



**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Departamento de Engenharia Elétrica**

**JORDAN DA SILVA FLORIANO**

**GERENCIAMENTO TÉRMICO DE LED DE ALTA POTÊNCIA  
USANDO CÉLULA PELTIER**

**João Pessoa - PB  
Junho - 2018**

**JORDAN DA SILVA FLORIANO**

**GERENCIAMENTO TÉRMICO DE LED DE ALTA POTÊNCIA  
USANDO CÉLULA PELTIER**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação de Engenharia  
Elétrica como um dos pré-requisitos para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.  
Dr. Alexsandro José Virgínio dos Santos.**

**João Pessoa - PB  
Junho– 2018**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F635g Floriano, Jordan da Silva.

GERENCIAMENTO TÉRMICO DE LED DE ALTA POTÊNCIA USANDO  
CÉLULA PELTIER / Jordan da Silva Floriano. - João  
Pessoa, 2018.

40 f. : il.

Orientação: Aleksandro Santos.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. LED de alta potência. 2. Gerenciamento térmico. 3.  
Controlador PID. I. Santos, Aleksandro. II. Título.

UFPB/BC

**JORDAN DA SILVA FLORIANO**

**Gerenciamento térmico de LED de alta potência usando célula Peltier**

**Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Data de Aprovação: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_**

**Aprovado por:**

---

**Prof. Dr. Aleksandro José Virgínio dos Santos (Orientador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto (Avaliador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Lucas Vinícius Hartmann (Avaliador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa - PB**  
**Junho - 2018**

## RESUMO

A temperatura de junção de um LED de alta potência aumenta em relação ao valor da corrente de polarização. Esse aumento da temperatura causa a diminuição da vida útil ou, até mesmo, caso o LED não tenha um sistema de dissipação térmico eficiente, a destruição desses dispositivos. Devido a isso, foram estudados e apresentados alguns métodos comumente adotados para a redução da temperatura de LEDs de alta potência. Após analisar todas as técnicas, escolheu-se implementar o controle térmico utilizando células de Peltier. Dessa forma, uma vez que a corrente não é alterada, a luminosidade do LED não é alterada, o que acontece em grande parte das técnicas estudadas. Desenvolveu-se um sistema para realizar o gerenciamento térmico de LED de alta potência. Implementou-se um controlador digital PID a fim de atuar no controle da célula Peltier para manter a temperatura em um valor determinado. Desenvolveu-se uma rotina de autossintonia do controlador PID utilizando o método do relé realimentado. Os testes em laboratório comprovaram a eficácia do controle térmico, pois mostraram que o sistema consegue manter a temperatura do LED em um valor constante e reduzido em relação a quando não se utiliza o sistema.

**Palavras-Chaves:** LED de alta potência. Gerenciamento térmico. Controlador PID.

## **ABSTRACT**

The junction temperature of a high-power LED increases with respect to the value of the bias current. This increase in temperature causes a decrease in the lifespan or, even if the LED does not have an efficient thermal dissipation system, the destruction of these devices. Due to this, were studied and presented some commonly adopted methods for reducing the temperature of high power LEDs. After analyzing all the techniques, it was chosen to implement the thermal control using Peltier cells. Thus, since the current is not altered, the luminosity of the LED is not altered, which happens in a great part of the techniques studied. A system was developed to perform the thermal management of high power LEDs. A PID digital controller was implemented to control the Peltier cell to maintain the temperature at a certain value. An auto tuning routine of the PID controller was developed using the feedback relay method. The laboratory tests proved the effectiveness of the thermal control because they showed that the system can maintain the temperature of the LED in a constant value and reduced when compared to when the system is not used.

**Keywords:** High-power LED. Thermal management. PID controller

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de recombinação .....	15
Figura 2 - Diagrama de níveis de energia.....	15
Figura 3 - Aspecto construtivo do LED .....	16
Figura 4 - Luminosidade em função da temperatura de junção .....	17
Figura 5 - Vida útil em função da temperatura da junção .....	18
Figura 6 - Proteção contra altas temperaturas do CI IDL6070.....	20
Figura 7 - Simples célula peltier do tipo N.....	20
Figura 8 - Simples célula Peltier do tipo P .....	21
Figura 9 - Célula Peltier formada por múltiplas pastilhas .....	22
Figura 10 - Módulo Peltier .....	22
Figura 11 - Principais variáveis envolvidas na célula Peltier .....	23
Figura 12 - Diagrama em boco controlador PID .....	24
Figura 13 - Diagrama em bloco do método Relé.....	27
Figura 14 - Funcionamento do método relé realimentado.....	27
Figura 15 -Fonte de corrente controlada por tensão .....	29
Figura 16 - Filtro passa-baixa e amplificador não-inversor .....	30
Figura 17 -Circuito para monitorar corrente.....	31
Figura 18 - Estrutura de testes .....	33
Figura 19 - Curva de temperatura do LED sem gerenciamento térmico.....	34
Figura 20 - Atuação do controlador PID mantendo a temperatura de referência de 35°C.....	36
Figura 21 - Atuação do controlador PID mantendo a temperatura de referência de 40°C.....	37

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Cálculo dos parâmetros do controlador.....	28
Tabela 2 - Valores de temperatura obtidos com o controle da corrente da célula Peltier .....	35
Tabela 3 - Parâmetros encontrados com a rotina de autossintonia.....	36

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>12</b>
1.2.1	Objetivo Geral.....	12
1.2.2	Objetivos Específicos .....	12
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>O diodo emissor de luz.....</b>	<b>14</b>
2.1.1	Características do LED .....	14
2.1.2	LEDs de alta potência .....	16
2.1.3	Métodos de gerenciamento térmico .....	18
<b>2.2</b>	<b>Célula de Peltier .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Controle digital .....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODO PROPOSTO PARA GERENCIAMENTO TÉRMICO DE LEDS DE ALTA POTÊNCIA .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>

## INTRODUÇÃO

O uso da energia elétrica para iluminação é algo indispensável para os padrões de vida atual. A utilização de lâmpadas e luminárias vai desde a iluminação pública, provendo principalmente segurança, até anúncios publicitários, melhorando a visibilidade e causando destaque. Devido a esse grande número de aplicações, faz-se cada vez mais necessário a utilização de forma eficiente da energia elétrica, a fim de se preservar os recursos energéticos.

Nessa direção, a busca por tecnologias que utilizem a energia elétrica de forma eficiente vem aumentando a cada dia. Na área de iluminação, pode-se observar a evolução dos materiais e tecnologias utilizadas nas lâmpadas. Nas lâmpadas incandescentes, por exemplo, cerca de 80% da energia elétrica é desperdiçada em forma de calor, já nas lâmpadas fluorescentes, esse valor diminui para 15% (BOTELHO; FIGUEIREDO, 2012). Com essa comparação, é possível perceber como avanço da tecnologia e a eficiência energética estão entrelaçados.

As luminárias LED (*Lighting Diode Emissor* – Diodo emissor de Luz) vêm ganhando cada vez mais espaço nesse cenário devido ao seu grande potencial de economia energética, tamanho reduzido e capacidade de se obter cores diversas (SALES, 2011). Do ponto de vista ambiental, essa tecnologia torna-se relevante pelo fato de não serem utilizados componentes tóxicos no processo de fabricação, ao contrário das lâmpadas de vapor de mercúrio e de sódio, assim como também, no que se refere a eficiência energética, já que boa parte da energia elétrica consumida é transformada em luz visível. (BLUESPAN, 2009)

A durabilidade de luminárias LED faz com que o custo operacional com manutenção diminua, o que a torna interessante para o uso em iluminações públicas. Em países Europeus, devido a incentivos do governo, a utilização de luminárias LED em pontos de iluminação vem aumentando de forma considerável, um exemplo é a cidade de Coimbra em Portugal, que em 2014 tornou-se a primeira cidade do mundo com 100% da iluminação pública feitas através de luminárias LED (CABRAL, 2014).

Além da iluminação pública, as luminárias LED também são utilizadas em ambientes residenciais e industriais. Nas aplicações residenciais, as lâmpadas LEDs são vendidas no mesmo formato das incandescentes, facilitando o manuseio e a mudança do sistema, já que não é necessário alterar a instalação elétrica.

Devido ao fato dos LEDs utilizados em lâmpadas para uso residencial serem de baixa potência, normalmente não é preciso se preocupar com fontes auxiliares ou com o material utilizado para a dissipação de calor. Por esse motivo, a maioria das lâmpadas comerciais é

fabricada utilizando plásticos e com as fontes na parte inferior. Em aplicações industriais, as luminárias precisam de um LED de alta potência por serem usadas em áreas extensas e com a necessidade de uma luz mais intensa, como em galpões com estações de trabalho. Nesses casos, há a necessidade de fazer um estudo para definir o material utilizado e o sistema de ventilação, a fim de garantir que a luminária tenha suas características preservadas (SU *et al*, 2010).

## 1.1 Justificativa

Com o crescimento do uso de LED de alta potência, engenheiros reuniram dados que, de forma quantitativa, comprovam como o excesso de calor encurta o tempo de vida útil do componente. Por exemplo, um LED que opera com uma temperatura interna de 120° C consegue obter 60 000 horas de funcionamento; se esse mesmo dispositivo estiver funcionando com 150° C, a vida útil passa a ser 10 000 horas (LUMILED, 2016).

A performance luminosa do LED também possui relação com a temperatura de funcionamento. Nesse caso, a alteração no fluxo luminoso irá depender do material de fabricação e do modelo do LED. Em determinados LEDs, uma variação de 25° C na temperatura interna causa uma queda de 30 % do fluxo luminoso. (LUMILED, 2016)

Assim sendo, o gerenciamento térmico torna-se imprescindível no projeto de uma luminária LED. Projetistas costumam usar técnicas passivas para a dissipação do calor. Em aplicações onde a temperatura ambiente é baixa e não varia muito, esses métodos funcionam bem, mas podem ter dificuldades para dissipar o calor em ambientes mais rípidos.

