

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AUGUSTO CAMARGO ROSSI

**Sistema de Controle da Iluminação  
Ambiente**

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Raphael Martins Brum  
Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Paz Loayza  
Hidalgo

Porto Alegre  
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Prof<sup>ª</sup>. Patrícia Helena Lucas Pranke

Pró-Reitora de Graduação: Prof. Cíntia Inês Boll

Diretor da Escola de Engenharia: Prof<sup>ª</sup>. Carla Schwengber ten Caten

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica: Prof. Raphael Martins Brum

Bibliotecária-chefe da Escola de Engenharia: Rosane Beatriz Allegretti Borges

*“Tornamos nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e pela  
profundidade de nossas respostas.”*

— CARL SAGAN

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, irmão e demais familiares por todo apoio e carinho. Aos meus amigos e colegas pelo incentivo durante meu curso. Ao meu orientador por todo seu empenho no auxílio deste projeto. Sou grato também aos meus supervisores, em ambos os estágio e bolsa de pesquisa, por todo conhecimento e experiência que adquiri.

## RESUMO

A iluminação artificial tem sido objeto de estudo em razão de seus efeitos na biologia humana. Com o aumento da urbanização, ocorreu um aumento da exposição luminosa à qual os seres humanos estão submetidos. Tal acréscimo pode resultar em um enfraquecimento na sincronização dos relógios interno e externo do ser humanos, podendo acarretar efeitos adversos à saúde. Visando à redução de tais efeitos, criou-se um sistema que controla a iluminação artificial, cuja composição e intensidade variam ao longo do dia. O sistema utiliza o método VRFT para a sintonia dos controladores, assim permitindo a sua utilização sem restrições de configuração. Ao utilizar comunicação sem fio através do método MQTT, o sistema torna-se de fácil instalação e utilização. O sistema apresenta tempo de acomodação de até 2,5 segundos para referências individuais, 3 segundos para referências idênticas e 5 segundos para referências distintas em diversas configurações de disposição e número de sensores. Rejeição perturbações para as diversas referências em até 2 segundos.

**Palavras-chave:** Controle de iluminação. Relógio circadiano. Controle baseado em dados. IoT. VRFT. RTOS.

## **Ambient Lighting Control System**

### **ABSTRACT**

Artificial lighting has been the subject of study because of its effects on human biology. With the increase in urbanization, there has been an increase in light exposure to which human beings are subjected. Such an increase can result in a weakening in the synchronization of human internal and external clocks, which can lead to adverse health effects. Aiming at reducing such effects, a system was created to control artificial lighting, whose composition and intensity vary throughout the day. The system uses the VRFT method for tuning the controllers, thus allowing their use without configuration restrictions. By using wireless communication via the MQTT method, the system becomes easy to install and use. The system has a settling time of up to 2.5 seconds for individual references, 3 seconds for identical references and 5 seconds for different references in different arrangement configurations and number of sensors. Rejection disturbances for the various references in up to 2 seconds.

**Keywords:** Illumination control, Circadian cycle, Data-driven control, IoT, VRFT, RTOS.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
VRFT	<i>Virtual Reference Feedback Tuning</i>
MQTT	<i>Message Queue Telemetry</i>
IoT	<i>Internet of things</i>
SNC	Núcleo supraciasmático
LAN	Luz à noite
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
ipRGCs	Células ganglionares retinais intrinsecamente fotorreceptivas
IRC	Índice de reprodução de cor
SISO	Single Input Single Output
LTI	Linear e invariante no tempo
M2M	Comunicação máquina à máquina
QoS	Qualidade do serviço
RTOS	Real-Time Operating System
FIFO	<i>First In First Out</i>
ISRs	Rotinas de serviço de interrupção
ADC	Conversores analógico digital
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Espectro lâmpada LED utilizando excitação na faixa do azul .....	16
Figura 2.2	Espectro lâmpadas incandescente, fluorescente e fluorescente compacta respectivamente.....	17
Figura 2.3	Espectro da luz do sol no amanhecer, meio dia e entardecer respectivamente	18
Figura 2.4	Olho humano e retina .....	19
Figura 2.5	Funções de eficiência luminosa espectral.....	19
Figura 2.6	Tipos de visão pela luminância.....	20
Figura 2.7	Resposta Cones e Bastonetes.....	21
Figura 2.8	Esquema do circuito retinal (A) e resposta dos fotopigmentos presentes na retina (B) .....	22
Figura 2.9	Funcionamento PWM.....	25
Figura 2.10	Risco de danos a saúde pela frequência do Flicker e sua variação entre máximo e mínimo em por cento .....	26
Figura 2.11	Exemplo da tabela da norma brasileira de iluminação ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 .....	28
Figura 2.12	Sistema malha fechada .....	31
Figura 2.13	Sistema utilizado no método VRFT .....	31
Figura 2.14	Padrão de execução e preempção de uma Tarefa.....	35
Figura 2.15	Máquina de estados de uma tarefa.....	36
Figura 3.1	Diagrama de blocos do sistema .....	39
Figura 3.2	Responsividade do sensor TCS3472-5 .....	40
Figura 3.3	Diagrama de blocos do sensor TCS 3472-5 .....	41
Figura 3.4	Pinagem do sensor TCS3472-5 .....	42
Figura 3.5	Resposta angular do sensor TCS3472-5.....	43
Figura 3.6	Máquina de estados do sensor TCS3472-5.....	44
Figura 3.7	Descrição do experimento realizado para a determinação do intervalo entre aquisições.....	45
Figura 3.8	LED fixados na estrutura .....	46
Figura 3.9	Arquitetura do PWM do ESP-32WROOM .....	46
Figura 3.10	Iluminação solar ao longo de um dia.....	50
Figura 3.11	Padrão de iluminação proposto.....	51
Figura 3.12	Histograma do atraso entre envio e recebimento de uma mensagem .....	55
Figura 3.13	Histograma do atraso entre o recebimento de 2 mensagens .....	56
Figura 3.14	Histograma do maior atraso entre o recebimento de 3 mensagens.....	56
Figura 4.1	Conexões do sistema completo.....	59
Figura 4.2	Fluxo simplificado do sistema .....	60
Figura 4.3	Fluxo da função <code>main()</code> do Controlador/Atuador .....	62
Figura 4.4	Fluxo da tarefa de publicação MQTT do controlador .....	63
Figura 4.5	Fluxo da tarefa de referencia do controlador .....	64
Figura 4.6	Fluxo da tarefa de controle do controlador.....	65
Figura 4.7	Fluxo da função <code>main()</code> do sensor.....	66
Figura 4.9	Fluxo da tarefa TCS34725.....	66
Figura 4.8	Fluxo da tarefa de publicação MQTT do sensor .....	67
Figura 4.10	Fluxo de funcionamento do Sintonizador.....	68
Figura 4.11	Fluxo temporal do sistema com dois sensores.....	69
Figura 4.12	Resposta ao controle individual no canal Vermelho.....	70

Figura 4.13 Resposta ao controle individual no canal Verde .....	71
Figura 4.14 Resposta ao controle individual no canal Azul.....	72
Figura 4.15 Resposta a um salto com as três referências iguais .....	73
Figura 4.16 Análise de rejeição de ruído com as três referências iguais .....	73
Figura 4.17 Rejeição a uma perturbação com as três referências diferentes .....	73
Figura 4.18 Resposta a um salto com as três referências diferentes .....	74
Figura A.1 Diagrama de Cromaticidade com locus planckiano .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Características do ADC do sensor TCS3472-5 .....	43
Tabela 3.2	Relação da média das contagens e intervalo entre aquisições.....	45
Tabela 3.3	Resolução PWM ESP-32WROOM .....	47
Tabela 3.4	Relação entre o <i>Duty cycle</i> idêntico em todos os canais e as contagens .....	48
Tabela 3.5	Relação entre <i>Duty cycle</i> Vermelho e contagens .....	48
Tabela 3.6	Relação entre <i>Duty cycle</i> Verde e contagens .....	49
Tabela 3.7	Relação entre <i>Duty cycle</i> Azul e contagens.....	49
Tabela 3.8	Especificações obtidas no capítulo .....	58
Tabela 4.1	Resposta do sensor TCS3472-5 a iluminações específicas .....	74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 A iluminação artificial e a influencia no relógio circadiano</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 Iluminação natural e artificial</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3 Visão humana</b> .....	<b>18</b>
2.3.1 Foto-receptores do olho humano .....	20
2.3.2 Cones e a visão colorida .....	21
2.3.3 Movimentos do olhos .....	23
<b>2.4 Iluminação artificial e percepção humana</b> .....	<b>24</b>
2.4.1 Iluminação artificial LED e suas consequências.....	24
<b>2.5 Grandezas associadas à iluminação</b> .....	<b>27</b>
<b>2.6 Norma brasileira de iluminação</b> .....	<b>28</b>
2.6.1 Iluminância média.....	28
2.6.2 Índice de reprodução de cor .....	29
<b>2.7 Controle baseado em dados</b> .....	<b>29</b>
<b>2.8 Protocolo de comunicação sem fio</b> .....	<b>33</b>
<b>2.9 Sistema operacional embarcado</b> .....	<b>34</b>
<b>2.10 Produtos relacionados</b> .....	<b>37</b>
<b>2.11 Observações finais</b> .....	<b>37</b>
<b>3 METODOLOGIA E ENSAIOS DOS MÓDULOS</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1 Sensor</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2 Atuador</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3 Perfil de iluminação de Referência</b> .....	<b>49</b>
<b>3.4 Controlador</b> .....	<b>51</b>
<b>3.5 Comunicação</b> .....	<b>52</b>
<b>3.6 Síntese das especificações</b> .....	<b>57</b>
<b>4 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
<b>4.1 Implementação do sistema</b> .....	<b>60</b>
4.1.1 Controlador/Atuador .....	61
4.1.2 Sensores .....	64
4.1.3 Sintonizador .....	67
4.1.4 Fluxo temporal do sistema .....	68
<b>4.2 Resultados</b> .....	<b>69</b>
<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A — TEMPERATURA DE COR</b> .....	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O ser humano evoluiu sob a influência da iluminação natural para conseguir prever as oscilações ambientais e realizar as alterações sistêmicas de adaptação às mudanças do meio. Tal característica evolutiva não é exclusiva dos seres humanos, de forma que os mais diversos organismos vivos também possuem um relógio biológico interno. (ROENNEBERG; MERROW, 2016)

O fenômeno ambiental mais eficaz para a sincronização do nosso ritmo interno ao externo é o ciclo luminoso, em específico as alterações de claro e escuro. Com o aumento da urbanização em todo o mundo, houve um acréscimo da iluminação artificial à qual os seres humanos estão submetidos, além da manutenção de iluminação constante ao longo de todo o dia. Essas mudanças acarretaram redução no período do ciclo escuro e, por consequência, diminuição da sincronia entre o relógio biológicos e o externo (STEVENS, 2009). O desalinhamento do relógio biológico pode resultar em diversos efeitos adversos na saúde humana, como, em casos extremos, os trabalhadores noturnos, que apresentam maiores riscos de desenvolver câncer. (STRAIF et al., 2007)

Visando reduzir os efeitos nocivos da iluminação artificial, o presente trabalho tem por objetivo a implementação de um sistema que controla a iluminação artificial do ambiente, garantindo uma variação de intensidade e coloração compatíveis com as variações observadas em ambientes iluminados naturalmente. Utiliza-se como referência, portanto, a iluminação natural adaptada à norma brasileira de iluminação de interiores (ABNT NBR ISO/CIE 8995-1). São utilizados sensores espalhados pelo ambiente e uma fonte luminosa composta de três diodos emissores de luz (*Light Emitting Diode* - LED), que se comunicam através de comunicação sem fio. Para se atingir esse objetivo, espera-se que o sistema apresente as seguintes características:

- que seja possível a utilização, das partes responsáveis pela mensuração e atuação de forma independente;
- que funcione com diferentes números de sensores;
- que independa da disposição dos sensores no ambiente para o funcionamento;
- que permita o ajuste dos valores mínimos e máximos de iluminância, a fim de regular a iluminação, com base na normas, para o ambiente desejado;
- que obtenha novos parâmetros do controle caso erro persista, devido a alguma modificação da planta.

