Lamp Electronic Ballasts”**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, No. 4, April 2012, pp. 1859-1868.
- SANTOS, Anderson S., et al. **A influência do reator partida programada na vida da lâmpada fluorescente T5**.
- SANTOS, Anderson S. **Reator Eletrônico multifrequência para lâmpada fluorescente t5 com pré-aquecimento por tensão**. Porto Alegre, 2004.
- SHOPPING CONSTRUIR. **Loja Online**. Disponível em: <http://www.shoppingconstruir.com/reator-magnetico-partida-rapida-ar-1-x-40w.html> , (Acessado em 25/09/2011).
- SOARES, Anderson et al. **Multifrequency Eletronic Ballast for T5 Fluorescent Lamps with Voltage Preheating**. Rio Grande do Sul, 2005, tese de mestrado. PUC-RS.
- SOUZA, Marcus de Anicésio. **Strategies for the reduction and conservation of electrical energy in lighting**. Cuiabá - MT, 2010.
- XAVIER, Paulo André Carvalho. **Avaliação das características elétricas de reatores eletrônicos utilizados em lâmpadas fluorescentes tubulares**. Dissertação de mestrado em engenharia elétrica. Brasília, set 2005.

APÊNDICE A – ALGORITMO DO CIRCUITO DE TESTES

```
1 /* //TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO\\
2 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
3 // PROGRAMA DE CONTROLE DOS CICLOS DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES //
4 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
5 //// ALUNOS: MICHAEL CECCON, JOSÉ AUGUSTO, RODRIGO LUCKOW //// */
6
7 //VARIAVEIS GLOBAIS
8 unsigned char loByte;
9 unsigned char hiByte;
10 unsigned int contador;
11 unsigned int contador2;
12 unsigned int contador3;
13 unsigned int contador4;
14 unsigned int contador5;
15 unsigned int contador6;
16 unsigned int contador7;
17 unsigned int contador8;
18 unsigned int contador9;
19 unsigned int contador1;
20 unsigned int i;
21 unsigned int grava_ciclo;
22 unsigned int auxiliar;
23 unsigned int auxiliar2;
24 char ucTexto[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
25 char ucTexto2[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
26 char ucTexto3[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
27 char ucTexto4[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
28 char ucTexto5[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
29 char ucTexto6[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
30 char ucTexto7[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
31 char ucTexto8[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
32 char ucTexto9[10]; // Matriz para armazenamento de texto.
33 unsigned short baixo;
34 unsigned short alto;
35 unsigned short baixo2;
36 unsigned short alto2;
37 unsigned short baixo3;
38 unsigned short alto3;
39 unsigned short baixo4;
40 unsigned short alto4;
41 unsigned short baixo5;
42 unsigned short alto5;
43 unsigned short baixo6;
44 unsigned short alto6;
45 unsigned short baixo7;
46 unsigned short alto7;
47 unsigned short baixo8;
48 unsigned short alto8;
49 unsigned short baixo9;
50 unsigned short alto9;
```

```
51 unsigned char trava1;
52 unsigned char trava2;
53 unsigned char trava3;
54 unsigned char trava4;
55 unsigned char trava5;
56 unsigned char trava6;
57 unsigned char trava7;
58 unsigned char trava8;
59 char text[15];