Outra forma de realizar o gerenciamento é utilizando técnicas ativas, nas quais um circuito eletrônico complementar é adicionado à luminária LED. Apesar dessas técnicas possuírem algumas vantagens quando comparadas aos métodos passivos, elas ainda são limitadas ao tipo de aplicação e às condições do ambiente.

Portanto, observa-se a necessidade do desenvolvimento de um sistema que seja capaz de realizar um controle térmico otimizado em lâmpadas LED. Esse sistema deve ser capaz de garantir, principalmente, a luminosidade e a vida útil das luminárias independente da aplicação e do ambiente onde essas se encontram. Dessa forma, esse controle otimizado irá garantir economia de energia, redução de custos de manutenção e maior confiabilidade ao projeto luminotécnico, uma vez que a luminosidade não será afetada com mudanças da temperatura ambiente.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso são divididos em objetivos gerais e específicos conforme descrito nos tópicos a seguir.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema de gerenciamento térmico de LED de alta potência utilizando células de Peltier e técnicas de controle digital. O sistema deve ser capaz de manter a temperatura de operação do dispositivo em um valor desejado e, por consequência, manter o nível de luminosidade constante independente das condições da temperatura ambiente.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar um circuito de acionamento da célula Peltier utilizando fonte de corrente;
- Desenvolver um circuito de monitoramento capaz de medir a corrente elétrica da célula de Peltier e do LED;
- Implementar um método de controle digital para controle da temperatura.

## **1.3 Organização do Trabalho**

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: São apresentadas a introdução, a justificativa e os objetivos do desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 2: É feita uma fundamentação teórica sobre LEDs em geral, LEDs de alta potência e seus métodos de gerenciamento térmico. Explica-se, também, a célula de Peltier e o controle digital.
- Capítulo 3: É apresentado o modelo proposto neste trabalho para gerenciamento térmico dos LEDs de alta potência;
- Capítulo 4: São mostrados os resultados do método proposto para gerenciamento térmico dos LEDs de alta potência;

- Capítulo 5: É apresentada a conclusão, mostrando quais objetivos foram alcançados;
- Capítulo 6: São exibidas todas as referências utilizadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir das informações apresentadas na introdução, percebe-se a importância e os benefícios da iluminação LED. Porém, a utilização de LEDs sem um adequado controle térmico pode acarretar desperdícios financeiros e energéticos. Nessa seção, serão apresentados os conceitos fundamentais ligados ao gerenciamento térmico de um LED de alta potência, desde a teoria física do LED até ao controle digital da temperatura.

### 2.1 O diodo emissor de luz

Em 1962, a General Electric desenvolveu o primeiro LED, o qual só era capaz de emitir luz vermelha. Desde então, com a crescente busca por tecnologias no setor de iluminação, a pesquisa e o desenvolvimento de LEDs aumentam a cada ano. Na década de 90, surgiram os LEDs azuis e, a partir destes, foram desenvolvidos os LEDs que emitem luz branca. Em 2000, deu-se início a produção dos LEDs com chips de alta potência.

Os LEDs são bastantes utilizados como indicadores e sinalizadores, principalmente em painéis de equipamentos, indicando o estado do funcionamento. Porém, existe outro ramo de aplicação onde o LED é bastante utilizado: na iluminação em geral. A alta eficácia luminosa, o baixo consumo, a longa vida útil, a maior resistência mecânica, o fácil controle sobre a intensidade luminosa e a capacidade de emissão de luz branca são os fatores que contribuíram para o desenvolvimento da nova geração de LEDs no setor de iluminação (PINTO,2008).

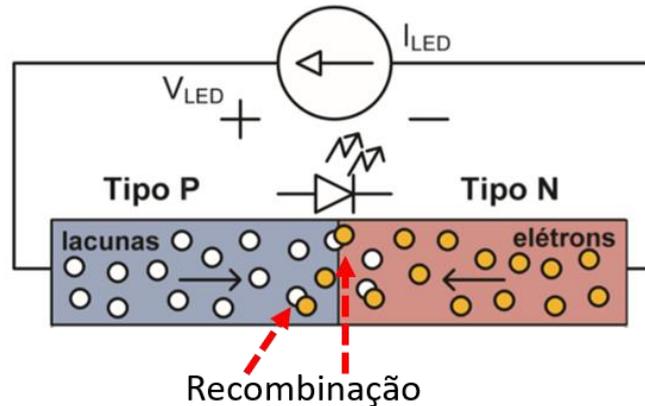
#### 2.1.1 Características do LED

Os diodos emissores de luz são construídos com dois cristais semicondutores dopados de forma distinta. Os cristais tipo N são dopados com impurezas selecionadas de forma a criar um excesso de elétrons e os cristais tipo P são dopados com impurezas que criam um excesso de lacunas (falta de elétrons) (SCHUBERT, 2003). A combinação desses dois cristais forma a junção PN, da mesma forma como em diodos retificadores convencionais.

Quando essa junção é polarizada diretamente, ou seja, quando a região N possui um potencial elétrico maior do que o potencial da região P, um fluxo de elétrons se estabelece da região N para a P. Quando um elétron consegue atravessar da região N para a região P e recombina-se com uma lacuna, ele passa de um nível de energia superior (banda de condução)

para um nível de energia inferior (banda de valência). Essa recombinação é ilustrada na Figura 1.

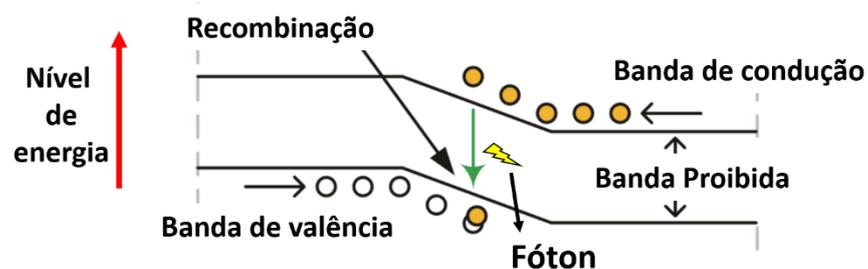
Figura 1 - Representação do processo de recombinação



Fonte: (Adaptado de Almeida, 2012)

Na Figura 2, é mostrado um diagrama de níveis de energia das partículas envolvidas enquanto atravessam o cristal semiconductor. O processo de recombinação que acontece na junção semicondutora faz com que o elétron perca energia; esta energia perdida é, na verdade, convertida em um fóton, cujo comprimento de onda, ou seja, a cor da luz, é dado pela diferença entre os níveis de energia, chamada de banda proibida (HELD, 2008). Essa diferença de energia depende do material utilizado na dopagem da estrutura.

Figura 2 - Diagrama de níveis de energia



Fonte: (Adaptado de Almeida, 2012)

A variedade de opções de cores dos LEDs possibilita o seu uso em diversas aplicações, principalmente para iluminação arquitetônica (PINTO, 2008). Outra propriedade dos LEDs que atrai o seu uso é a eficácia. Nos últimos anos, com as intensas pesquisas realizadas nessa área, a eficácia luminosa do LED já superou a de algumas lâmpadas comuns (CRAFORD, 2007). Como apresentado por Pinto (2008), os LEDs brancos modernos atingiram a marca de 100

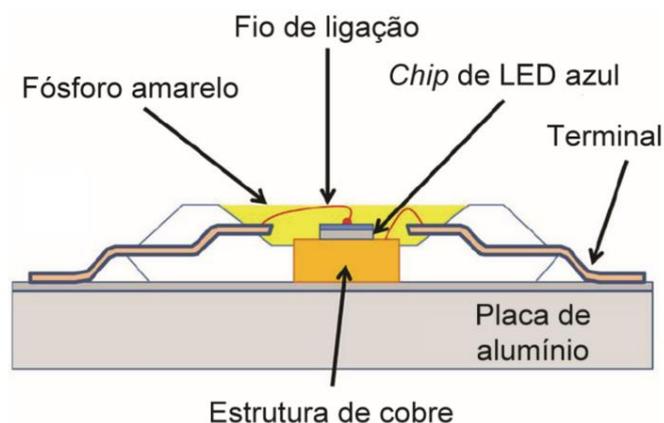
lm/W, o que é um resultado superior ao obtido com lâmpadas incandescentes (15 lm/W) ou mesmo fluorescentes (80 lm/W).

Por ter uma vida útil superior às lâmpadas incandescentes e fluorescentes, o uso de LEDs contribui para redução de custos de manutenção. Segundo Kitsinelis (2011), a vida útil dos LEDs está em torno de 50.000h, enquanto que as lâmpadas fluorescentes têm uma vida útil de 10.000h a 25.000h e as incandescentes de 1.000h.

### 2.1.2 LEDs de alta potência

Visando tanto a remoção de calor do LED quanto o máximo aproveitamento da luz emitida, a construção dos LEDs de alta potência diferencia-se da fabricação dos LEDs comuns. Um encapsulamento plástico é utilizado para abrigar o material dopado, que fica assentado sobre um dissipador metálico de cobre ou alumínio conectado aos terminais do dispositivo por finos fios metálicos (ŽUKAUSKAS *et al.*, 2002). Esse encapsulamento pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Aspecto construtivo do LED



Fonte: (Adaptado de Meneghini., 2010)

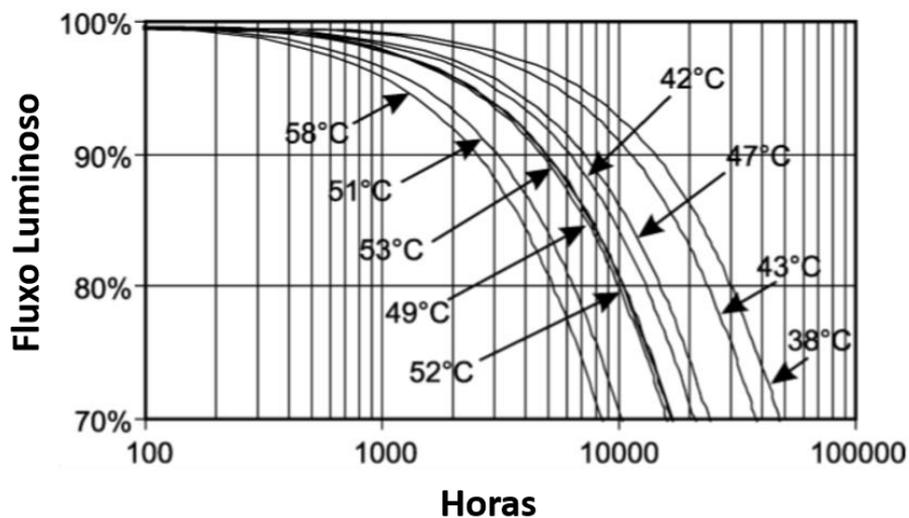
Para evitar o aquecimento excessivo da junção, a estrutura é acoplada a materiais com maior capacidade de dissipação de calor. Diversos trabalhos têm mostrado que as principais falhas ocorridas nos LEDs são devido à operação com temperaturas elevadas, o que reduz drasticamente sua vida útil (NARENDRAN; GU, 2005; SU *et al.*, 2010).