Essa monografia está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) são apresentados os conceitos necessários para o entendimento do sistema. No Capítulo 3 (Metodologia e Ensaio dos Módulos) são descritos os métodos utilizados para solucionar o problema, os experimentos realizados e os resultados obtidos visando validar as partes do sistema. No Capítulo 4 (Implementação e Resultados) é descrita a implementação de forma detalhada do sistema como um todo e suas partes. São ainda apresentados os resultados do funcionamento do sistema, dando ênfase nas respostas do controle a diversas excitações e condições. No Capítulo 5 (Conclusões e Trabalhos Futuros) analisa-se os objetivos propostos e atingidos, e sugere-se modificações visando a melhorias no projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O propósito deste capítulo é introduzir os conceitos necessários para o entendimento do sistema e embasamento de determinadas escolhas realizadas ao longo do projeto. Inicialmente, serão apresentados os conceitos biológicos de ciclo circadiano e luz à noite, que servem de motivação para a criação do sistema. Na sequência, passaremos para uma breve análise do funcionamento do olho humano: sua responsividade (quais frequências representam determinada cor e a intensidade da respostas para tais frequências); e seus movimentos, principais responsáveis pelo tempo de amostragem ocular.

Após a introdução de tais conceitos biológicos, será feita uma comparação das iluminações artificiais e natural, ressaltando seus espectros. Visando ao bom entendimento de um sistema luminotécnico, serão desenvolvidos os conceitos referentes ao Sistema Internacional de Unidades (SI) e uma breve análise da norma brasileira de iluminação (ABNT NBR ISO/CIE 8995-1).

Para controlar um sistema com parâmetros variáveis, como disposição e quantidade dos sensores, necessita-se de um método que permita um ajuste dos controladores através de experimentos na planta. Uma técnica comumente empregada para esse propósito é a técnica do controle baseado em dados (*Data Driven Control*). Será feita uma breve introdução do protocolo de comunicação *Message Queue Telemetry* (MQTT), o qual é extremamente popular na internet das coisas (IoT) e permite uma comunicação máquina a máquina leve e de fácil implementação. Também serão introduzidos os conceitos de sistema operacional embarcado. Na sequência serão abordados produtos comerciais relacionados ao projeto. Finalizando com uma recapitulação dos pontos mais importantes apresentados durante o capítulo.

### 2.1 A iluminação artificial e a influencia no relógio circadiano

O relógio circadiano é um sistema temporal encontrado em organismos de todos os filos e consiste de uma adaptação à rotação da Terra, conferindo uma estrutura de 24 horas a processos em todos os níveis, da expressão do gene ao comportamento. Os relógios circadianos são autônomos, produzindo ritmos de cerca de 24 horas, mesmo na ausência de sinais ambientais diários (*zeitgebers*). A capacidade de gerar ritmos diários é uma qualidade celular. Esses relógios celulares formam redes que constroem o ciclo circadiano nos tecidos, órgãos e em todo o organismo. A organização de cima para baixo

em mamíferos está enraizada em um núcleo localizado acima do quiasma óptico, o núcleo supraciasmático (SCN). Esse marcapasso recebe informações fóticas pela retina, sincroniza seus próprios relógios celulares neuronais e traduz o “dia interno” para uma rede de relógios periféricos. (ROENNEBERG; MERROW, 2016)

Na natureza, os relógios normalmente sincronizam com o seu mundo de 24 horas, portanto, não se descompassam e nem correm livres. A combinação de viver em ambientes fechados e iluminação noturna enfraquece substancialmente a amplitude do *zeitgeber*. O descompasso do relógio circadiano foi verificado pela primeira vez como um fator em várias doenças, através de estudos epidemiológicos, mostrando aumento da incidência de câncer em trabalhadores de turno noturno. A hipótese da luz à noite (LAN) colocou o hormônio melatonina no centro do processo de doenças cancerígenas. Argumenta que a melatonina, além de ser um hormônio, é um dos principais limpadores das espécies reativas de oxigênio. Como a melatonina é principalmente produzido à noite e suprimido pela luz, a hipótese alega que a oncogênese se torna mais provável quando as pessoas são expostas à luz, à noite. O viver contra o relógio circadiano associa-se a muitas patologias não relacionadas à melatonina e sugere etiologias adicionais que relacionam câncer e turno de trabalho. (ROENNEBERG; MERROW, 2016)

A relação entre o relógio circadiano e a saúde humana envolve uma rede altamente complexa de influências e fatores de confusão. Por exemplo, défices de saúde podem surgir tanto da privação do sono quanto do desalinhamento circadiano, que geralmente ocorrem simultaneamente em trabalhadores de turno alternado (*shift workers*).

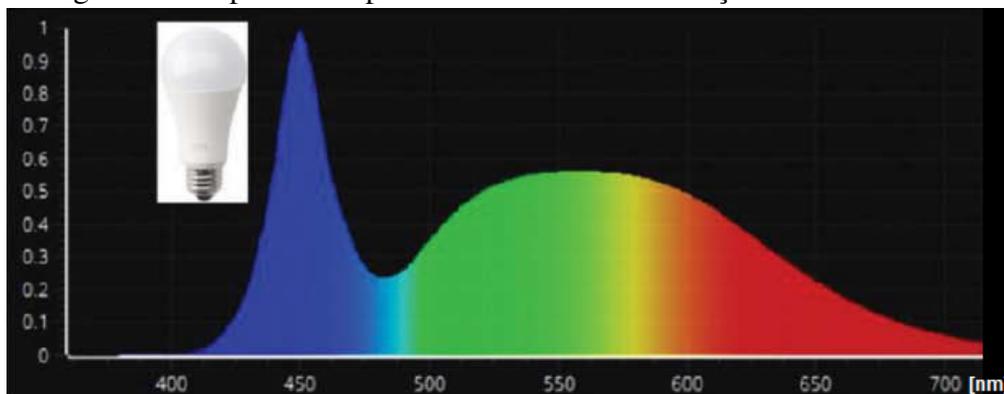
## 2.2 Iluminação natural e artificial

O aumento da urbanização em todo o mundo exigiu uma transformação mais eficiente da energia elétrica em iluminação e trouxe uma nova situação, conhecida como luz à noite e agora é considerada “poluição luminosa” e até “toxicidade luminosa”. Os seres humanos evoluíram por muitos milhões de anos na Terra com um ciclo diário confiável de 12 horas de luz brilhante de espectro total e 12 horas de escuridão (variando com a estação e a latitude). Embora os seres humanos tenham descoberto o fogo há 250.000 anos e começaram a usar velas há 5.000 anos, foi apenas desde o advento da iluminação elétrica há 130 anos que a maioria das pessoas começou a ter o período escuro drasticamente diminuído. A luz elétrica prolongou o período iluminado em casa até a noite para atividades sociais, trabalho e recreação. No entanto, é cada vez mais reconhecido

que também pode haver efeitos adversos na saúde humana, e que o uso indiscriminado de iluminação pode ser prejudicial (STEVENS, 2009). Conforme exemplo no artigo Straif et al. (2007) verifica-se os efeitos da exposição à LAN em enfermeiros que trabalham em turnos alternados e suas consequências negativas à saúde, como aumento dos cânceres de mama e de próstata.

A substituição das fontes tradicionais de iluminação, como lâmpadas incandescentes e fluorescentes, por LED (Light Emitting Diode), resultaria em uma redução de cerca de 270 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano. (PERINO; PIOCH, 2017). No entanto, os riscos potenciais dessas novas fontes de luz precisam ser explorados. Atualmente, existem duas tecnologias para a geração de luz branca usando LED. Uma é obtida através da utilização de três diodos emissores de luz (vermelho, verde e azul). A outra consiste na utilização de diodo emitindo um comprimento de onda curto (faixa do azul ou em casos mais antigos na faixa do ultra-violeta), que, então, excita um ou mais átomos de fósforos presentes no corpo do semicondutor dopado, produzindo uma onda que se espalha pelo espectro do visível, como pode ser observado na Figura 2.1.

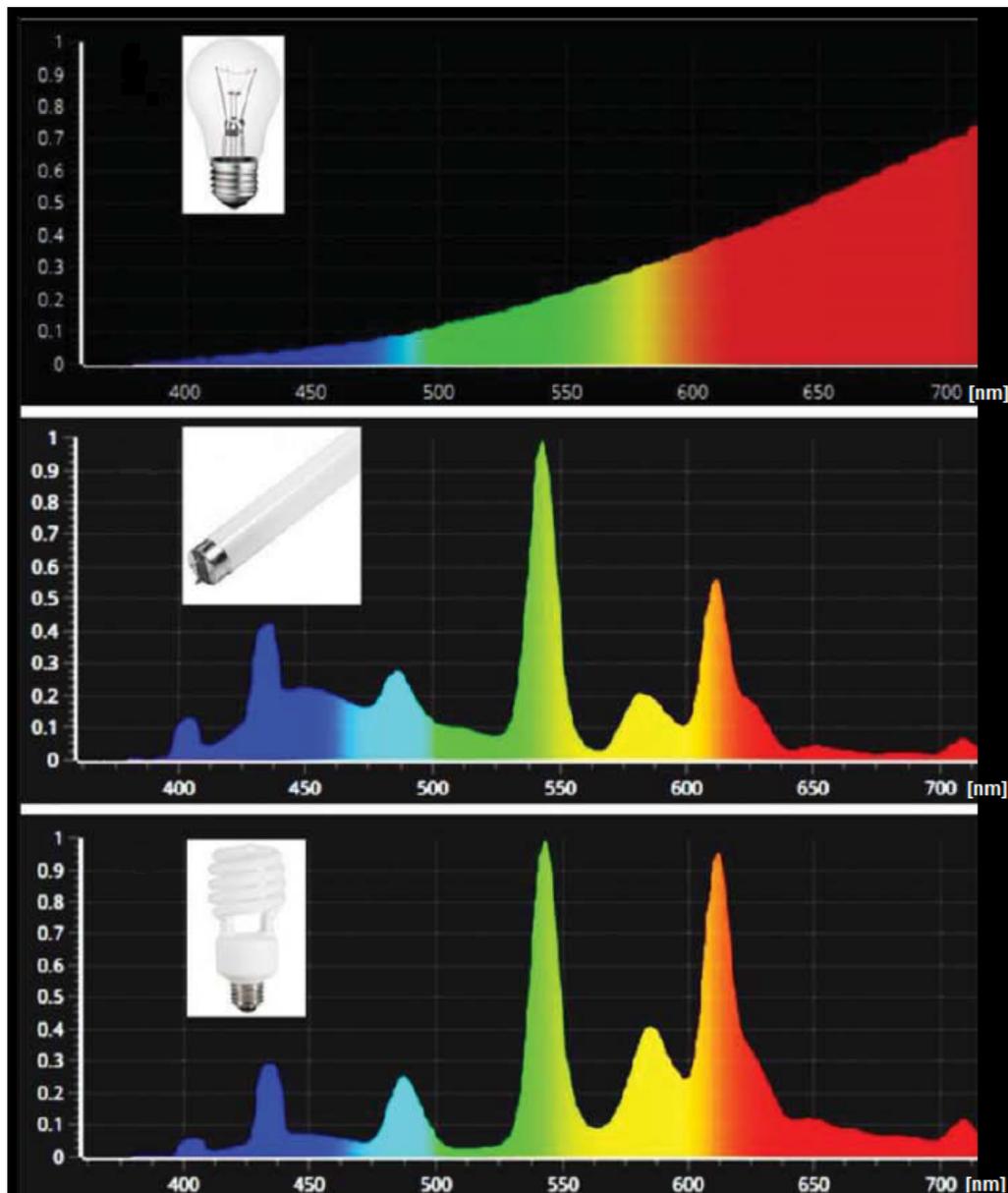
Figura 2.1: Espectro lâmpada LED utilizando excitação na faixa do azul



Fonte: Abdel-Rahman et al. (2017)

Ao comparar os espectros de tais fontes tradicionais presentes na Figura 2.2, com o da LED, que utiliza emissor na faixa do azul, ficam claras as grandes diferenças entre elas, principalmente a presença de um pico na frequência do azul (450 nm). No artigo Abdel-Rahman et al. (2017), são analisados os efeitos da iluminação LED em *Caenorhabditis elegans*, uma espécie de nematódeo da família *Rhabditidae*, na qual é observado uma série de complicações decorrentes das iluminações com o componente no espectro do azul elevado, indicando que a presença deste componente na luz LED branca pode causar problemas de saúde.