60
61
62 // --- Copying strings from ROM to RAM
63 void strConstCpy(char *dest, const char *source) {
64 while(*source)
65 *dest++ = *source++ ;
66 *dest = 0 ;
67 }
68
69
70 //Gravacao das falhas em cada endereço da EEPROM
71 void grava_falha() {
72     EEPROM_Write(0, contador);
73     EEPROM_Write(1, contador>>8);
74     delay_ms(80);
75 }
76
77 void grava_falha2() {
78     trava1=1;
79     EEPROM_Write(2, contador);
80     delay_ms(50);
81     EEPROM_Write(3, contador>>8);
82     delay_ms(100);
83 }
84
85 void grava_falha3() {
86     trava2=1;
87     EEPROM_Write(4, contador);
88     EEPROM_Write(5, contador>>8);
89     delay_ms(100);
90 }
91
92 void grava_falha4() {
93     trava3=1;
94     EEPROM_Write(6, contador);
95     EEPROM_Write(7, contador>>8);
96     delay_ms(100);
97 }
98
99 void grava_falha5() {
100     trava4=1;
101     EEPROM_Write(8, contador);
102     EEPROM_Write(9, contador>>8);
103     delay_ms(100);
104 }
105
106 void grava_falha6() {
107     trava5=1;
108     EEPROM_Write(10, contador);
109     EEPROM_Write(11, contador>>8);
110     delay_ms(100);
111 }
112
113 void grava_falha7() {
114     trava6=1;
115     EEPROM_Write(12, contador);
116     EEPROM_Write(13, contador>>8);
117     delay_ms(100);
118 }
119
```

```

120 void grava_falha8() {
121     trava7=1;
122     EEPROM_Write(14, contador);
123     EEPROM_Write(15, contador>>8);
124     delay_ms(100);
125 }
126
127 void grava_falha9() {
128     EEPROM_Write(16, contador);
129     EEPROM_Write(17, contador>>8);
130     delay_ms(100);
131     trava8 = 1;
132 }
133
134
135 //Busca falha no LDR durante o ciclo ON
136 void busca_falha() {
137     if (PORTC.F0 == 0 && trava1 == 0) {
138         grava_falha2();
139     }
140     if (PORTC.F1 == 0 && trava2 == 0) {
141         grava_falha3();
142     }
143     if (PORTC.F2 == 0 && trava3 == 0) {
144         grava_falha4();
145     }
146     if (PORTC.F3 == 0 && trava4 == 0) {
147         grava_falha5();
148     }
149     if (PORTC.F4 == 0 && trava5 == 0) {
150         grava_falha6();
151     }
152     if (PORTC.F5 == 0 && trava6 == 0) {
153         grava_falha7();
154     }
155     if (PORTC.F6 == 0 && trava7 == 0) {
156         grava_falha8();
157     }
158     if (PORTC.F7 == 0 && trava8 == 0) {
159         grava_falha9();
160     }
161 }
162
163
164 // Imprime no LCD cada ciclo salvo no momento de falhas
165 void ciclo_lcd() {
166     Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR); // Clear display
167     Lcd_Cmd(Lcd_CURSOR_OFF); // Turn cursor off
168     delay_ms(30);
169     Lcd_Out(1,1,"Ciclo Salvo");
170 }
171
172
173 //Escreve LCD principal
174 void escreve_lcd() {
175     Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR); // Clear display
176     Lcd_Cmd(Lcd_CURSOR_OFF); // Turn cursor off
177     delay_ms(15);
178     Lcd_Out(1,1,"Ciclo");
179 }
180
181
182 //Salvar variavel contador
183 void escreve_eeeprom() {
184     grava_falha();
185     contador1 = (alto << 8) | baixo;
186     delay_ms(50);
187     escreve_lcd();
188 }

```

```

189
190
191 //Leitura dos botões para acessar os ciclos salvos
192 void busca_botao() {
193
194     if (PORTE.F0 == 0) { //Zerar as travas contra gravação.