Portanto, o projeto de uma luminária LED deve incluir o dimensionamento de dissipadores térmicos. Segundo Hui e Qin (2009), esse projeto pode ser realizado com circuitos

térmicos ou utilizando correlações entre as propriedades fotométricas dos LEDs e os dissipadores.

Narendran e Gu (2005) realizaram testes com diversos LEDs de alta potência, com o objetivo de verificar a relação da temperatura da junção com a vida útil e a luminosidade do LED. Nos testes de luminosidade, os LEDs foram analisados até atingirem o nível de 70% da luminosidade inicial; esse valor é o indicado pela ASSIST (*Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies*) como sendo o mínimo aceitável para aplicações de iluminação em geral. O resultado do teste de luminosidade para diferentes valores da temperatura de junção pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Luminosidade em função da temperatura de junção

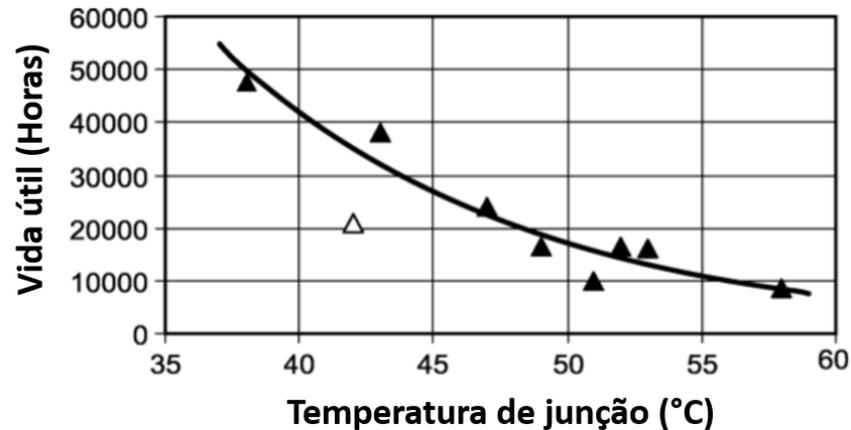


Fonte: (Adaptado de Narendran e Gu. 2005)

Na Figura 4, nota-se que, com o aumento da temperatura de junção, o LED atinge 70% do seu valor inicial de luminosidade de maneira mais rápida. Esses resultados indicam que, por exemplo, se a temperatura da junção variar de 38 °C para 43 °C, uma diferença de 5 °C, ocorre diminuição em 10 000 horas no tempo de utilização do LED antes que ele seja descartado pelo baixo nível de luminosidade.

O segundo resultado de Narendran e Gu (2005) é ilustrado na Figura 5. Nesse experimento, é possível perceber que a vida útil dos LEDs testados diminui de forma exponencial com o aumento da temperatura. Com isso, conclui-se que, para obter a melhor performance e durabilidade de um LED de alta potência, faz-se necessário o estudo de técnicas de gerenciamento térmico. Algumas dessas técnicas serão mostradas na próxima seção.

Figura 5 - Vida útil em função da temperatura da junção



Fonte: (Adaptado de Narendran e Gu. 2005)

### 2.1.3 Métodos de gerenciamento térmico

Existem várias técnicas para gerenciamento do calor dos LEDs, tais técnicas se dividem em passivas e ativas. Os métodos passivos são aqueles em que o sistema é projetado para determinada situação e não consegue adaptar-se às mudanças. Os métodos ativos geralmente são implementados com circuitos e equipamentos eletrônicos capazes de se adequar às condições de funcionamento.

A utilização de dissipador de calor, método passivo mais utilizado, consiste em usar materiais com baixa resistência térmica, tipicamente alumínio, para realizar a dissipação térmica. Os dissipadores são fixados diretamente ao LED, para aumentar o contato e a dissipação térmica. Em luminárias, é comum que a própria carcaça do equipamento, desde que ela seja boa condutora de calor, seja utilizada como dissipador.

A desvantagem da utilização de dissipador é que eles possuem um valor máximo de calor que pode ser retirado da estrutura, o qual depende da forma, do material e do volume do dissipador. Por isso, após fabricado, o sistema fica limitado a atuar naquelas condições calculadas. Outro ponto negativo é que, para retirar uma quantidade muito grande de calor, é necessário um dissipador maior e mais volumoso, o que pode limitar o uso dessa técnica em algumas aplicações.

A inserção de um resistor em série com o LED é outro método passivo. Esse resistor serve para limitar a corrente do LED em um valor que gere um aquecimento aceitável. Um problema evidente desse método é que ele também vai influenciar na luminosidade do LED,

uma vez que o valor de corrente é limitado. Por ser um método passivo, essa solução também fica restringida às condições calculadas.

Um método ativo simples, que segue o mesmo princípio da inserção do resistor, é a utilização de um PTC (*Positive Temperature Coefficient* – Coeficiente Positivo de Temperatura) em série com o LED. O PTC é posto fisicamente próximo ao LED e conectado eletricamente em série, pois, quando a temperatura aumenta, a resistência do PTC também aumenta, limitando a corrente do LED. Ao contrário dos métodos citados anteriormente, a utilização do PTC permite que ele se adeque à situação de funcionamento, porque haverá uma alteração no valor da resistência toda vez que houver uma mudança de temperatura no LED.

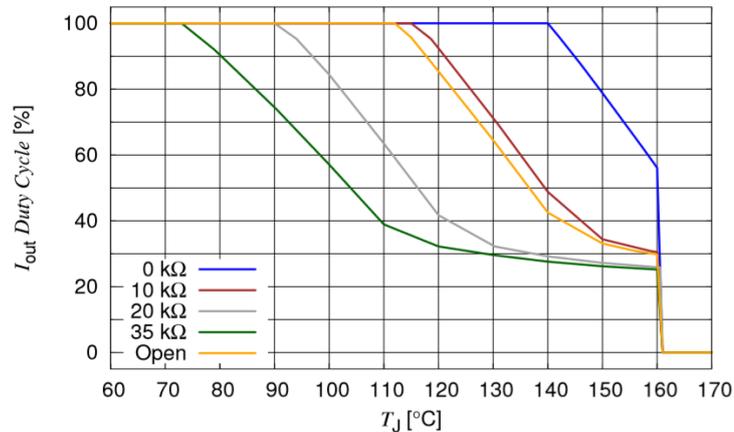
A utilização de pequenos ventiladores (*cooler*) acoplados à estrutura mecânica da luminária LED é uma solução simples e prática. O *cooler* retira o ar quente da luminária e lança para o meio externo. A limitação desse método é o fato de o ventilador permanecer ligado na potência máxima durante todo o tempo de operação do LED, mesmo que ele esteja com uma temperatura de junção em um valor baixo.

Soluções mais avançadas e atuais utilizam CI (Circuito Integrado) dedicado para o gerenciamento térmico. Alguns desses circuitos, como é o caso do CAT4101 (ON Semiconductor ©) e do IDL6070 (Infineon Technologies ©), possuem internamente sensores de temperatura e são capazes de controlar a corrente do LED através de PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação de Largura de Pulso) para realizar o gerenciamento térmico. Outros circuitos integrados, como o LM3464 (Texas Instruments ©), permitem limitar a faixa de temperatura de trabalho do LED e desligam automaticamente quando ela é ultrapassada.

O circuito integrado IDL6070 é capaz de prover até 700 mA para o controle do LED e possui algumas funcionalidades específicas como: controle da luminosidade através de PWM, proteção contra altas temperaturas, proteção contra sobrecorrente (INFINEON, 2014).

Nesse CI, o controle da temperatura é realizado ajustando o nível de corrente do LED através da saída PWM. Essa dimerização segue o gráfico da Figura 6. Pela figura, é possível perceber que a corrente do LED é modulada a partir de um valor de temperatura determinado pelo resistor conectado a um pino de monitoramento do CI. Esse limite da temperatura definido pelo resistor pode variar de 75 °C até 125 °C. Se a temperatura do LED exceder 160 °C, o driver desliga completamente o LED.

Figura 6 - Proteção contra altas temperaturas do CI IDL6070



Fonte: (Infineon, 2014)

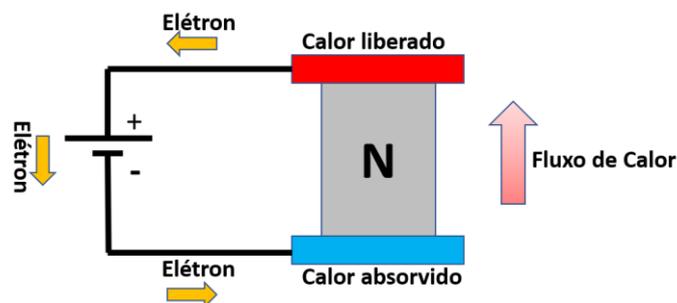
Uma desvantagem desse método, também observada em outros CIs e em métodos passivos, é a diminuição da luminosidade do LED. No caso do CI LM3464, a luminosidade atinge até 25% do valor nominal. Em algumas aplicações, essa alteração pode ser prejudicial para a manutenção do trabalho.