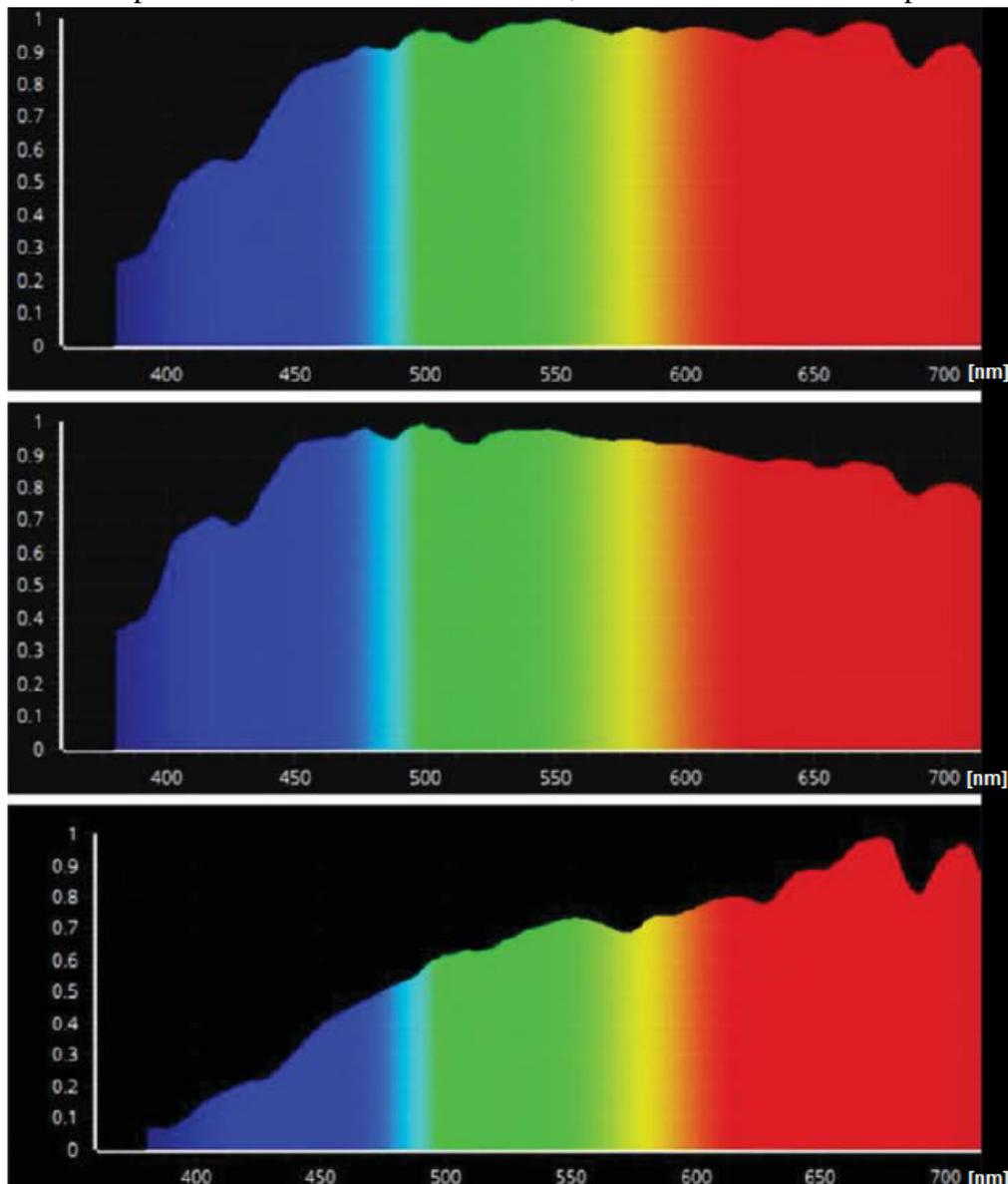
Figura 2.2: Espectro lâmpadas incandescente, fluorescente e fluorescente compacta respectivamente



Fonte: Abdel-Rahman et al. (2017)

Observando a Figura 2.3, espectro da luz solar normalizado, percebe-se a variação da luz solar ao longo do dia. No amanhecer, obtêm-se valores de 0,8 na componente do azul (450 nm), 0,9 na componente do verde (550 nm) e 0,9 na componente do vermelho (700 nm). No meio-dia, ocorre valores de 0,9 na componente do azul, 0,95 na componente do verde e 0,7 na componente do vermelho. Já no anoitecer, as medidas são aproximadamente 0,35 na componente do azul, 0,7 na componente do verde e 0,9 na componente do vermelho. Como se pode verificar por tais medidas, a luz solar possui espectro bastante variável ao longo do dia, sendo modificada pela estação, latitude e clima.

Figura 2.3: Espectro da luz do sol no amanhecer, meio dia e entardecer respectivamente



Fonte: Abdel-Rahman et al. (2017)

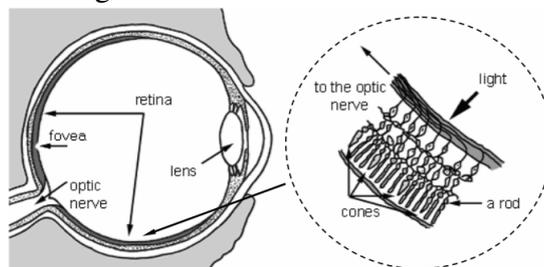
### 2.3 Visão humana

Na visão humana a absorção da luz ocorre pelos foto-receptores, pela propriedade chamada de actinismo. As radiações capazes de causar tais alterações são conhecidas pelo nome de radiações actínicas. Em função do efeito da radiação óptica sobre os receptores químicos ou biológicos correspondentes (foto-receptores), é possível definir grandezas fotoquímicas ou fotobiológicas específicas.

Os órgãos responsáveis pela visão são os bulbos do olho, popularmente chamados

de olhos. Nos bulbos do olho, em específico na retina, há células sensoriais especializadas na captação de estímulos luminosos cones e bastonetes (foto-receptores), conforme visto na figura 2.4. (AMABIS; MARTHO, 2006)

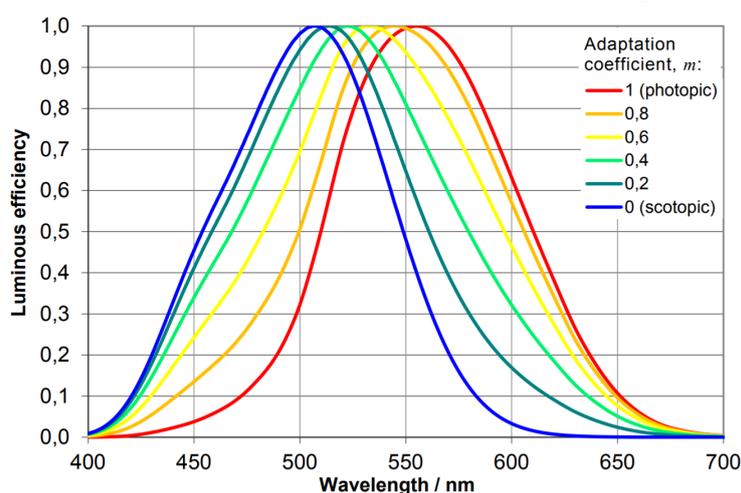
Figura 2.4: Olho humano e retina



Fonte: AMS AG (2016)

Quantidades fotométricas, fotoquímicas ou fotobiológicas estão relacionadas a quantidades radiométricas, quantidades puramente físicas, por meio de funções de ponderação espectral, acordadas internacionalmente, definidas pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) como funções de eficiência luminosa espectral (Figura 2.5). Estas funções são baseadas na resposta dos cones e bastonetes, e o coeficiente  $m$ , indicado na figura, refere-se ao tipo de visão. Tais conceitos serão abordados nas próximas seções. As unidades fotométricas são utilizadas estritamente para efeitos visuais e para os demais efeitos são indicados a utilização das unidades radiométricas. (OHNO et al., 2020)

Figura 2.5: Funções de eficiência luminosa espectral



Fonte: Goodman et al. (2016)

Enquanto as unidades radiométricas são definidas independentemente de qualquer função de eficiência luminosa, as quantidades fotométricas incluem a descrição, variando com a intensidade luminosa do ambiente, podendo ser fotópico, mesópico, escotópico. Caso não haja nenhuma descrição na unidade, supõe-se que a quantidade seja para visão

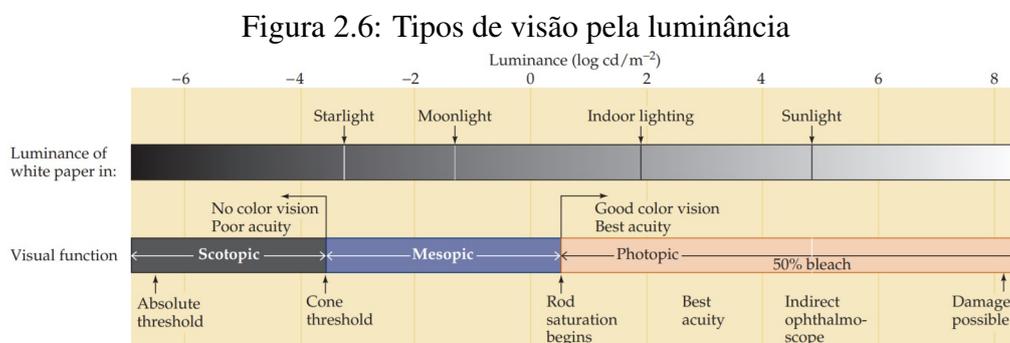
fotópica. As funções de eficiência luminosa são definidas como uma função do comprimento de onda no ar comum (ar seco a 15 °C e 101 325 Pa, contendo 0,03% em volume de dióxido de carbono). (OHNO et al., 2020)

### 2.3.1 Foto-receptores do olho humano

No olho humano existem dois tipos de foto-receptores responsáveis pela visão, cones e bastonetes, especializados em diferentes aspectos. Ambos são responsáveis pela transformação de fótons em informação. O sistema de bastonetes tem baixa resolução espacial, mas é extremamente sensível à luz. Já os cones são especializados em precisão espacial, com relativa baixa sensibilidade. As propriedades dos cones também permitem que os humanos e alguns animais vejam cores. (PURVES et al., 2008)

Em níveis baixos de luminância <sup>1</sup> (valores inferiores a  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup>), somente os bastonetes estão ativos, essa percepção é chamada de visão escotópica, como se demonstra na figura 2.6. A dificuldade de fazer pequenas discriminações sobre baixa iluminação, quando só estão ativos os bastonetes, é uma ocorrência comum. (PURVES et al., 2008)

À medida que a luminância aumenta, os cones se tornam mais e mais dominantes, sendo os maiores responsáveis pela visão em casos como iluminação de interiores e iluminação do sol. A contribuição dos bastonetes decai quase totalmente na visão fotópica (luminância superior a 10 cd/m<sup>2</sup>), uma vez que sua resposta satura. A visão mesópica (valores entre  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup> e  $10^1$  cd/m<sup>2</sup>) ocorre em níveis de iluminação em que cones e bastonetes estão ativos, como no caso do anoitecer. (PURVES et al., 2008) (OHNO et al., 2020)