195         trava1=0; trava2=0; trava3=0; trava4=0; trava5=0; trava6=0; trava7=0; trava8=0;
196         delay_ms(30);
197     }
198
199     if (PORTE.F1 == 0) { //zerar contador
200         contador=0;
201         WordToStr(contador, ucTexto);
202         Lcd_Out(2,1,ucTexto);
203     }
204
205     if (PORTB.F0 == 0) {
206
207         baixo2 = EEPROM_Read(2);
208         delay_ms(40);
209         alto2 = EEPROM_Read(3);
210         delay_ms(40);
211         contador2 = (alto2 << 8) | baixo2;
212         WordToStr(contador2, ucTexto2);
213         ciclo_lcd();
214         delay_ms(10);
215         Lcd_Out(2, 1, ucTexto2);
216         delay_ms(2000);
217         escreve_lcd();
218         WordToStr(contador, ucTexto);
219         Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
220     }
221
222     if (PORTB.F1 == 0) {
223
224         baixo3 = EEPROM_Read(4);
225         delay_ms(40);
226         alto3 = EEPROM_Read(5);
227         delay_ms(40);
228         contador3 = (alto3 << 8) | baixo3;
229         WordToStr(contador3, ucTexto3);
230         ciclo_lcd();
231         Lcd_Out(2, 1, ucTexto3);
232         delay_ms(2000);
233         escreve_lcd();
234         WordToStr(contador, ucTexto);
235         Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
236     }
237
238     if (PORTB.F2 == 0) {
239
240         baixo4 = EEPROM_Read(6);
241         delay_ms(40);
242         alto4 = EEPROM_Read(7);
243         delay_ms(40);
244         contador4 = (alto4 << 8) | baixo4;
245         WordToStr(contador4, ucTexto4);
246         ciclo_lcd();
247         Lcd_Out(2, 1, ucTexto4);
248         delay_ms(2000);
249         escreve_lcd();
250         WordToStr(contador, ucTexto);
251         Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
252     }
253
254     if (PORTB.F3 == 0) {
255
256         baixo5 = EEPROM_Read(8);
257         delay_ms(40);

```

```
258  alto5 = EEPROM_Read(9);
259  delay_ms(40);
260  contador5 = (alto5 << 8) | baixo5;
261  WordToStr(contador5, ucTexto5);
262  ciclo_lcd();
263  Lcd_Out(2, 1, ucTexto5);
264  delay_ms(2000);
265  escreve_lcd();
266  WordToStr(contador, ucTexto);
267  Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
268  }
269
270  if (PORTB.F4 == 0) {
271
272  baixo6 = EEPROM_Read(10);
273  delay_ms(40);
274  alto6 = EEPROM_Read(11);
275  delay_ms(40);
276  contador6 = (alto6 << 8) | baixo6;
277  WordToStr(contador6, ucTexto6);
278  ciclo_lcd();
279  Lcd_Out(2, 1, ucTexto6);
280  delay_ms(2000);
281  escreve_lcd();
282  WordToStr(contador, ucTexto);
283  Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
284  }
285
286  if (PORTB.F5 == 0) {
287
288  baixo7 = EEPROM_Read(12);
289  delay_ms(40);
290  alto7 = EEPROM_Read(13);
291  delay_ms(40);
292  contador7 = (alto7 << 8) | baixo7;
293  WordToStr(contador7, ucTexto7);
294  ciclo_lcd();
295  Lcd_Out(2, 1, ucTexto7);
296  delay_ms(2000);
297  escreve_lcd();
298  WordToStr(contador, ucTexto);
299  Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
300  }
301
302  if (PORTB.F6 == 0) {
303
304  baixo8 = EEPROM_Read(14);
305  delay_ms(40);
306  alto8 = EEPROM_Read(15);
307  delay_ms(40);
308  contador8 = (alto8 << 8) | baixo8;
309  WordToStr(contador8, ucTexto8);
310  ciclo_lcd();
311  Lcd_Out(2, 1, ucTexto8);
312  delay_ms(2000);
313  escreve_lcd();
314  WordToStr(contador, ucTexto);
315  Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
316  }
317
318  if (PORTB.F7 == 0) {
319
320  baixo9 = EEPROM_Read(16);
321  delay_ms(40);
322  alto9 = EEPROM_Read(17);
323  delay_ms(40);
324  contador9 = (alto9 << 8) | baixo9;
325  WordToStr(contador9, ucTexto9);
326  ciclo_lcd();
```

```

327 Lcd_Out(2, 1, ucTexto9);
328 delay_ms(2000);
329 escreve_lcd();
330 WordToStr(contador, ucTexto);
331 Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
332 }
333 }
334
335
336 //Tempo de desligamento
337 void delay_5min() {
338 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
339 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
340 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
341 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
342 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
343 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
344 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