## 2.2 Célula de Peltier

Jean Charles Athanase Peltier, através de experimento, observou que, quando se aplica uma tensão em um circuito elétrico fechado formado por uma junção de condutores ou semicondutores distintos, um gradiente de temperatura é gerado. Esse efeito ficou conhecido como efeito Peltier.

O Físico Peltier observou que o efeito termoelétrico é maior em junções de materiais semicondutores do que em uma junção entre dois metais. Para efeito de explicação, pode-se considerar a célula Peltier simples composta por uma única pastilha de um semicondutor do tipo N. Na Figura 7, vê-se essa célula conectada a partir de fios a uma fonte de tensão contínua.

Figura 7 - Simples célula peltier do tipo N

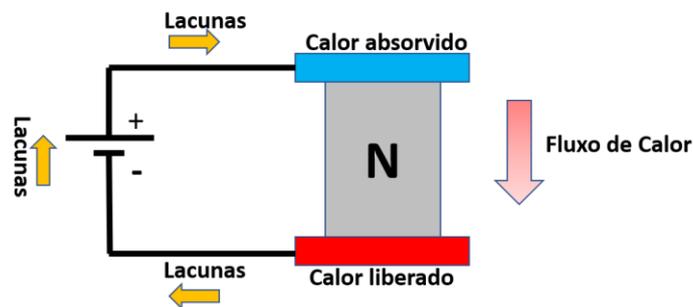


Fonte: (Adaptado de Maciel, 2014).

Como ilustrado na Figura 7, a temperatura é bombeada na mesma direção do fluxo de carga. Nos materiais semicondutores do tipo N, os elétrons são os portadores de cargas e, por consequência, são responsáveis pela transferência de temperatura. Quando uma fonte de tensão contínua é aplicada ao sistema, passa existir um fluxo de elétron partindo do terminal negativo para o positivo da fonte. Desta forma, o calor é absorvido na parte de baixo e transferido para a parte de cima da junção.

Ainda para efeitos de explicação, também podemos analisar o efeito Peltier em uma célula constituída de apenas uma pastilha de semicondutor tipo P. Nos materiais semicondutores, os portadores de cargas são positivos, conhecidos como lacunas. Desta forma, quando se aplica uma tensão contínua na estrutura, de acordo com o ilustrado na Figura 8, gera-se um fluxo de lacunas partindo do polo positivo para o polo negativo. Para simplificar a explicação, a Figura 8 ilustra o movimento das lacunas, porém, analisando fisicamente, quem se movimenta são os elétrons.

Figura 8 - Simples célula Peltier do tipo P

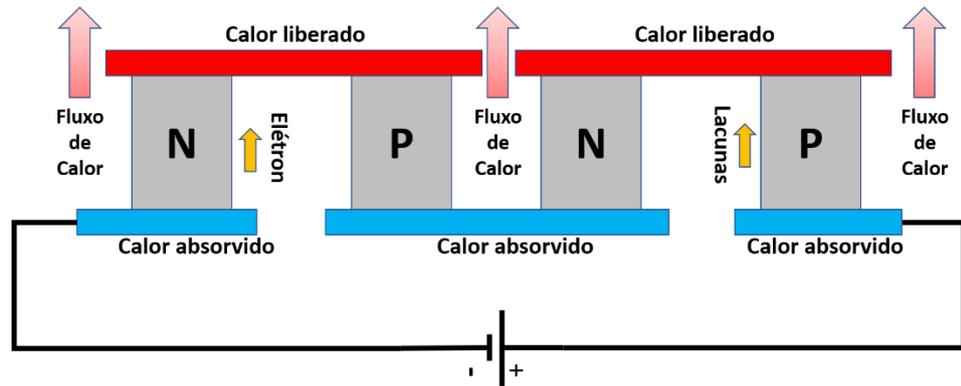


Fonte: (Adaptado de Maciel, 2014).

Nas pastilhas do tipo P, o calor é absorvido na parte superior e bombeado para a parte inferior da junção, ao contrário do que acontece com a célula tipo N, exemplificada anteriormente. O contraste da transferência de calor entre as células do tipo P e N é a base do funcionamento dos módulos Peltier comerciais.

Na prática, não é possível bombear uma quantidade satisfatória de calor utilizando apenas uma pastilha semicondutora. A fim de aumentar a capacidade de transferência de calor dos módulos Peltier, múltiplas pastilhas de materiais semicondutoras tipo P e N são utilizadas. A ligação de múltiplas pastilhas pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 - Célula Peltier formada por múltiplas pastilhas



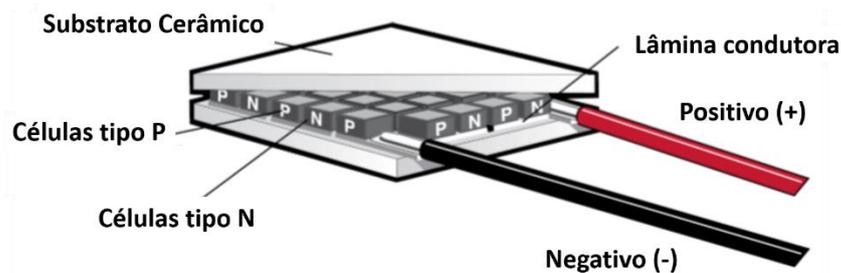
Fonte: (Adaptado de Maciel, 2014).

Agrupando pastilhas tipo P e N em pares, como ilustrado na Figura 9, e formando uma junção entre elas com uma lâmina de cobre, obtém-se um circuito capaz de manter o fluxo de calor de todas as pastilhas no mesmo sentido. Portanto, o fluxo de elétron que parte do terminal negativo para o positivo da fonte de tensão contínua atravessa a pastilha N, passa a lâmina de cobre e depois cruza a pastilha P.

Por serem usados dois tipos diferentes de material semiconductor, os portadores de carga e o fluxo térmico deslocam-se na mesma direção (de baixo para cima, de acordo com a Figura 9). Utilizando o método, é possível agrupar várias pastilhas em estruturas retangulares e criar módulos termoeletrônicos reais.

Na indústria, uma solução para montar dispositivos com múltiplas células é usar substratos cerâmicos, que ajudam a manter as placas mecanicamente juntas. Uma representação dos módulos Peltier pode ser vista na Figura 10. As faces externas da placa de cerâmica são utilizadas como interface térmica entre as pastilhas do conjunto e meio externo. O material cerâmico é utilizado pela indústria por proporcionar boas características mecânicas, alta isolamento elétrica e boa condutividade térmica. (VLACK, 1984)

Figura 10 - Módulo Peltier

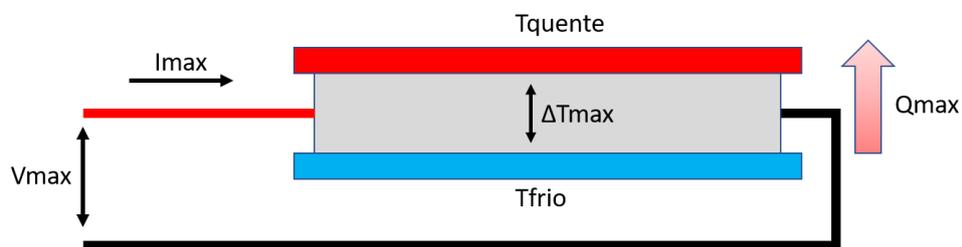


Fonte: (Adaptado de Maciel, 2014).

Com a configuração mostrada na seção anterior, a potência termoelétrica desses dispositivos passa a ser grande o suficiente de modo que eles sejam utilizados como coolers eletrônicos. A ausência de partes móveis e o tamanho reduzido são características que favorecem o uso dos módulos Peltier em aplicações de controle térmico.

Na Figura 11, vê-se a indicação de algumas das principais variáveis envolvidas em um sistema térmico com módulos Peltier. A compreensão física e prática dessas características permite uma seleção apropriada das células Peltier. Algumas dessas variáveis são características específicas do dispositivo utilizado e são encontradas nas suas folhas de dados.

Figura 11 - Principais variáveis envolvidas na célula Peltier



Fonte: (Do Autor, 2018).

A variável  $V_{max}$  indica a tensão contínua necessária para o dispositivo gerar a máxima diferença de temperatura possível entre as faces ( $\Delta T_{max}$ ), dado uma específica temperatura na face quente ( $T_{quente}$ ). Se a tensão de operação da célula for menor do que o  $V_{max}$ , não existirá corrente suficiente para alcançar o  $\Delta T_{max}$ . Por outro lado, se a tensão de operação for superior a  $V_{max}$ , a dissipação de calor da célula Peltier irá elevar a temperatura da face quente fazendo com que diminua o  $\Delta T$ .

Ao aplicar a  $V_{max}$  em uma célula Peltier, um nível de corrente será gerado; essa variável é chamada de  $I_{max}$ . Esse nível de corrente é o responsável por produzir o maior  $\Delta T$  possível na célula. Valores de corrente abaixo de  $I_{max}$  são insuficientes para se obter o  $\Delta T_{max}$ . Porém, no momento em que o valor da corrente ultrapassa  $I_{max}$ , as perdas elétricas do dispositivo aumentam e causam um decréscimo no  $\Delta T$ .

$Q_{max}$  é definido como a quantidade máxima de calor que o módulo Peltier pode retirar de um sistema. Na prática, quando a carga térmica do sistema aumenta, o  $\Delta T$  da célula Peltier diminui. Quando a carga térmica do sistema tiver o mesmo valor da  $Q_{max}$  do módulo Peltier, o  $\Delta T$  será reduzido para zero. Portanto, esse parâmetro torna-se o mais importante na hora da seleção da célula Peltier, pois ele define se o módulo escolhido consegue retirar calor da forma desejada.