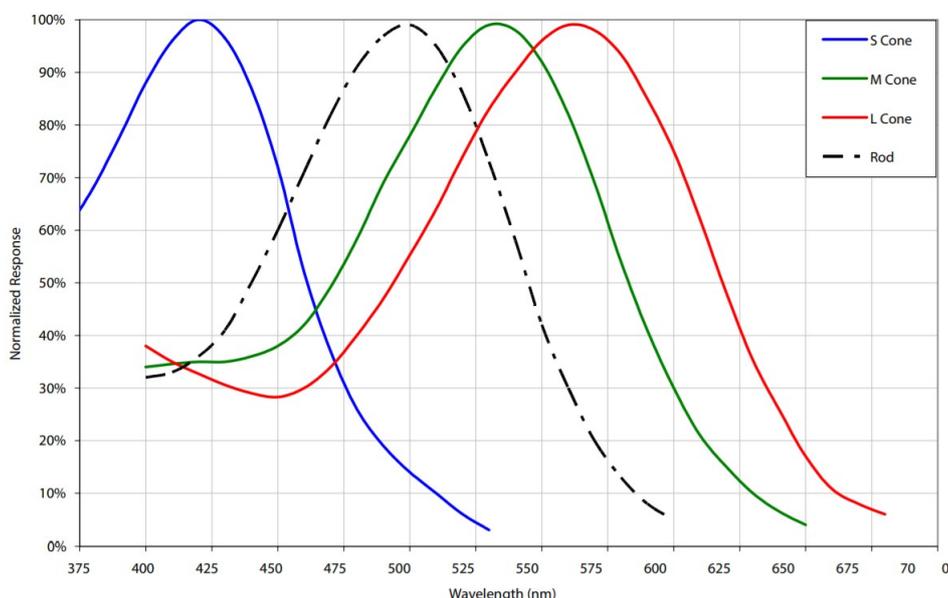
Fonte: Purves et al. (2008)

<sup>1</sup>Para o conceito de luminância ver Seção 2.5

### 2.3.2 Cones e a visão colorida

Os bastonetes possuem somente um tipo de fotopigmento. Os cones, por outro lado, diferenciam-se em três tipos. Cada fotopigmento possui uma sensibilidade a comprimentos de onda diferentes, e por essa razão os cones são referidos como “vermelho”, “verde” e “azul”, ou de forma mais apropriada, grande (L), médio (M) e pequeno (S) comprimentos de onda. Haja vista que suas respostas não são únicas em determinados comprimentos de onda, ocorrendo inclusive sobreposições entre a resposta dos três cones, a Figura 2.7 representa a responsividade dos três cones e do bastonete aos comprimentos de onda definidos como luz visível. (PURVES et al., 2008)

Figura 2.7: Resposta Cones e Bastonetes



Fonte: AMS AG (2016)

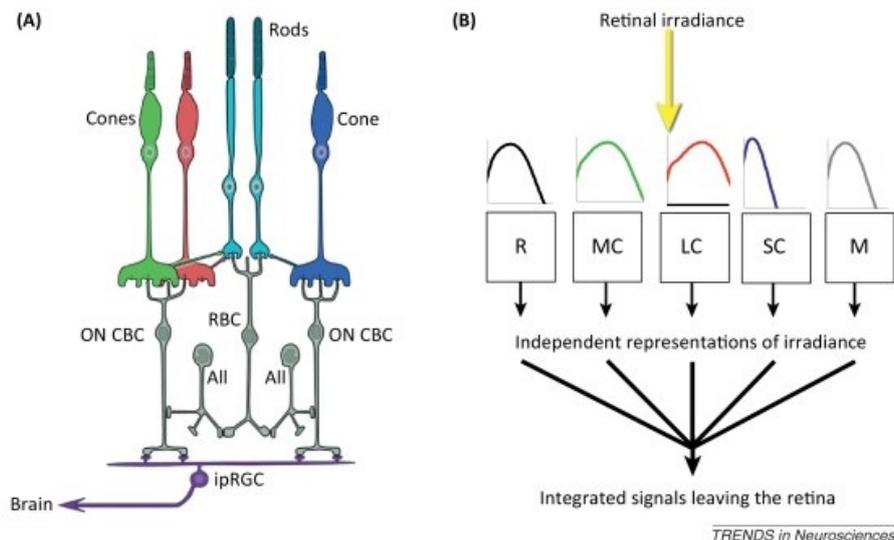
Apesar de parecer natural os três cones serem distribuídos em mesmo número, o cone S representa somente de 5 a 10% dos cones na retina, e não está presente no centro da fóvea, uma pequena depressão na retina na qual a resolução visual é mais alta. O centro do campo de visão está focado nessa região, onde os cones da retina estão particularmente concentrados. (PURVES et al., 2008)

Durante as últimas três décadas, evidências empíricas demonstraram que muitos aspectos da fisiologia e do comportamento humanos são influenciados pela iluminação retinal. Essas respostas se originam no olho, mas são separadas de outros aspectos da visão, na medida em que não estão relacionadas a padrões espaciais específicos de exposição à luz e podem estar presentes até mesmo em alguns indivíduos cegos. Tal resposta ocorre

através de uma pequena fração dos neurônios de saída da retina (células ganglionares retinais intrinsecamente fotorreceptivas - ipRGCs), por meio da expressão de melanopsina, um fotopigmento de opsina. A fotorrecepção da ipRGCs tem papel fundamental em funções dependentes da luz que não formadoras de imagem (isto é, não visuais), como o reajuste de fase induzido pela luz dos relógios circadianos endógenos e a respostas da pupila à luz. (ZELE et al., 2018)

A fotorrecepção de melanopsina é muito menos sensível do que a de bastonetes ou cones, estando envolvida apenas em irradiância moderada a alta. O padrão de disparo do ipRGC, contudo, é um sinal composto e integrado que consiste na resposta intrínseca à luz (fotorrecepção de melanopsina) e sinais de entrada acionados por haste e cone, conforme pode ser observado na Figura 2.8, item B. A Figura 2.8 é dividida em dois itens. O item A indica o circuito retinal incluindo o ipRGCs e o item B indica, de forma simplificada, o acionamento dos fotopigmentos presentes na retina, em que R indica a opsina do bastonete, M da melanopsina, SC indica a opsina do cone S, MC indica opsina do cone M, e LC indica opsina do cone L. As ipRGCs ainda possuem a capacidade para sinalizar cores e integrar luzes que mudam lentamente, sinalizando a necessidade de modelo tetracromático para visões periféricas. Contudo, a teoria tricromática descreve satisfatoriamente a visão fotópica em cores na retina central. A sensibilidade espectral da melanopsina, o fotopigmento de ipRGCs, é igualmente invariável entre as espécies, com  $\lambda_{max}$  de aproximadamente 480 nm. (LUCAS et al., 2014)

Figura 2.8: Esquema do circuito retinal (A) e resposta dos fotopigmentos presentes na retina (B)



Fonte: Lucas et al. (2014)

### 2.3.3 Movimentos do olhos

A visão é um processo ativo, no qual os movimentos oculares geralmente mudam várias vezes por segundo para partes selecionadas da cena examinando características especialmente interessantes. (PURVES et al., 2008)

Existem cinco tipos básicos de movimentos oculares: movimentos sacádicos, suaves de busca, de vergência, vestibulo-oculares e optocinéticos. Os três primeiros servem para mudar a direção do olhar quando novos alvos são atingidos ou movidos, e os outros dois servem para estabilizar o olhar quando a cabeça se move ou quando há movimentos em larga escala do campo visual.

Os movimentos sacádicos são movimentos rápidos e balísticos dos olhos que mudam abruptamente a direção da fixação. Eles variam em amplitude, desde os pequenos movimentos feitos durante a leitura, até os movimentos muito maiores, feitos enquanto olhamos ao redor de uma sala. Podem ser obtidos voluntariamente, mas ocorrem reflexivamente sempre que os olhos estão abertos, mesmo quando fixados em um alvo. O movimento demora cerca de 200 ms para iniciar. Durante esse atraso, a posição do alvo em relação à fóvea é calculada, e a diferença entre a posição inicial e a pretendida é convertida em um comando motor que ativa os músculos extra-oculares para que movam os olhos a distância correta na direção apropriada. Diz-se que este movimento é balístico, porque o sistema gerador geralmente não responde a alterações subsequentes na posição do alvo durante o curso do movimento ocular. Se o alvo se mover novamente durante esse período (da ordem de 15 a 100 ms), ocorre um erro na obtenção do alvo e um segundo movimento deverá ser feito para corrigir o erro.

Os movimentos suaves de busca são movimentos de rastreamento, projetados para manter o estímulo em movimento na fóvea. Eles estão sob controle voluntário, no sentido de que o observador pode escolher se deve ou não rastrear um estímulo em movimento.

Os movimentos de vergência (*Vergence*) alinham a fóvea de cada olho com o alvo a diferentes distâncias do observador. Embora os movimentos de vergência sejam necessários para rastrear um alvo visual que possa estar se aproximando ou se afastando, eles são comumente empregados ao deslocar o olhar, por exemplo, de um objeto mais distante para um mais próximo.

Os movimentos vestibulo-oculares e os movimentos optocinéticos operam juntos para estabilizar os olhos em relação ao mundo externo, compensando assim os movimentos da cabeça. Essas respostas reflexivas impedem que as imagens visuais “escorreguem”

na superfície da retina.

## 2.4 Iluminação artificial e percepção humana

Cerca de 20% da eletricidade consumida no mundo é gasta em iluminação residencial e pública (JUNIOR et al., 2012). Atualmente, há uma grande demanda pela eficiência da iluminação artificial. Existem lâmpadas incandescentes, fluorescentes e LEDs no mercado. As incandescentes têm uma eficiência luminosa em torno de 8 a 20 lm/W (COSTA et al., 2009b), e apenas 8% da energia consumida por elas é transformada em luz visível, sendo o restante irradiado como calor. As fluorescentes têm uma eficiência próxima a 100 lm/W (COSTA et al., 2009b) e as de vapor de sódio de alta pressão (HPS), atualmente usadas em iluminação pública, fornecem eficiência luminosa de 140 lm/W (GROOT; VLIET, 1986).

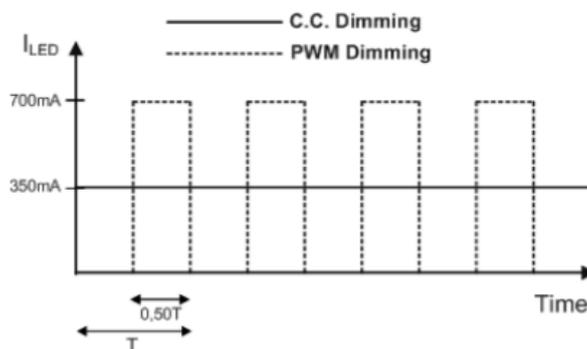
Os LEDs possuem longa vida útil, atingindo 100.000 horas (GARCIA et al., 2009), tamanho reduzido da lâmpada, eficiência de 90 lm/W (COSTA et al., 2009a), baixo custo de manutenção, uma vez que não há gás ou filamento para emitir luz.

### 2.4.1 Iluminação artificial LED e suas consequências

O controle da intensidade da iluminação artificial é conhecido como *Dimming* (escurecimento). Dimmers são dispositivos utilizados para controlar a potência em uma carga, tanto como gradadores (regulando a tensão na carga), como controlando a corrente na carga. Comercialmente, existem diversos métodos de *Dimming*. Dentre eles, em especial para os LED, há o PWM (Pulse Width Modulation), que consiste em aplicar uma corrente pulsada, modificando o período em que a corrente está ativa em relação ao período total e assim controlando a corrente eficaz. Também existem métodos que regulam diretamente o valor da corrente que passa pelo LED (fonte de corrente), referido na figura como C.C. *Dimming*. A comparação entre esses métodos pode ser visto abaixo, na Figura 2.9. (GARCIA et al., 2009)

Muitas luzes de LED utilizam o método de PWM para controlar a intensidade, logo, acendem e apagam em frequências entre 200 e 500 Hz, o que é rápido demais para notar quando não está em movimento sacádico. Quando, nesse movimento, as imagens das luzes do LED podem aparecer em diferentes posições na retina, fazem com que uma

Figura 2.9: Funcionamento PWM



Fonte: Rodrigues et al. (2011)

trilha de imagens seja percebida, caso a fonte esteja em movimento, ou uma cintilação, conhecido como efeito flicker, caso parada.