345 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
346 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
347 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
348 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
349 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
350 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
351 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
352 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
353 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
354 delay_ms(6000); busca_botao(); delay_ms(6000); busca_botao();
355 }
356
357 //Busca falha dos LDR's
358 void tempo_falha() {
359 delay_ms(2000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
360 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
361 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
362 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
363 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
364 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
365 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
366 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
367 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
368 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
369 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
370 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha();
371 delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000); busca_falha(); delay_ms(1000);
372 }
373
374
375 //PROGRAMA PRINCIPAL
376 void main() {
377 Lcd_Init(&PORTD);
378 escreve_lcd();
379 OPTION_REG=0b00000000;
380
381 while(1) {
382
383 baixo = EEPROM_Read(0);
384 delay_ms(40);
385 alto = EEPROM_Read(1);
386 delay_ms(40);
387
388 contador = (alto << 8) | baixo;
389
390 WordToStr(contador, ucTexto);
391 Lcd_Out(2,1,ucTexto); // escreve o conteúdo na linha 2 do LCD
392
393 //Ciclo Principal (40s ligado - 5 min desligado)
394 delay_ms(30);
395 TRISD = 0;

```

```
396 TRISE = 0b00000111;
397 ADCON1= 0b00000010;
398 auxiliar = 0;
399 auxiliar2 = 0;
400 PORTD.F1 = 1;      //Saida ativada
401
402 //Temporização ON - Busca falha
403 tempo_falha();
404
405 PORTD.F1 = 0;      //Saida desativada
406 auxiliar = 1;
407 delay_5min();
408 grava_ciclo++;
409
410 if (auxiliar == 1) {
411     contador++;
412 }
413
414 if (grava_ciclo == 1) {
415     escreve_eeeprom();
416     grava_ciclo = 0;
417 }
418
419 }//while(1)
420
421 } //Fim do Programa
```

APÊNDICE B – LISTA DE COMPONENTES DO CIRCUITO DE TESTES

Quantidade	Componente	Utilização
1	Placa de cobre 10x20 cm	Placa de circuito impresso
1	PIC16F877A	Controle e monitoramento do circuito
1	Display LCD 16x2	Visualização de informações relevantes
2	LM324	Amplificadores operacionais
1	LM7805	Regulador de tensão 5V _{cc}
1	Capacitor 0,33uF / >12V	Filtro do regulador
1	Capacitor 0,1uF / > 5V	Filtro do regulador
2	Capacitor 22 pF	Crystal oscilador
1	Capacitor ceramico 100nF / >5V	Filtro da entrada do PIC
8	Resistor 10k	Circuito lógico dos LDRs
1	Resistor 10k	Master clear (MCLR)
1	Resistor 10k	Reset da contagem de ciclos
9	Resistor 220R	LEDs
1	Resistor 1k	Reset dos dados da EEPROM
1	Resistor 470R	Gate do transistor
9	LED vermelho	Sinalização das lâmpadas e do rele
9	Microbotão	1 para reset e 8 para visualizar falhas
2	Trimpot 10k	1 para display e 1 para circuito dos LDRs
1	Diodo 1N4148	Circuito do rele
1	Transistor NPN BC548	Circuito do rele
1	Conector coaxial	Entrada de tensão 12V
1	Conector 3 vias	Saída do rele: conexão de uma das fases
1	1 Crystal 8 MHz	Oscilador para o PIC
2	Rele 220V (bobina 24V _{cc})	Chaveamento da fase do reator
1	Barra de pinos - 14 conexões	Fixação e conexões do display LCD
1	Barra de pinos - 2 conexões	Reset da contagem de ciclos
8	sensores LDR	Identificação do estado da lâmpada
8	Conector tipo KK "fêmea"	Conexão dos LDRs na placa
8	Conector tipo KK "macho"	Conexão dos LDRs na placa
8	Lâmpada fluorescente T5 28W	Lâmpadas em teste
8	Conector para lâmpada T5	Conexão das lâmpadas fluorescentes T5
1	Reator Fabricante B 220V	Com pré-aquecimento por PTC
1	Reator Fabricante B 220V	Sem pré-aquecimento (PTC removido)
1	Reator Fabricante A 220V	Com pré-aquecimento por PTC
1	Reator Fabricante B 127V	Circuito auxiliar de pré-aquecimento
1	Fonte de alimentação 12V	Alimentação do circuito