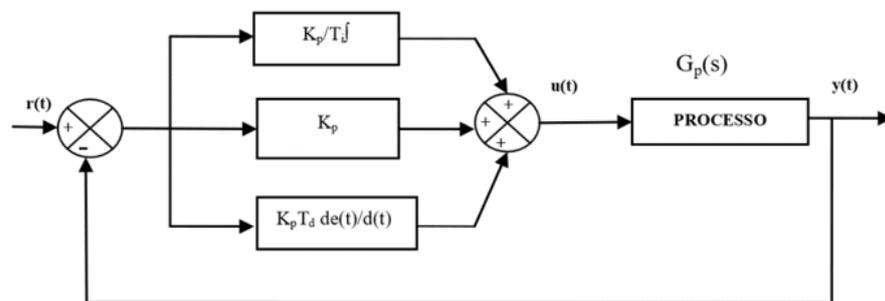
Em um sistema onde o módulo Peltier é utilizado para resfriar, faz-se necessária a dissipação do calor coletado em outro meio. Se essa providência não for tomada, a célula Peltier ficará vulnerável a sobreaquecimento, podendo até chegar à situação em que a temperatura de fusão da solda utilizada internamente é atingida, causando, assim, a destruição do módulo.

## 2.3 Controle digital

Um sistema de controle moderno foi definido por Murray *et al.* (2003) como um dispositivo onde uma variável medida é utilizada para alterar o comportamento do sistema por meio de cálculos e atuação. Atualmente, a realimentação é vista como uma ferramenta capaz de gerenciar incertezas, sejam elas paramétricas, de condições e limites práticos ou advindas de ruídos e perturbações (CARDOSO, 2012).

Uma das técnicas de controle mais utilizadas na indústria de processos é o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Ele pode ser implementado como um controlador analógico ou como parte de um sistema digital. Um diagrama em bloco do controlador PID é mostrado na Figura 12. No domínio do tempo tem-se:  $r(t)$  é o sinal de referência;  $e(t)$  é o sinal de erro;  $u(t)$  o sinal de controle;  $y(t)$  a do sistema.

Figura 12 - Diagrama em bloco controlador PID



Fonte: (Cardoso, 2012).

O controle em malha fechada exemplificado na figura é feito da seguinte forma: quando o erro é positivo, o sinal de controle aumenta e, assim, a resposta tende a crescer para alcançar a referência. Quando a resposta  $y(t)$  é maior que o valor de referência de  $r(t)$ , o erro  $e(t)$  fica negativo, diminuindo o sinal de controle e, conseqüentemente, o sinal de saída. Esse tipo de controle é chamado de realimentação negativa, porque a resposta é subtraída da referência. (OGATA, 2003)

O modelo matemático de um controlador PID é dado por:

$$y(t) = K_c(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{\partial e(t)}{\partial t}) \quad (1)$$

Onde:

$y(t)$ : sinal de saída do controlador;

$e(t)$ : sinal de erro do controlador;

$K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$ : parâmetros de ajuste do controlador, os quais representam os termos proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

O termo P do sinal de controle é proporcional ao erro de controle, de modo que reaja aos desvios em relação ao ponto de ajuste. A saída do controlador devido ao termo P é dada por:

$$u_p(t) = K e(t) + u_0 \quad (2)$$

Em que:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Apenas com o controlador do tipo P não é possível reduzir o erro de controle a zero, já que a parcela  $e(t) = 0$  levaria o sinal de controle para zero. Para evitar que a saída de controle se torne nula, adiciona-se o termo  $u_0$  na equação. O termo P do controlador é sensível a ruído uma vez que o ganho proporcional  $K$  é multiplicado diretamente pela medida. Portanto, a sensibilidade ao ruído e à velocidade do sistema em malha fechada aumenta com a elevação da constante  $K$  e, por consequência, a robustez do sistema diminui (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2000).

O termo I integra valores passados do erro de controle, e, portanto, removerá o erro estático devido à variação na carga e a alterações no ponto de ajuste. O termo P produz a seguinte expressão de saída:

$$u_i(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

Onde:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

O ganho integral,  $K_i$ , é a fração formada pelo ganho proporcional e o tempo integral,  $T_i$ . Segundo Åström e Hägglund (2000), um aumento de  $K_i$  leva a um sistema de malha fechada mais rápido, porém menos robusto. Por outro lado, o fato de haver um somatório dos erros de controle passados torna o termo I menos sensível a ruídos.

Ao contrário do termo I, a parte derivativa (termo D) do controlador PID é responsável por prever o comportamento futuro da variável controlada. A expressão de saída gerada pelo termo D é:

$$u_d(t) = KT_d \frac{de_d(t)}{dt} = k_d \frac{de_d(t)}{dt} \quad (4)$$

Em que:

$$e_d(t) = r(t) - y(t)$$

Assim como o ganho integral, o ganho derivativo,  $K_d$ , também depende de  $K$  e uma variável que representa o tempo derivativo ( $T_d$ ). A robustez de um sistema está diretamente ligada ao aumento do  $T_d$ : quanto maior o tempo derivativo maior é a robustez. Por outro lado, a performance do sistema diminui com valores de  $T_d$  elevados.

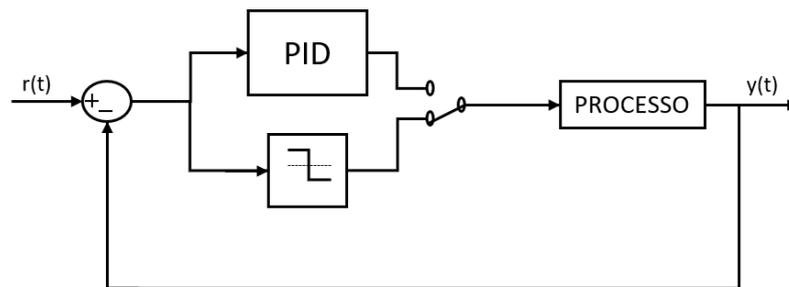
Portanto, segundo Åström e Hägglund (2000), para obter um sistema com uma boa performance, imune a ruídos e a alterações no ponto de operação, é necessário balancear os termos do controlador PID. Para definir os valores desses três parâmetros, pode-se seguir dois caminhos: obter o modelo matemático da planta a ser controlada, de forma a definir os parâmetros para uma condição específica, ou realizar um processo de sintonia capaz de fornecer valores aproximados que satisfaçam as condições de operação.

Realizar a modelagem matemática de um processo pode não ser uma tarefa simples em alguns casos. Na prática, após os cálculos, ainda é preciso que se realize um processo de ajuste por parte do operador, o que causa perda de tempo. Por isso, técnicas de autossintonia estão sendo cada vez mais estudadas, ao ponto de quase todo controlador PID industrial possuir essa função embutida (CHENG, 2006)

Ziegler e Nichols (1942) desenvolveram uma técnica de sintonizar controladores PID a partir do ganho e do período crítico de sistemas em malha fechada. Baseados nessa técnica, Åström e Hägglund (1984) apresentaram uma técnica de sintonia automática baseada no funcionamento de um relé realimentado.

O grande avanço apresentado na técnica do relé realimentado foi a possibilidade da detecção do ponto crítico (período e ganho crítico) por intermédio de um ensaio realizado em malha fechada onde, ao contrário do método de Ziegler e Nichols, não se faz necessário atingir os limites da estabilidade. A estrutura fundamental do método de sintonia automática utilizando o relé realimentado é apresentada na Figura 13

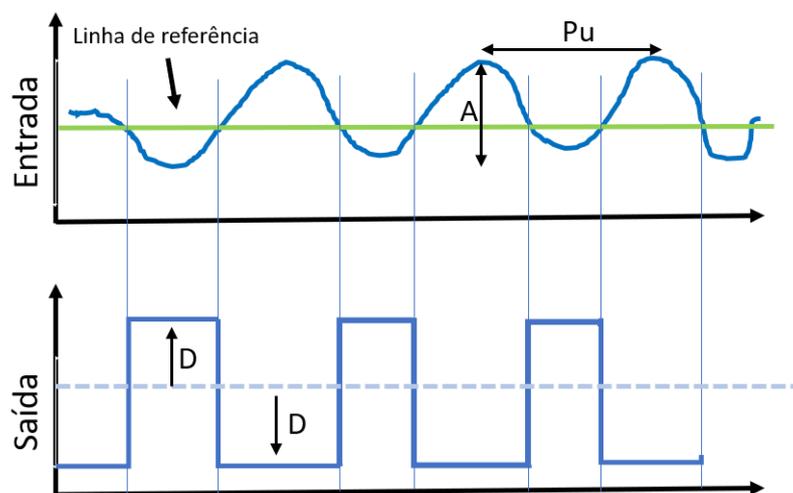
Figura 13 - Diagrama em bloco do método Relé



Fonte: (Do Autor, 2018).

Durante o ensaio, o controlador é desabilitado da malha e a entrada do processo é conectada a saída do relé. Na Figura 14, é possível observar como o método funciona. Observa-se que a partir de um estado constante do sinal de entrada e saída, a saída é acionada em uma direção por um valor  $D$  abaixo da referência. Quando a entrada cruza uma linha de disparo, a saída é alterada de direção até um valor  $D$  acima da referência.

Figura 14 - Funcionamento do método relé realimentado



Fonte: (Do Autor, 2018).

Esse método gera no sinal de saída uma oscilação sustentada de amplitude  $A$  e período  $P_u$ . A partir desses dois valores e da amplitude da onda quadrada gerada pelo relé (determinada

pelo programador), é possível se determinar os parâmetros críticos do processo, ganho crítico ( $K_u$ ) e frequência crítica ( $\omega_u$ ), a partir da equação:

$$K_u = \frac{4D}{\pi A} \quad (5)$$

Onde:

$$\omega_u = \frac{2\pi}{P_u}$$

Os valores obtidos para o ganho e a frequência crítica serão específicos para a planta na qual o processo de sintonia foi realizado. Os parâmetros do controlador PID (ou PI, dependendo da aplicação) podem ser calculados através das expressões apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Cálculo dos parâmetros do controlador

Controlador	Kp	Ki	Kd
PI	0.4*Ku	0.48*Ku/Pu	0
PID	0.6*Ku	1.2*Ku/Pu	0.075*Ku*Pu

Fonte: (Adaptado de Åström e Hägglund, 2000).