Esse distúrbio de visão não ocorre em todas as luzes de LED, uma vez que algumas utilizam o controle da corrente média como método de controle de intensidade mantendo uma corrente constante através dos LEDs. No entanto, quando há uma corrente PWM através dos LEDs, o efeito biológico da oscilação da luz pode se tornar perceptível durante o movimento sacádico.

Na melhor das hipóteses, o flicker é apenas uma distração. No entanto, também pode se tornar um risco para a saúde, provocando um aumento da incidência de dores de cabeça e até de ataques epiléticos. O risco depende da área da retina exposta ao flicker e da maneira como a luz muda com o tempo (frequência e profundidade da modulação), entre outros fatores. Quando o flicker ocorre em frequências entre 3 e 70 Hz com uma amplitude pico a pico suficiente, os perigos podem ser os mais graves, uma pequena porcentagem da população pode sofrer um ataque epilético. (LEHMAN; WILKINS, 2014)

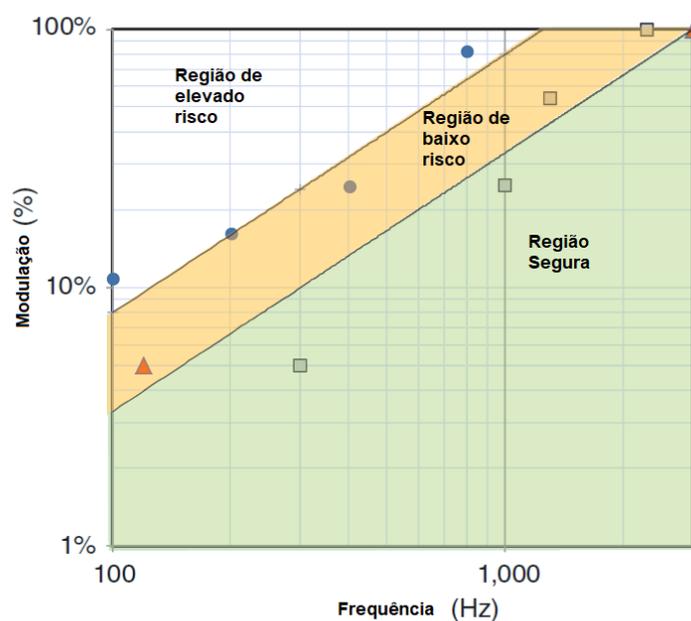
Por sorte, grande parte das lâmpadas possui um flicker com o dobro da frequência da rede, 100 Hz na Europa e 120 Hz no Estados Unidos e Brasil. De fato, o flicker não pode ser, normalmente, percebido em frequências maiores que a dita *critical flicker fusion* (CFF), que usualmente se encontra entre 60 a 90 Hz. Acima da CFF, a luz parece ser contínua, contudo isso não significa que ela não faça mal. Mesmo não sendo visto, o flicker ainda pode causar risco aos humanos. Podemos perceber isso nas fluorescentes controladas por reatores magnéticos com frequência de linha, ocorrendo uma descarga duas vezes com cada ciclo do fornecimento da eletricidade. O flicker não pode ser percebido, contudo dobra a média de casos de dor de cabeça em escritórios, impactando inclusive no rendimento dos funcionários. (LEHMAN; WILKINS, 2014)

Quando uma imagem é iluminada por uma fonte intermitente, como uma luz com

flicker, a imagem formada durante o movimento sacádico não está em movimento, mas é uma sucessão de imagens discretas e isso pode ser confundido com movimento, permitindo que seja observável o efeito flicker. A frequência observável do flicker, em razão do movimento sacádico pode chegar a 2 kHz. Grande parte das lâmpadas comerciais apresentam uma variação entre o máximo e o mínimo com o dobro da frequência da rede, no caso 120 Hz.

Os LEDs são dispositivos unidirecionais e requerem conversão da corrente alternada para contínua. O tempo de resposta para os LEDs é quase instantâneo. A intensidade luminosa de um LED, em geral, é aproximadamente uma relação linear da sua corrente. Como resultado, a ondulação da corrente do LED instantaneamente se torna ondulação da oscilação da luz. Isso fez com que o flicker ressurgisse como uma questão importante no processo de design, dando origem a novos grupos de padrões, como o IEEE PAR1789 (*Recommending Practices for Modulating Current in High Brightness Leds for Mitigating Health Risks to Viewer*), que avaliam níveis seguros. Durante o movimento sacádico, efeito flicker pode ser visto como um rastro de luzes, mesmo quando a frequência do flicker for tão alta quanto 2 kHz. Na figura 2.10, podem ser observadas regiões de utilização segura, com baixo risco e com risco elevado, variando com a frequência e nível de modulação. (LEHMAN; WILKINS, 2014)

Figura 2.10: Risco de danos a saúde pela frequência do Flicker e sua variação entre máximo e mínimo em por cento



Fonte: Lehman e Wilkins (2014) (modificada)

## 2.5 Grandezas associadas à iluminação

Visando ao melhor entendimento dos conceitos referentes à iluminação e à necessidade de cumprimento das normas, faz-se necessário o conhecimento básico das unidades fotométricas definidas pela comissão de fotometria do SI, sendo definidas nas próximas subseções. Conforme descrito na Seção Visão humana, quantidades fotométricas, fotoquímicas ou fotobiológicas estão relacionadas a quantidades radiométricas, quantidades puramente físicas, por meio de funções de ponderação espectral, uma vez que os fotorreceptores biológicos não são igualmente sensíveis à luz em todos os comprimentos de onda (Figura 2.5).

A quantidade mais fundamental na fotometria é o fluxo luminoso ( $\phi_v$ ), porque possui a relação mais simples com a potência radiante, sendo esse definido como a variação de energia luminosa no tempo, tendo sua unidade o lúmen (lm). As outras três quantidades são definidas a partir do fluxo luminoso e fatores geométricos apropriados, sendo estas, a intensidade luminosa, a luminância e a iluminância.

O fluxo luminoso é uma quantidade derivada do fluxo radiante ( $\phi_e$ ), avaliando a radiação de acordo com sua ação no observador fotométrico padrão da CIE (Figura 2.5). (OHNO et al., 2020)

A intensidade luminosa ( $I_v$ ), unidade básica do SI é definida como a densidade do fluxo luminoso em relação ao ângulo sólido em uma direção específica, sua unidade é a candela expressa como  $\text{cd} = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$ , sendo sr esferorradiano. (OHNO et al., 2020)

A definição física da candela consiste na intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \cdot 10^{12}$  Hz e que tem uma intensidade radiante nessa direção de  $1/683$  W por esferorradiano. (ZWINKELS et al., 2016)

A luminância ( $L_v$ ) é definida como a densidade da intensidade luminosa em relação à área projetada em uma direção especificada, em um ponto especificado em uma superfície real ou imaginária, sendo sua unidade candela por metro quadrado ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ). (OHNO et al., 2020)

A iluminância ( $E_v$ ) consiste na densidade do fluxo luminoso incidente em relação à área em um ponto em uma superfície real ou imaginária, tendo sua unidade o Lux ( $\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ ). (OHNO et al., 2020)

## 2.6 Norma brasileira de iluminação

A norma brasileira de iluminação (ABNT NBR ISO/CIE 8995-1) é baseada em três fatores, iluminância média, índice de reprodução de cor (IRC ou  $R_a$ ) e ofuscamento (Índice de Ofuscamento Unificado -  $UGR_L$ ), sendo os dois primeiros quantidade e qualidade da iluminação, respectivamente, e o terceiro como uma sensação visual produzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão. Este terceiro podendo ser experimentado tanto como ofuscamento desconfortável quanto como um ofuscamento inabilitador. A norma limita valores mínimos de iluminância e índice de reprodução de cor e valores máximos de ofuscamento como observado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Exemplo da tabela da norma brasileira de iluminação ABNT NBR ISO/CIE 8995-1

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\bar{E}_m$ lux	$UGR_L$	$R_a$	Observações
<b>29. Locais de assistência médica</b>				
Salas de espera	200	22	80	Iluminância ao nível do piso.
Corredores: durante o dia	200	22	80	Iluminância ao nível do piso.
Corredores: durante a noite	50	2	80	Iluminância ao nível do piso.
Quartos com claridade	200	22	80	Iluminância ao nível do piso.
Escritório dos funcionários	500	19	80	
Sala dos funcionários	300	19	80	
Enfermarias				
— iluminação em geral	100	19	80	Iluminância ao nível do piso.
— iluminação de leitura	300	19	80	
— exame simples	300	19	80	
Exames e tratamento	1 000	19	90	
Iluminação noturna, iluminação de observação	5	19	80	
Banheiros e toaletes para os pacientes	200	22	80	
Sala de exames em geral	500	19	90	
Exames do ouvido e olhos	1 000		90	Luminária para exame local.
Leitura e teste da visão colorida com gráficos de visão	500	16	90	

Fonte: [ABNT NBR ISO/CIE 8995-1]

### 2.6.1 Iluminância média

A iluminância pode ser descrita como o brilho percebido da luz visível. A iluminância é uma métrica para determinar a quantidade de luz ambiente. As informações da luz ambiente podem ser bastante úteis em muitas aplicações, especialmente as orientadas a exibição. Como por exemplo, o controle do brilho da tela com base nas medições da

luz ambiente pode melhorar a experiência visual para o usuário e aumentar a eficiência de energia ao desperdiçar energia com o brilho máximo da tela quando isso não é garantido pelo ambiente. (AMS AG, 2009)

### **2.6.2 Índice de reprodução de cor**

O índice de reprodução de cor (IRC ou  $R_a$ ) foi introduzido pela CIE, tendo em vista a necessidade de verificar a distorção das características da cor causadas pelas fontes luminosas com espectro descontínuo, LED, fluorescentes, dentre outras.

O IRC é a medida de correspondência entre a cor real de um objeto e sua aparência diante de uma fonte de luz. Possui um intervalo de 0 a 100, que indica aproximadamente como a iluminação artificial, permite ao olho humano perceber as cores com maior ou menor fidelidade. Sua classificação dada como: 50 – 80, reprodução de cor razoável; 80 – 90, reprodução de cor boa, e 90 – 100, reprodução de cor muito boa. Através deste método, mede-se a luz da fonte comparando-a com a luz do dia. Onde coloca-se a luz a ser testada sob o efeito de 8 cores, verifica-se o desvio para cada cor e resulta em um porcentagem (quanto maior o desvio, menor o índice).

Vale ressaltar que uma lâmpada de espectro descontínuo tem por definição IRC inferior a 100; contudo, isso não significa que esta fonte de luz será sempre menos fiel quanto à reprodução de todas as cores. O fato é que a Curva de Distribuição Espectral dessa fonte artificial deve ser cuidadosamente analisada, no sentido de verificar se existe mais energia naquele comprimento de onda específico referente às cores do ambiente ou dos objetos que estão sendo iluminados. (FELDMAN, 2014)

## **2.7 Controle baseado em dados**

Visando controlar um sistema em que o número de sensores e sua distribuição espacial não sejam fixos ou sejam utilizados como parâmetros de entrada, é necessário um método que permita a obtenção dos parâmetros através de experimentos conduzidos na planta. Esses métodos são conhecidos como controle baseado em dados, pois estimam os parâmetros do controlador a partir dos dados de entrada e saída do processo, sendo inicialmente propostos por dois engenheiros, Ziegler e Nichols (1942), e recebendo maior foco nos anos 90 (CAMPI; LECCHINI; SAVARESI, 2002).

Na literatura, os métodos são classificados em dois grupos distintos: métodos iterativos, que usa vários experimentos para atualizar os parâmetros do controlador; e métodos diretos, que requerem apenas uma ou duas bateladas (*batch*) de dados para ajustar o controlador. Entre tais técnicas, uma das mais populares é o Método da Referência Virtual (*Virtual Reference Feedback Tuning* - VRFT), sendo proposto por Campi, Lecchini e Savaresi (2002) que consiste em um método direto.

O método VRFT tem como objetivo ajustar um controlador de tempo discreto para um sistema linear e invariante no tempo (LTI), sendo representado pela Equação 2.1, onde  $z$  é o operador de avanço,  $G(z)$  consiste na função de transferência do processo,  $v(t)$  consiste no ruído do processo,  $y(t)$  e  $u(t)$  representam a saída e entrada respectivamente.

$$y(t) = G(z)u(t) + v(t) \quad (2.1)$$

O ruído do processo pode ser representado pela Equação 2.2, onde  $e(t)$  consiste no ruído branco com média zero e variância  $\sigma_e^2$ ,  $H_0(z)$  consiste em uma função de transferência estável.

$$v(t) = H_0(z)e(t) \quad (2.2)$$

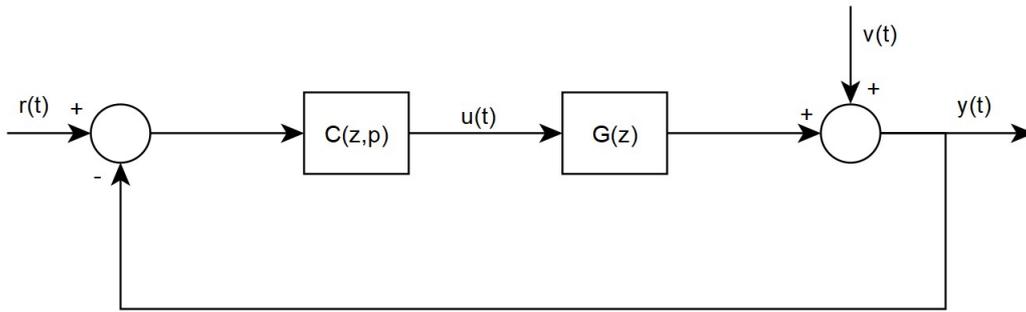
Assumindo o processo como linear invariante no tempo com estrutura fixa parametrizado em função de um vetor de parâmetros  $\rho \in \mathfrak{R}^p$ , a classe do controlador é definida pela estrutura que engloba todos os controladores possíveis definidos por ela, como observado na Equação 2.3, na qual  $\bar{C}$  consiste na classe do controlador e  $\rho$  consiste no vetor de parâmetros. Um controlador PID de tempo discreto pode ser representado pela Equação 2.4.

$$C(z, \rho) = \rho^T \bar{C}(z) \quad (2.3)$$

$$C(z, \rho) = [K_p, K_i, K_d] \cdot \left[ 1, \frac{z}{z-1}, \frac{z-1}{z} \right]^T \quad (2.4)$$

$$\rho^T = [K_p, K_i, k_d] \quad (2.5)$$

Figura 2.12: Sistema malha fechada



Fonte: Autor

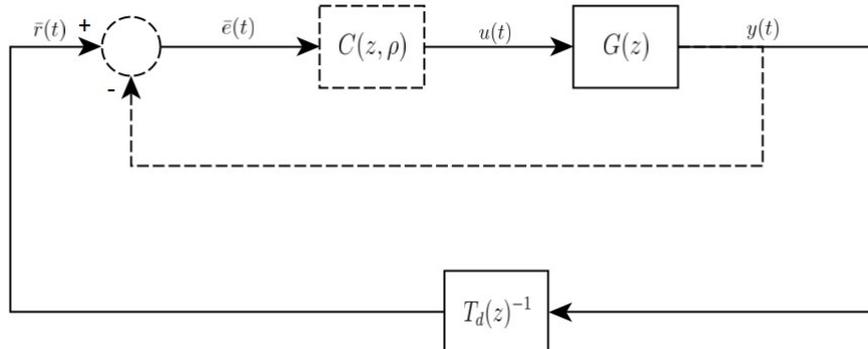
A Figura 2.12 demonstra o sistema em malha fechada, onde  $r(t)$  consiste no sinal de referência,  $C(z, \rho)$  no controlador e  $G(z)$  na planta, equacionando o sistema obtêm-se as seguintes Equações 2.6, 2.7 e 2.8 que descrevem o sistema em malha fechada. A Equação 2.8 ressalta a dependência da saída em relação aos parâmetros.

$$y(t, \rho) = T(z, \rho)r(t) + S(z, \rho)v(t) \quad (2.6)$$

$$S(t, \rho) = \frac{1}{1 + G(z)C(z, \rho)} \quad (2.7)$$

$$T(t, \rho) = S(t, \rho)G(z)C(z, \rho) = G(z)C(z, \rho)S(t, \rho) \quad (2.8)$$

Figura 2.13: Sistema utilizado no método VRFT



Fonte: Autor

O objetivo do método VRFT consiste em ajustar o vetor de parâmetros do controlador  $\rho$  para alcançar um desempenho desejado para  $y(t)$  em laço fechado. Tal desempenho é especificado através da definição de um modelo de referência  $T_d(z)$ , podendo ser observado na Figura 2.13. Tal modelo define a relação entre o sinal de referência  $r(t)$  e

saída desejada  $y_d(t)$ , como descrito na Equação 2.9.

$$y_d(t) = T_d(z)r(t) \quad (2.9)$$

Após definido o modelo de referência e determinado a saída desejada, o VRFT projeta o controlador em uma estrutura de referência de modelo (MR), tendo como objetivo minimizar a norma  $L_2$  da diferença entre  $y(t)$  e  $y_d(t)$ , expresso nas Equações 2.10 e 2.11. Contudo, o problema de otimização proposto em tais equações não é convexo, e que  $T(z, \rho)$  depende da função de transferência do projeto  $G(z)$  que é desconhecida pelo usuário. A fim de contornar tal problema, o método propõe um problema de otimização que não depende do modelo do processo, usando os dados coletados de entrada e saída para ajustar  $\rho$ . (BOEIRA; ECKHARD, 2020)

$$\hat{\rho}_{MR} = \arg_{\rho} \min J_{MR}(\rho) \quad (2.10)$$

$$J_{MR}(\rho) = \sum_{t=1}^N \|(T_d(z) - T(z, \rho))r(t)\|_2^2 \quad (2.11)$$

Os parâmetros podem então ser calculados pelas Equações 2.12 e 2.13.

$$\hat{\rho}_{VR} = \arg_{\rho} \min J_{VR}(\rho) \quad (2.12)$$

$$J_{VR}(\rho) = \sum_{t=1}^N \|u(t) - C(z, \rho)\bar{e}(t)\|_2^2 \quad (2.13)$$

$$J_{VR}(\rho) = \sum_{t=1}^N \left\| u(t) - C(z, \rho) \frac{1 - T_d(z)}{T_d(z)} y(t) \right\|_2^2 \quad (2.14)$$

Manipulando a Equação 2.3 em conjunto com a definição de  $\varphi(t)$  na Equação 2.15 e substituindo na Equação 2.14 obtemos a função custo descrita na Equação 2.16.

$$\bar{C}(z)\bar{e}(t) = \varphi(t) \quad (2.15)$$

$$J_{VR}(\rho) = \sum_{t=1}^N \|u(t) - \rho^T \varphi(t)\|_2^2 \quad (2.16)$$

Esse problema consiste em um problema de mínimos quadráticos, como é demonstrado na Equação 2.16 e possui sua solução definida pela Equação 2.17.

$$\rho = \sum_{t=1}^N [\varphi(t)\varphi(t)^T]^{-1} \sum_{t=1}^N [\varphi(t)u(t)]^2 \quad (2.17)$$

## 2.8 Protocolo de comunicação sem fio

Visando controlar a iluminação de um ambiente, utilizando múltiplos sensores espalhados, torna-se interessante a utilização de comunicação sem fio entre os sensores (produtores dos dados) e o controlador/atuador (consumidor), assim permitindo maiores distâncias entre eles e facilidade da utilização. O protocolo deve mandar diversas mensagens pequenas em um curto espaço de tempo, utilizando o meio físico do Wi-Fi, assim permitindo enviar os dados para um computador que irá calcular os parâmetros do controle.

MQTT consiste em um protocolo cliente-servidor de transporte de mensagens que utiliza um modelo de assinatura e publicação em tópicos. Este protocolo é caracterizado por ser leve, aberto e simples de implementar, tornando ideal para comunicação máquina a máquina (M2M) e para a internet das coisas (IoT). O protocolo é executado sobre TCP/IP ou outro protocolo que forneça conexão bidirecional, ordenada e sem perdas (OASIS, 2016).

O padrão *publish/subscribe* (assinatura/publicação), fornece uma alternativa à arquitetura convencional cliente/servidor. Neste modelo, ao contrário da arquitetura cliente/servidor, não há uma conexão direta entre as partes, existindo um terceiro, o *broker*, que faz o intermédio entre o cliente que envia a mensagem (publicador) e o cliente que recebe a mensagem (assinante), sendo assim os publicadores e assinantes só precisam saber o nome do *host* / IP e a porta do *broker*.

Um cliente MQTT é qualquer dispositivo (de um microcontrolador até um servidor completo) que executa uma biblioteca MQTT e se conecta a um broker MQTT em uma rede. Basicamente, qualquer dispositivo que fala MQTT em uma pilha TCP / IP pode ser chamado de cliente MQTT (HIVEMQ, 2019).

O cliente receptor assina o tópico que deseja receber as mensagens e o *broker* encaminha as mensagens publicadas, a partir desse momento, nesse tópico. Um cliente pode ser tanto um publicador quanto um assinante de um tópico. Uma assinatura deve incluir as informações de filtro do tópico e uma qualidade de serviço. Uma assinatura está associada a uma única sessão e em uma sessão pode existir mais de uma assinatura.

O nome do tópico consistem em um rótulo utilizado pelo *broker* para encaminhar as mensagens para cada cliente que possui uma assinatura com esse rótulo.

Contraparte do cliente, o *broker* está no centro de qualquer protocolo de publicação/assinatura. O *broker* é responsável por receber todas as mensagens, filtrar as mensagens, determinar quem está inscrito em cada mensagem e enviar a mensagem para esses clientes inscritos. O *broker* também mantém os dados da sessão de todos os clientes que têm sessões persistentes, incluindo assinaturas e mensagens perdidas.

Existem três níveis de confiabilidade de recebimento da mensagem (qualidade do serviço - QoS) com a qual é possível configurar ao enviarmos uma mensagem e assinar um tópico:

- Qualidade 0, referida como no máximo uma vez, na qual pode ocorrer perda da mensagem. Este é indicado para com dados de sensor de ambiente em que não importa se uma leitura individual é perdida, pois a próxima será publicada logo em seguida.
- Qualidade 1, pelo menos uma vez, em que as mensagens chegam com certeza, mas podem ocorrer duplicatas.
- Qualidade 2, exatamente uma vez. Este nível garante que não ocorreram perdas ou mensagens duplicadas.