A técnica do relé realimentado proposta por Åström e Hägglund foi uma das primeiras metodologias implementadas em equipamentos industriais e seu sucesso deve-se à simplicidade e robustez (Cardoso, 2002). Segundo Jonson e Moradi (2005), outra característica relevante desta técnica é o fato de ser um método com realimentação; a variável de processo é mantida perto do valor de referência, permitindo que, durante a sintonia, o processo opere próximo ao ponto de operação estável.

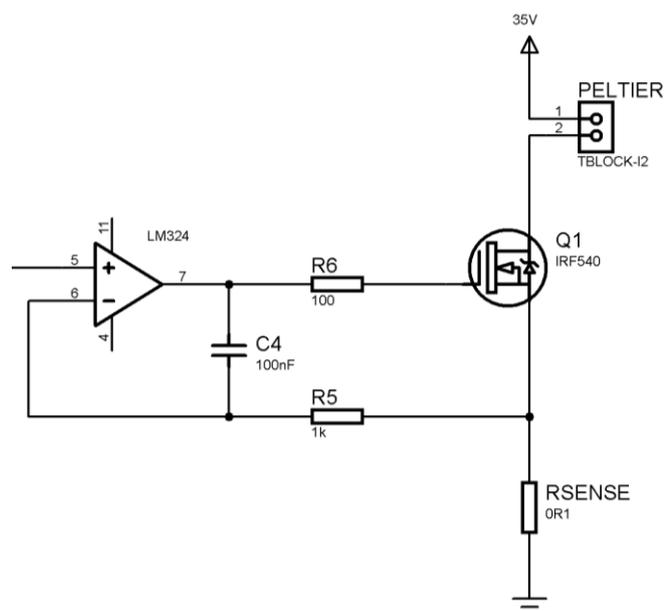
### 3 MÉTODO PROPOSTO PARA GERENCIAMENTO TÉRMICO DE LEDS DE ALTA POTÊNCIA

Na seção anterior, apresentaram-se os métodos de gerenciamento térmico de LED mais utilizados atualmente. Porém, observou-se que a maioria dos métodos apresentava uma desvantagem em comum: a luminosidade do LED era alterada devido à diminuição no valor da corrente. Um outro ponto negativo encontrado, principalmente nos métodos passivos, é o fato de a estrutura de dissipação ser calculada para um determinado ponto de operação do LED.

Para lidar com esses problemas, este trabalho propõe realizar o gerenciamento térmico utilizando uma célula de Peltier. A célula Peltier foi utilizada para retirar o calor do LED sem ter a necessidade de diminuir a corrente que passa por ele, dessa forma a luminosidade não se altera. Para que esse sistema mantenha uma temperatura máxima do LED independente das condições externas, utilizou-se um sistema em malha fechada com um controlador PID.

Para realizar o controle da célula Peltier, decidiu-se utilizar uma fonte de corrente constante controlada por tensão. A topologia escolhida, ilustrada na Figura 15, utiliza um amplificador operacional e um Mosfet tipo N. Por causa da utilização do amplificador operacional com uma realimentação negativa, esse circuito elimina a necessidade da utilização de um microcontrolador para garantir, através de algum método de controle, o valor fixo de corrente na carga.

Figura 15 -Fonte de corrente controlada por tensão



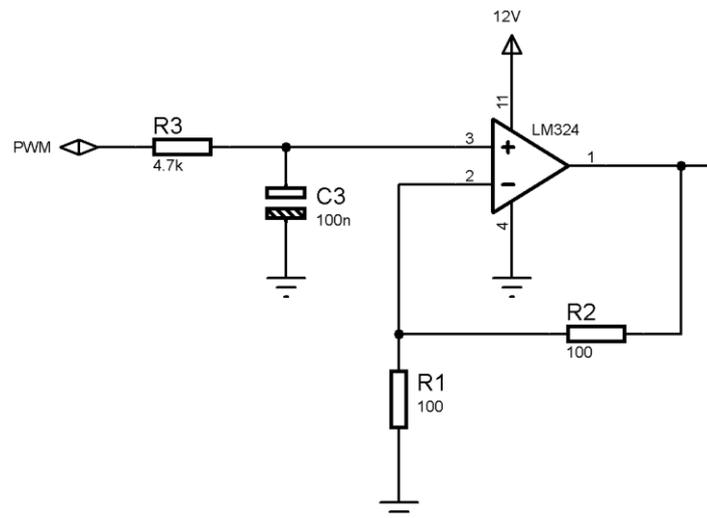
Fonte: (Do Autor, 2018).

Considerando a Figura 15, ao aplicar uma tensão contínua na entrada não inversora do amplificador operacional, ele fará com que o Mosfet imponha uma tensão sobre o resistor  $R_{sense}$ , de forma que, através da realimentação negativa, a entrada negativa possua o mesmo valor da entrada positiva. Com isso, o valor da corrente drenada pelo Mosfet, que é a mesma que passa pela célula Peltier, pode ser calculado dividindo a tensão aplicada no amplificador pelo valor da resistência  $R_{sense}$ .

O sinal de tensão de controle da fonte de corrente foi obtido através de um sinal PWM gerado por um microcontrolador. Um filtro passa-baixa foi utilizado para obter apenas o valor de tensão contínua do sinal PWM. O filtro foi projetado para uma frequência de corte menor do que 1 Hertz; tendo em vista que a frequência do PWM é bem superior a esse nível, o valor contínuo da tensão possui um valor de ondulação que não afeta o sistema de controle.

O filtro passa-baixa utilizado causa uma atenuação no nível de tensão contínua do sinal PWM; dependendo do  $R_{sense}$  utilizado, a tensão resultante não é o suficiente para gerar o valor de tensão requerido. Por esse motivo, utilizou-se um amplificador não inversor, com um ganho controlado por um potenciômetro, para amplificar o valor de tensão aplicado à fonte de corrente. Na Figura 16, observa-se o circuito do amplificador não-inversor e do filtro passa-baixa.

Figura 16 - Filtro passa-baixa e amplificador não-inversor

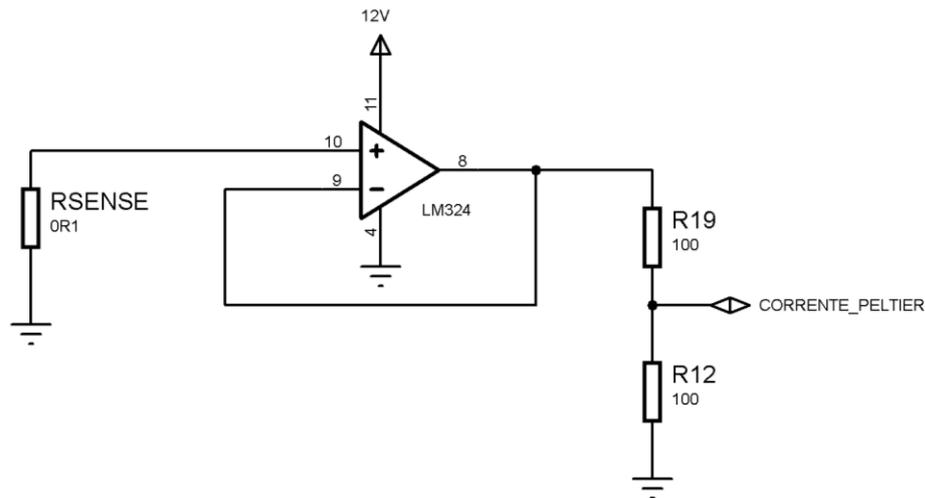


Fonte: (Do Autor, 2018).

Apenas para fins de monitoramento e geração de gráficos, utilizou-se uma entrada analógica do microcontrolador para medir o valor da tensão aplicada no resistor  $R_{sense}$ . Como o valor da resistência é conhecido, é possível calcular o valor da corrente da célula Peltier. Esta ligação, ilustrada na Figura 17, foi realizada através de um seguidor de tensão, pois é necessário

um divisor resistivo para condicionar o valor de tensão medido à faixa de valores suportados pelo microcontrolador. O divisor resistivo alteraria o funcionamento da fonte de corrente se fosse ligado diretamente.

Figura 17 -Circuito para monitorar corrente



Fonte: (Do Autor, 2018).

Utilizou-se, no projeto, o microcontrolador Attiny841, produzido pela Microchip®, que possui canais analógicos e temporizadores de 8 bits. Os temporizadores desse microcontrolador podem ser definidos de três formas; utilizou-se o modo *Fast-PWM* no qual é possível gerar um sinal PWM de até 42 KHz se estiver sendo usado um cristal externo de 11 MHz.

Utilizou-se uma entrada analógica do microcontrolador para realizar a medição da tensão sobre o resistor R<sub>sense</sub>. Essa entrada analógica é conectada internamente a um ADC (*Analog to Digital Converter* – Conversor analógico digital) de 10 bits. O tempo de conversão do ADC não é um parâmetro crítico nessa aplicação, pois a leitura realizada tinha apenas caráter informativo e não contribuía diretamente com o sistema de controle.

Até agora, falou-se apenas do circuito do atuador e da variável manipulada do sistema de controle, para realizar a medição da variável de processo, no caso a temperatura sobre o LED, utilizou-se um termopar tipo K. Para realizar a compensação da junta fria e condicionar o valor da temperatura para ser lido no microcontrolador, empregou-se o CI MAX6675. A medição da temperatura foi realizada com um termopar pelo fato de esses dispositivos suportarem temperaturas acima de 120 °C, temperatura máxima que um LED pode atingir.

O CI MAX6675 é capaz de digitalizar o sinal de termopares com uma resolução de 12 bits e transmitir os dados via interface de comunicação serial. Para realizar a leitura dos dados da temperatura, implementou-se uma rotina no microcontrolador capaz de ler uma sequência

de 16 bits de acordo com a folha de dados do CI. Os bits da posição 14 até a 3 registram a informação da temperatura digitalizada, os outros 4 bits são para sincronismo e identificação de erro.