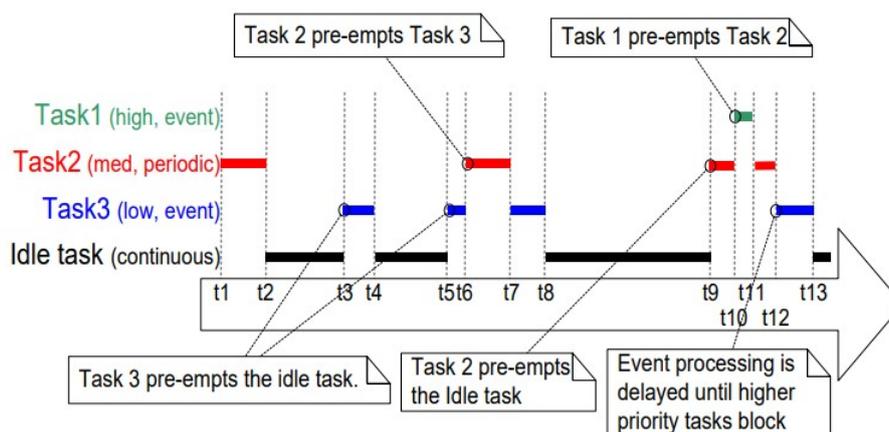
## 2.9 Sistema operacional embarcado

Visando atingir as restrições temporais necessárias para o funcionamento de um sistema de controle e a execução de *stacks* de protocolos de comunicação torna-se interessante a utilização de um sistema operacional de tempo real (*Real-Time Operating System* - RTOS). Um RTOS consiste em um sistema operacional que fornece serviços e gerência recursos. Esses recursos incluem ciclos de processador, memória, periféricos e interrupções. Um RTOS é composto principalmente de:

- Tarefas (*Tasks*): Consistem em funções independentes que podem ou não compartilhar recursos, como periféricos.
- *Kernel*: É o responsável pelo gerenciamento, comunicação e sincronização das tarefas.
- Agendador (*Scheduler*): Parte do *Kernel* responsável por decidir qual tarefa deve ser executada.

O objetivo principal de um RTOS é alocar o tempo de processamento entre várias tarefas que o microcontrolador deve realizar. Isso normalmente envolve uma divisão do software em partes, comumente chamadas de “tarefas” ou “*threads*”, e criando um ambiente de tempo de execução que fornece a cada *thread* seu próprio microprocessador virtual (“*Multithreading*”). Basicamente, um microprocessador virtual consiste em um conjunto virtual de recursos do microprocessador, como, por exemplo, conjunto de registradores, contador de programa, área de memória da pilha e um ponteiro de pilha. Somente durante a execução uma tarefa usa os recursos físicos do microprocessador, mas cada tarefa retém sua própria cópia do conteúdo desses recursos como se fossem seus próprios recursos privados (o “contexto” da tarefa). O escalonador de um RTOS controla a execução das tarefas e o gerenciamento de seus contextos, como pode ser observado na Figura 2.14, em que o agendador alterna as tarefas em execução por sua prioridade e disponibilidade de execução. Cada tarefa recebe uma prioridade definida pelo programador, com o objetivo de determinar qual *thread* deve ser executada caso mais de uma estiver pronta para ser executada. O escalonador em um sistema operacional de tempo real (RTOS) é projetado para fornecer um padrão de execução determinístico. Quando uma tarefa de prioridade mais alta (comparado com a em execução) precisa ser executada, o RTOS salva o contexto atual na memória e restaura o contexto da nova tarefa. O processo de troca da tarefa em execução é comumente chamado de troca de contexto. (MICROSOFT, 2020)

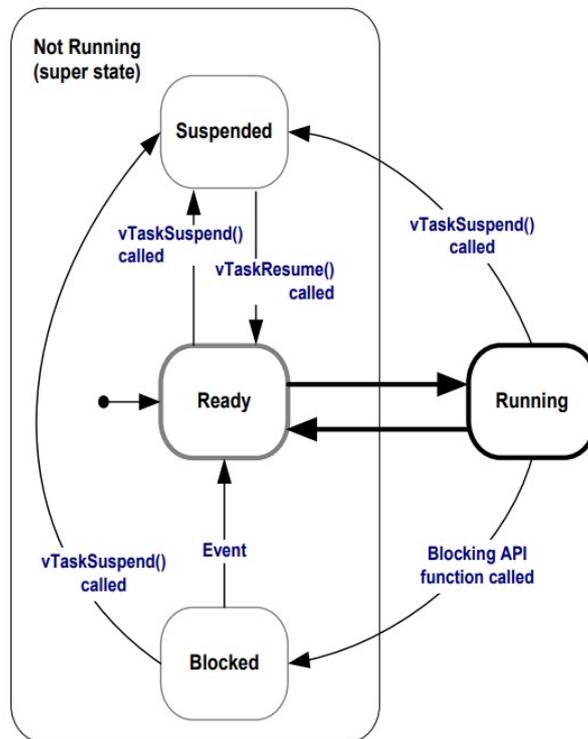
Figura 2.14: Padrão de execução e preempção de uma Tarefa



Fonte: Barry (2016)

Uma tarefa pode assumir quatro estados como demonstrado na Figura 2.15, onde também é possível observar as transições entre eles. Uma tarefa ao ser criada entra no estado “pronta”(ready). Tarefas prontas são aquelas que podem ser executadas, mas não estão em execução no momento porque uma tarefa diferente de prioridade igual ou supe-

Figura 2.15: Máquina de estados de uma tarefa



Fonte: Barry (2016)

rior já está no estado “Em execução”. Quando uma tarefa está no estado “Em execução”, significa que ela está, atualmente, utilizando o processador. Se o processador no qual o RTOS está sendo executado tiver apenas um único núcleo, poderá haver apenas uma tarefa no estado “Em execução” a qualquer momento. Uma tarefa está no estado “Bloqueado” (*Blocked*) se estiver aguardando um evento temporal ou externo. Por exemplo, se uma tarefa chamar `vTaskDelay()`, ela será bloqueada (será colocada no estado “Bloqueado”) até que o período de atraso tenha expirado - um evento temporal. As tarefas também podem ser bloqueadas para aguardar fila, semáforo, grupo de eventos, notificação ou evento de semáforo. As tarefas no estado “Bloqueado” normalmente têm um período de “tempo limite”, após o qual a tarefa expirará e será desbloqueada, mesmo que o evento pelo qual a tarefa estava esperando não tenha ocorrido. As tarefas no estado “Bloqueado” não usam nenhum processamento e não podem ser selecionadas pelo agendador para entrar no estado “Em execução”. Assim como as tarefas que estão no estado “Bloqueado”, as tarefas no estado “Suspenso” (*Suspended*) não podem ser selecionadas para entrar no estado “Em execução”, mas as tarefas no estado Suspenso não têm tempo limite. Em vez disso, as tarefas só entram ou saem do estado Suspenso quando explicitamente comandadas a fazê-lo por meio das chamadas de funções específicas. (BARRY, 2016)

Para permitir a comunicação segura entre tarefas (“*thread safe*”), o RTOS introduz

diversos objetos, dentre eles: semáforos, filas, grupos de eventos e notificações de tarefa. Os semáforos permitem a gerir recurso limitado, restringir ação e sincronizar tarefas. Caso alguma tarefa já esteja utilizando um recurso somente com a sua liberação, será possível outra tarefa utilizar tal recurso, como por exemplo a utilização de um periférico. As filas (*Queues*) são *buffers* FIFO (*First In First Out*) onde os itens são removidos da fila ao serem lidos. Uma fila possui suas operações de leitura e escrita atômicas. A utilização de filas permite bloquear por um tempo determinado uma tarefa caso esta tente ler alguma fila vazia. Um grupo de eventos é um conjunto de bits de eventos, em que bits de evento são usados para indicar se um evento ocorreu ou não. Bits de evento são frequentemente chamados de sinalizadores de evento. As notificações de tarefas permitem que as tarefas interajam com outras tarefas e sincronizem com rotinas de serviço de interrupção (ISRs), sem a necessidade de um objeto de comunicação separado, como um semáforo.

## 2.10 Produtos relacionados

Existem produtos comerciais que propõe uma luz variável semelhante a iluminação natural, entre as quais a Sunlight Lamp, da empresa Sunlight Inside, sediada em São Francisco, Califórnia, cuja abordagem consiste em iniciar o dia com uma cor branca e ir mudando a tonalidade para amarelo no passar do dia, não sendo controlada a intensidade da iluminação. Também existe a Philips HUE, da philips, que não apresenta sistema de controle variável da iluminação.

## 2.11 Observações finais

Conforme apresentado no decorrer do capítulo, a visão humana é predominante gerada por quatro fotorreceptores (cones e bastonetes), existindo uma padronização criada pela CIE para se definir tal comportamento (função de eficiência luminosa). Entretanto, tendo em vista que a iluminação possui outra função além da geração de imagens, a sincronização circadiana e a possibilidade da fotorrecepção de melanopsina influir na formação de imagens, torna-se interessante a utilização de unidades radiométricas, assim evitando a conversão de unidades (Lucas et al. (2014)).

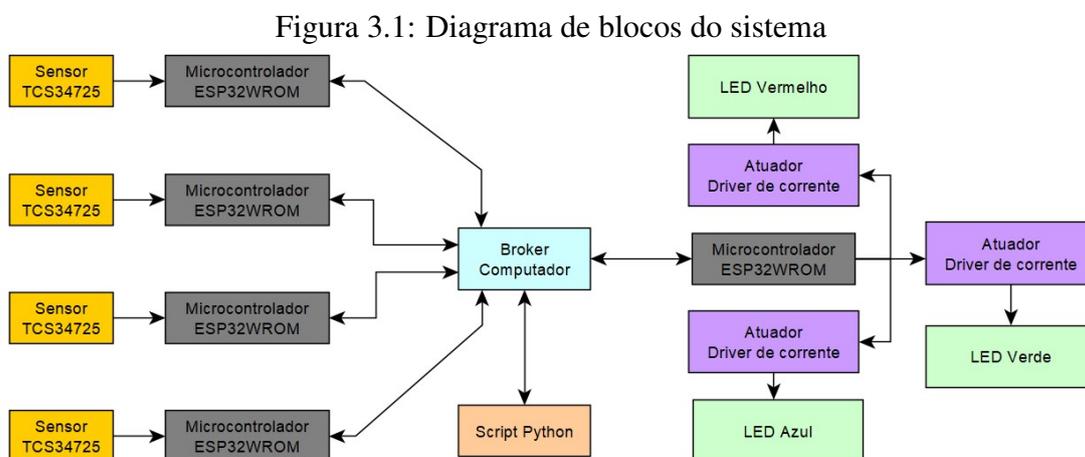
A velocidade com a qual olho humano percebe as variações do ambiente estão relacionadas aos movimentos sacádicos, chegando a perceber alterações com frequências

de até 3 kHz, indicando a necessidade da utilização de frequências de oscilação muito superiores uma parcela das lâmpadas LED disponíveis comercialmente (120 Hz). Nas últimas dezenas de anos, houve uma modificação no comportamento humano em razão da utilização da iluminação artificial (constante em espectro e composição ao longo do dia), modificando drasticamente a relação de claro e escuro à qual os humanos estavam expostos, criando o termo LAN. Com a urbanização a LAN passou a ser considerada como uma “poluição luminosa”. Este aumento da iluminação acarretou um maior consumo energético, tornando necessário aumentar a eficiência da iluminação, buscando novas estratégias para atender a demanda. Ao se buscar uma maior eficiência da iluminação, modificou-se o espectro luminoso produzido pelas lâmpadas, deixando de ser um espectro amplo e contínuo para espectros descontínuos e pontuais, por consequência mais distintos da iluminação natural.

A norma brasileira que regulamenta a iluminação interna é baseada em três fatores: a intensidade da iluminação, a capacidade daquela iluminação em reproduzir as cores e o desconforto causado por reflexões. Contudo, a norma não leva em conta questões como a descontinuidade da emissão, composição da iluminação, frequência de oscilação da fonte luminosa e aspectos não visuais como a influência de iluminação no reajuste de fase circadiana.