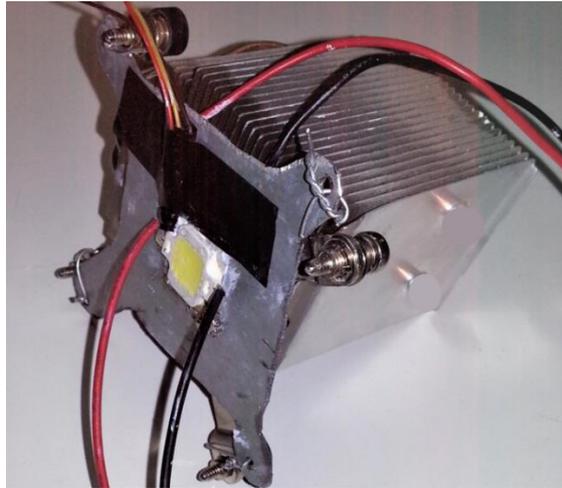
O controlador PID foi implementado no microcontrolador utilizando como base a equação 3. O controlador possui como entrada as medidas do CI MAX6675, que correspondem à temperatura do LED que está sendo controlado. Esse valor é comparado com a temperatura de referência na rotina do PID que, após realizar os cálculos utilizando os ganhos definidos previamente, gera um valor de saída que controla o ciclo de trabalho do sinal PWM.

Para efeitos práticos, algumas alterações foram realizadas no algoritmo base do PID. Por exemplo, como o erro integral vai sendo somado após cada leitura, ele pode gerar um valor na saída maior do que o realizável. Portanto, faz-se necessário o grampeamento dos valores da saída (ciclo de trabalho do sinal PWM) entre 0 e 100 % e o interrompimento da soma do erro integral assim que a saída ultrapassar esses limites.

Devido à complexidade do sistema, não se realizou uma modelagem da planta. Portanto, desenvolveu-se uma rotina de sintonia automática utilizando o método do relé realimentado. Para encontrar os valores dos parâmetros do controlador PID, desativou-se o controlador PID e acionou-se a rotina de sintonização. Foi preciso realizar ajustes do valor máximo e mínimo da saída do relé e definir o valor de temperatura para a de linha de disparo. Esses valores são configurados manualmente no início da rotina.

A estrutura utilizada nos testes pode ser observada na Figura 18. O LED utilizado foi retirado de um refletor comercial de 10W. O LED foi acoplado a uma chapa de alumínio para garantir um bom contato térmico com a célula de Peltier. A célula foi fixada na placa de alumínio com o auxílio de uma pasta térmica. Para retirar o calor da face quente do módulo de Peltier e fazer com que ele funcionasse da forma esperada, utilizou-se um bloco de dissipador térmico.

Figura 18 - Estrutura de testes



Fonte: (Do Autor, 2018).

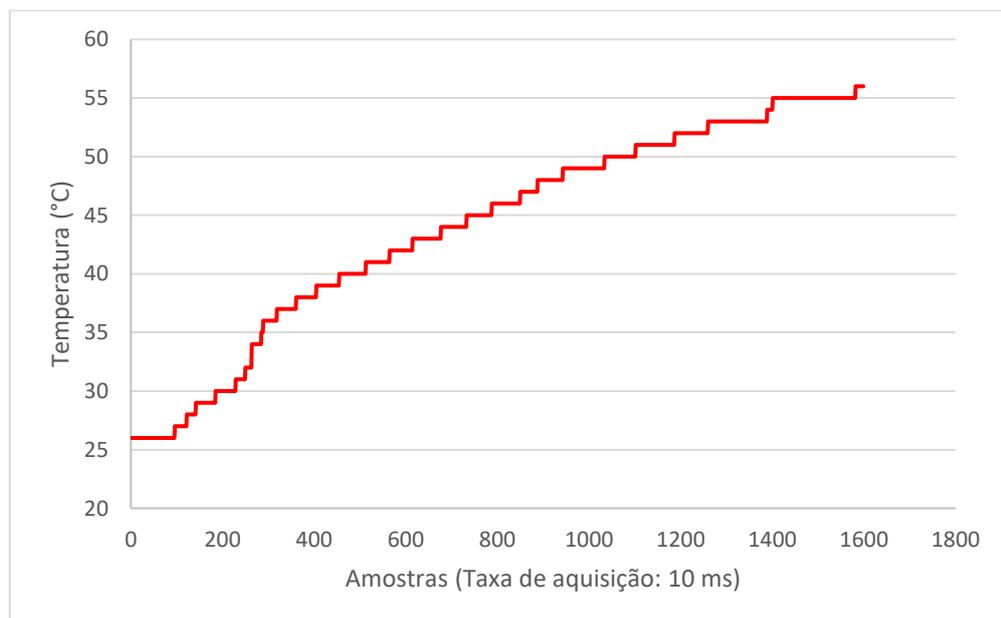
Para medir a temperatura do LED, que foi considerada, neste trabalho, como sendo a mesma temperatura da face fria, fixou-se o sensor na placa de alumínio de forma que o sensor ficasse próximo do LED. Os dados de temperatura e os valores de corrente do módulo Peltier e do Led foram lidos através do computador por uma comunicação RS485. Essa comunicação foi utilizada por facilidade na sua implementação e na aquisição dos componentes.

## 4 RESULTADOS

No primeiro momento dos testes, realizou-se a ligação do LED fora da estrutura, apenas apoiado na chapa de alumínio, para que houvesse o mínimo de dissipação térmica para o LED não queimar. Com isso, mediu-se o valor de tensão e corrente aplicados ao LED pelo *driver* fornecido pelo fabricante do refletor. Com um multímetro, verificou-se que o *driver* fornecia um valor de tensão de 50 V para o LED e uma corrente de 200mA, ou seja, 10W como especificado pelo fabricante.

Ainda, sem conectar o LED ao sistema, mediu-se a temperatura do LED para verificar qual era, naquelas condições mínimas de dissipação, o valor que o ponto de junção atingiria. O gráfico com a variação de temperatura ao longo do tempo pode ser observado na Figura 19. Nota-se que a temperatura do LED aumenta a partir do valor inicial de 26°C (temperatura ambiente) até atingir um estado permanente em 55°C.

Figura 19 - Curva de temperatura do LED sem gerenciamento térmico



Fonte: (Do Autor, 2018).

Portanto, ao ser energizado pelo *driver* do refletor, o LED opera com uma potência elétrica de 10W e atinge uma temperatura de junção de 55°C. Esses dois parâmetros são de grande importância para o sistema, pois determinam a quantidade de calor que a célula Peltier precisará retirar do sistema.

Para testar a capacidade da célula Peltier e do sistema de dissipação, o LED foi acoplado ao módulo Peltier e ligado na sua potência máxima. Em seguida, utilizou-se a placa eletrônica desenvolvida para variar a corrente da célula Peltier e medir a temperatura do LED. Com isso, obteve-se uma relação do ciclo de trabalho do sinal que controla a fonte de corrente do Peltier e da temperatura que o sistema conseguia atingir. Na Tabela 2 encontra-se um resumo das medidas realizadas. Nota-se, na primeira coluna, o ciclo de trabalho da fonte de corrente, na segunda coluna, a temperatura no LED e, na última, a corrente do módulo Peltier.

Tabela 2 - Valores de temperatura obtidos com o controle da corrente da célula Peltier

PWM (%)	Temp (°C)	Corrente (A)
10	55*	0.04
15	54	0.1
20	48	0.23
30	37	0.89
40	34	1.42
47	32	1.85
55	31	2.43
60	30	2.69
70	31	2.8
80	35	3.44
90	38	3.89
100	40	4.18

Fonte: (Do Autor, 2018).

Vê-se, na primeira linha da tabela, que a temperatura do LED continuou em 55°C, portanto, uma vez que não conseguem diminuir a temperatura, valores de PWM menor do que 10% não podem ser utilizados pelo controlador. Aumentando o valor do PWM, percebe-se que é possível atingir até 30°C, ou seja, o sistema consegue diminuir a temperatura do LED em 25°C. Porém, nota-se que ao continuar aumentando o PWM, a temperatura do LED volta a aumentar. Essa situação acontece pelo fato de a potência dissipada no Peltier começar a influenciar na face fria do módulo. Portanto, analisando a Tabela 2, verificou-se que os valores de PWM que o controlador poderia utilizar para atuar no módulo Peltier deveriam estar entre 10% e 60%.

Sabendo das limitações do sistema e do valor mínimo de temperatura que poderia ser atingido, iniciaram-se os testes com o controlador PID. Primeiro, como foi dito anteriormente, devido à dificuldade de realizar a modelagem matemática do processo, utilizou-se a rotina de autossintonia do controlador. Utilizou-se 35°C como valor da linha de referência e ajustou-se a saída para variar entre 10% e 60%. O resultado da autossintonia pode ser visto na Tabela 3.

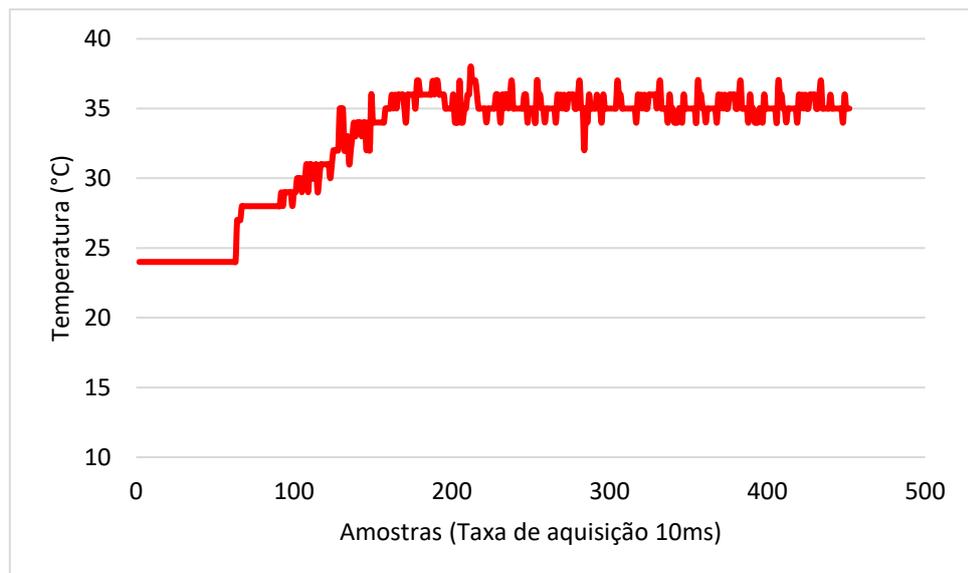
Tabela 3 - Parâmetros encontrados com a rotina de autossintonia

Parâmetros	Kp	Ki	Kd
Valores encontrados	6	1.93	4,65

Fonte: (Do Autor, 2018).

Depois da execução da rotina de autossintonia, os parâmetros foram configurados automaticamente na função do controlador PID, bastando apenas ser definido o valor de referência de temperatura para o controlador ser ativado. Sabendo que o sistema consegue manter um valor mínimo de temperatura de 30°C, configurou-se um valor superior para evitar que o sistema trabalhasse sempre no máximo e mascarasse o efeito do controlador. Isso posto, definiu-se a temperatura de referência para 35°C. O gráfico da atuação do controlador é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Atuação do controlador PID mantendo a temperatura de referência de 35°C



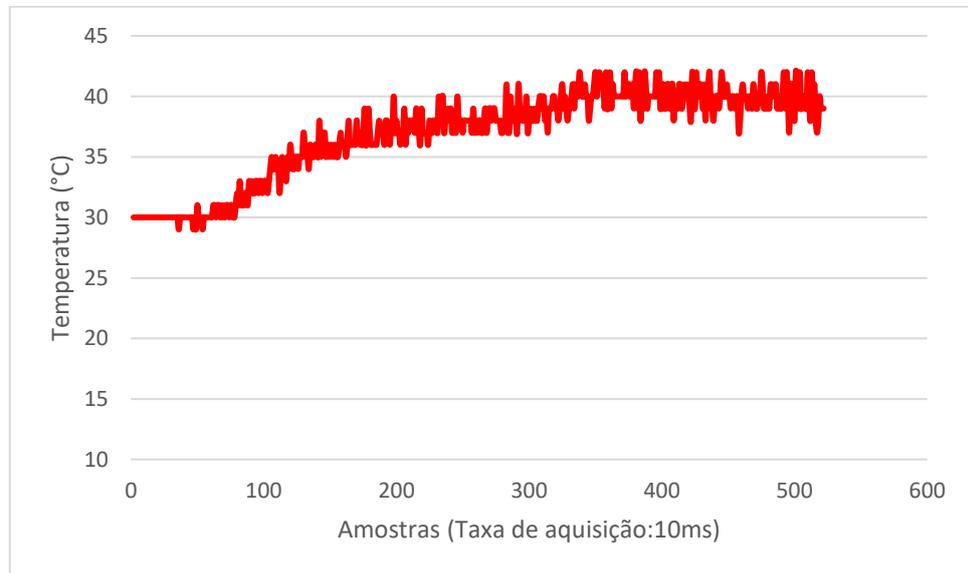
Fonte: (Do Autor, 2018).

Na Figura 20, percebe-se que o controlador funcionou como esperado, mantendo a temperatura do LED em 35°C. É possível perceber, no início da curva da temperatura, uma mudança brusca, essa alteração deve-se ao momento exato em que o LED é ligado. Como a temperatura de referência foi configurada para 35°C, o controlador não atua na célula Peltier até verificar que o erro (diferença entre a referência e o valor atual) começa a aumentar. Uma parte das oscilações vistas no gráfico é explicada pela presença de erros na leitura do sensor.

Para comprovar o funcionamento do PID, realizou-se um teste alterando o valor da referência de temperatura para 40°C. O resultado desse teste é ilustrado na Figura 21. Mais uma

vez, verificou-se que o controlador foi capaz de manter a temperatura do LED em torno do valor de referência.

Figura 21 - Atuação do controlador PID mantendo a temperatura de referência de 40°C



Fonte: (Do Autor, 2018).

Comparando o resultado dos testes com valores de referências diferentes, nota-se que a saída do sistema possui pouco ou nenhum sobrevalor e permanece no valor de referência sem grandes variações. Isso mostra que os parâmetros do controlador encontrados com o método de autossintonia são suficientes para o bom desempenho do sistema, sem a necessidade de realizar ajustes e tentativas manuais.

## 5 CONCLUSÃO

Uma temperatura elevada na junção de um LED pode diminuir sua vida útil em questões de milhares de horas. Existem alguns métodos utilizados para reduzir a temperatura de LEDs de alta potência, alguns conseguem se adequar a variações no ponto de operação do LED e outros só são capazes de trabalhar em condições pré-determinadas. O controle da corrente do LED é um dos métodos ativos mais utilizados.

Atualmente, existem circuitos integrados específicos para o gerenciamento térmico de LED. Através de pesquisa nos manuais dos fabricantes, percebeu-se que todos os circuitos realizavam o controle da temperatura do LED através da diminuição da corrente do LED. Esse método de gerenciamento implica em diminuição da luminosidade do LED, que, em algumas situações, pode trazer prejuízo à realização das atividades.

Com base nessas informações, foi proposto um método para gerenciamento térmico de LED utilizando células Peltier. Nesse método, a célula Peltier seria controlada através de uma fonte de corrente, de forma que o valor de temperatura do LED poderia ser controlado dependendo do quanto de corrente fosse aplicado no módulo Peltier. Dessa forma, o controle da temperatura não influenciaria na luminosidade do LED.

Percebeu-se que, sem o controle de temperatura, o LED utilizado atinge um valor de temperatura de 55°C. Apesar de ser um valor dentro do especificado pelos fabricantes, diminuir esse valor traz consequências vantajosas no tempo de vida útil do LED. Portanto, desenvolveu-se um circuito capaz de controlar a temperatura do LED utilizando um controlador digital PID.

Os parâmetros do controlador foram encontrados através de uma rotina de autossintonia utilizando o método do relé alimentado. Notou-se que o controlador autossintonizado, em conjunto com o circuito de controle desenvolvido e a montagem da estrutura com a célula Peltier, funcionou como esperado. Realizou-se teste onde o sistema conseguiu manter a temperatura do estável em 35°C, uma diferença de 20°C para quando o LED funciona sem o sistema.

O objetivo deste trabalho foi cumprido, pois pretendia-se criar um sistema capaz de controlar a temperatura de um LED sem alterar sua luminosidade. O circuito desenvolvido atendeu ao que se desejava: realizar o controle térmico de um LED de alta potência para que se possa aumentar a expectativa de vida útil.

## 6 REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K. J. E HÄGGLUND, T. **Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins**. Automatica, vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- ÅSTRÖM, K. J. E HÄGGLUND, T. **Advanced PID Control**. ISA- The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2000.
- BLUESPAN, M. Iluminação pública a LED, um novo conceito. **Energia Viva**, 2009. Disponível em: <[http://www.energiaviva.pt/pdf/dossier/iluminacao\\_publica\\_a\\_LED\\_um\\_novo\\_conceito.pdf](http://www.energiaviva.pt/pdf/dossier/iluminacao_publica_a_LED_um_novo_conceito.pdf)>. Acesso em: 25/05/2018
- BOTELHO, M.; FIGUEIREDO, M. A. **Instalações Elétricas Residenciais Básicas**. São Paulo, 2012.
- CABRAL, L. M. Coimbra primeira cidade no mundo com iluminação LED. **Diário de Notícias**, 2014. Disponível em: <<https://www.dn.pt/portugal/interior/coimbra-primeira-cidade-no-mundo-com-iluminacao-led-3653190.html>>. Acesso em: 25/05/2018
- CARDOSO, P. M. **Estudo, Proposta e Avaliação de Novas Metodologias de Sintonia Automática de Controladores PID Baseadas no Ensaio do Relê Realimentado**. Dissertação de Mestrado. Uberlândia, 2002.
- CHENG, C. Y. **Autotuning of PID Controllers: a Relay Feedback Approach**. 2nd ed, Springer-Verlag, London, 2006.
- CRAFORD, M. G. **Current State of the art in high brightness LEDs**. New York, 2007.
- HELD, G. **Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications**. New Orleans, 2008.
- HUI, S. Y.; QIN, Y. X. **A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems**. IEEE Transactions on Power Electronics. v. 16, n. 2, 2009
- JOHNSON, M. A. E MORADI, M. H. **PID Control - New Identification and Design Methods**. London, 2005.
- KITSINELIS, S. **Light Sources Technologies and Applications**. New York, 2011
- LUMILEDS. **Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems**. New York, 2016
- MACIEL, A. M. R. P. **Development and Control of a condensation system using Peltier Cells**. Dissertação de Mestrado. Lisboa, 2014
- MENEGHINI, M. **A Review on the Physical Mechanisms That Limit the Reliability of GaN-Based LEDs**. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010

MURRAY, R. M.; ÅSTRÖM, K. J.; BOYD, S.P.; BROCKETT, R.W. E STEIN, G. **Future Directions in Control in an Information-Rich World**. IEEE Control Systems Magazine, vol. 23, p 20-33, 2003

NARENDRAN, N; Gu, Y. **Life of LED-based white light sources**. IEEE/OSA Journal of Display Technology, 2005

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 2003.

PINTO, R. A. **Projeto e Implementação de Sistemas de Iluminação Para Interiores Empregando LEDs de Alta Intensidade**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2008

SALES, R. P. **LED, O Novo Paradigma da Iluminação Pública** – Dissertação de mestrado. Curitiba, 2011

SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. Cambridge, 2003.

SU, Y. -F; YANG, S. -Y.; CHI, W.-H.; CHIANG, K.-N. **Light Degradation Prediction of High-power Light-emitting Diode Lighting Modules**. 11th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and MicroSystems. Eindhoven, 2010.

VLACK, V. L. H. **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Campus, 1984.

Ziegler, J. G. e Nichols, N. B. **Optimum settings for automatic controllers**. Trans. ASME, vol. 64, pp 759-768, 1942.

ŽUKAUSKAS, A. **Introduction to Solid-State Lighting**. Chicago, 2002.