### 3 METODOLOGIA E ENSAIOS DOS MÓDULOS

Neste capítulo, serão abordados os métodos utilizados no desenvolvimento de um sistema que permita o controle da iluminação ambiente utilizando sensores espalhados espacialmente. Visa-se, aqui, a um sistema dinâmico no qual o número de sensores possa variar e permita a utilização, de forma individual, de suas partes (sensor e atuador). Por isso buscou-se uma maneira de deixar o sistema elevada modularidade. Como se observa na Figura 3.1, o sistema é composto por: até cinco microcontroladores; um computador, em que é executado o *broker* local e um *script* em Python; quatro sensores TCS3472-5; três atuadores do tipo Buck, e três LED, um para cada componentes da iluminação a ser controlada. Os microcontroladores a esquerda do *broker* são responsáveis pela aquisição e envio dos dados da iluminação, enquanto o microcontrolador a direita tem como função a obtenção dos dados, calculo do controle e atuação na planta. Através da figura, pode-se ainda se observar as conexões do sistema e seu fluxo de dados.



Fonte: Autor

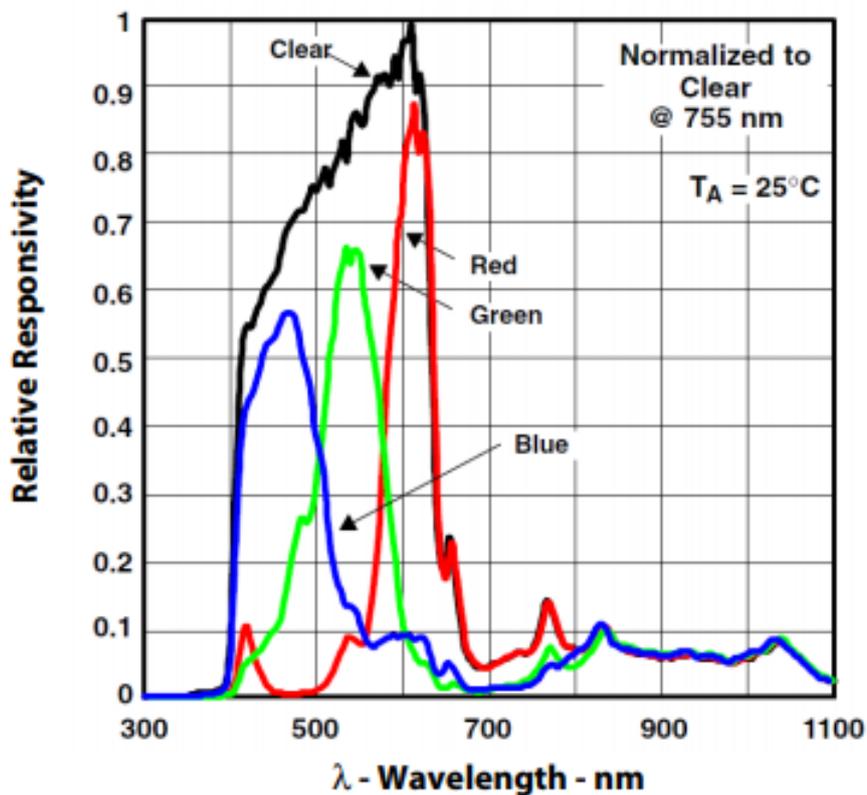
O microcontrolador utilizado é o ESP-32 WROOM, da fabricantes *ESPRESSIF*. Tal microcontrolador possuindo frequência máxima de 240 MHz, 4 MB de memória flash, barramento I2C, interfaces Wi-Fi (802.11 b/g/n 2.4 GHz), Bluetooth (V4.2 BR/EDR, Bluetooth LE specification) e um processador *Dual Core* (ESP32-D0WD-V3). Esse microcontrolador possui diversos RTOS portados e estáveis, sendo escolhida a utilização do *FreeRTOS*.

### 3.1 Sensor

Visando controlar a iluminação do ambiente, tanto em intensidade quanto em coloração, faz-se necessária a utilização de um sensor que permita caracterizar mais do que a intensidade luminosa do ambiente. Impõe que se meça as componentes azul, verde e vermelho.

O sensor “*COLOR LIGHT-TO-DIGITAL CONVERTER with IR FILTER*” (TCS3472-5), produzido pela “AMS AG”, consiste de uma matriz de 3X4 fotodiodos, quatro conversores analógico digital (ADC) que integram a corrente dos fotodiodos, registradores de dados, uma máquina de estados (responsável pelo controle interno do sensor) e uma interface I2C (Inter-Integrated Circuit).

Figura 3.2: Responsividade do sensor TCS3472-5



Fonte: AMS AG (2020)

Essa matriz 3X4 é composta de três fotodiodos por canal, em que a filtragem em cada conjunto de LED os diferencia. A responsividade relativa dos canais Vermelho (*Red - R*), Verde (*Green - G*), Azul (*Blue - B*) e Sem filtragem (*Clear - C*) está disponível na Figura 3.2. Um filtro infravermelho (IR) está integrado no chip e localizado

junto com os fotodiodos, buscando reduzir a sua influência no resultado e melhorando sua precisão. Contudo, como tal filtragem não elimina completamente o efeito do IR, o documento AMS (2013) indica a utilização da Equação 3.1 para a remoção do restante da componente infravermelha.

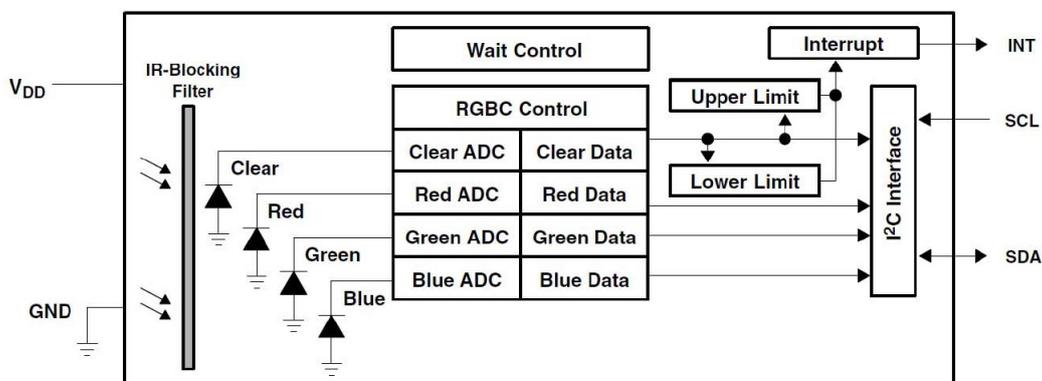
$$IR = \frac{R + G + B - C}{2} \quad (3.1)$$

Ao remover a influência do infravermelho, modifica-se a notação das componentes para  $R'$ ,  $G'$  e  $B'$ , conforme a equação abaixo:

$$[R', G', B'] = [R - IR, G - IR, B - IR] \quad (3.2)$$

Os quatro ADC convertem simultaneamente a corrente amplificada de cada um dos fotodiodos para um valor digital de até 16 bits. Todo controle interno, assim como o estado de espera de baixo consumo, é feito pela máquina de estados interna. A Figura 3.3 consiste no diagrama de blocos do funcionamento do sensor.

Figura 3.3: Diagrama de blocos do sensor TCS 3472-5

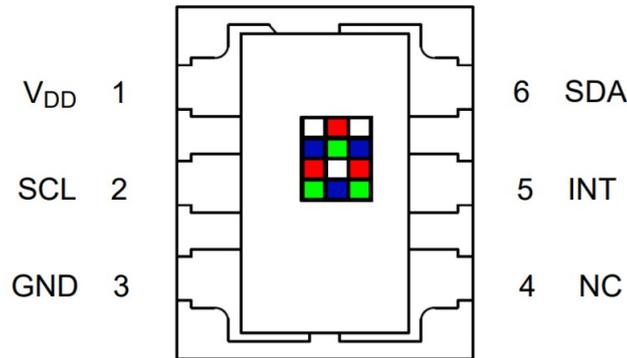


Fonte: (AMS AG, 2020)

A Figura 3.4 demonstra que o sensor é composto de seis pinos: um não utilizável (NC), um terra (GND), uma alimentação ( $V_{DD}$ ), uma saída de interrupção programável e dois pinos do barramento I2C, o de dados (SDA) e o do relógio (SCL). Essa figura ainda salienta a disposição de cada fotodiodo na matriz 3X4. O ângulo da incidência luminosa influencia a resposta do sensor, como pode ser observado na Figura 3.5.

Uma máquina de estados providencia os controles do sistema de aquisição RGBC e do gerenciamento de energia, como pode ser visto na Figura 3.6. Ao energizar o sensor, a configuração de reinicialização coloca o sensor em um estado de dormência de baixo

Figura 3.4: Pinagem do sensor TCS3472-5



Fonte: (AMS AG, 2020)

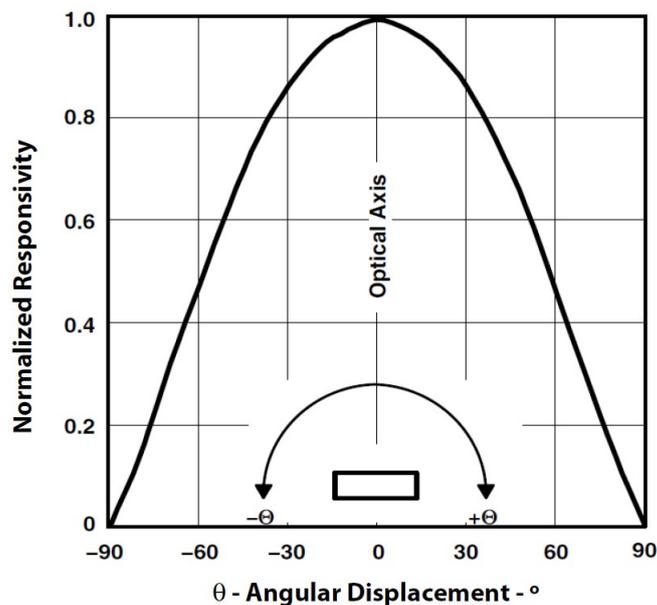
consumo de energia.

Quando a condição de início é detectada no barramento de I2C, o dispositivo vai para um estado ocioso (IDLE) em que é verificado no registrador ENABLE (endereço 0X00) o bit 0, PON. Se o PON está desativado (0), o sistema irá retornar para o modo de dormência. Caso contrário, o dispositivo irá se manter no estado de IDLE até o bit responsável pela permissão de aquisição (AEN) estar ativo.

Uma vez ativo, o dispositivo segue para um estado de espera (WAIT) e, se o bit responsável pela habilitação do estado de espera estiver verdadeiro (WEN), segue então para o estado de aquisição do RGBC. Caso o WEN não esteja ativado, a máquina de estados passa direto do IDLE para a aquisição, configuração utilizada. Uma vez completa a aquisição, o dispositivo retorna para o estado IDLE. Caso o AEN e o PON ainda estejam ativados, o ciclo será reiniciado. Ao utilizar o registrador WLONG, o incremento temporal do estado WAIT será multiplicado por 12, passando de 2,4 ms para 28,8 ms.

O mecanismo RGBC contém um controle do ganho da corrente da matriz de fotodiodos, responsável pela aquisição dos dados dos quatro canais (Red, Green Blue e Clear). Tal controle ocorre através do registrador AGAIN, cujas características estão dispostas na Tabela 3.1. O registrador ATIME controla o tempo de integração do sensor e também está presente na tabela. A integração da corrente acontece simultaneamente nos quatro canais, e uma vez concluído o ciclo de conversão, os resultados são transferidos para os registradores de armazenamento e o bit 0 do registrador *Status Register* (0x13), AVALID, é modificado, sinalizando que a integração foi concluída. Os dados são chamados de contagens e possuem unidade  $\mu W/cm^2$ . Os registradores AGAIN e WAIT possuem representação em complemento de 2, com incremento de 2,4 ms, sendo o tempo

Figura 3.5: Resposta angular do sensor TCS3472-5



Fonte: (AMS AG, 2020)

de integração dado pela fórmula Tempo de integração =  $2,4 \cdot (256 - ATIME)$  ms.

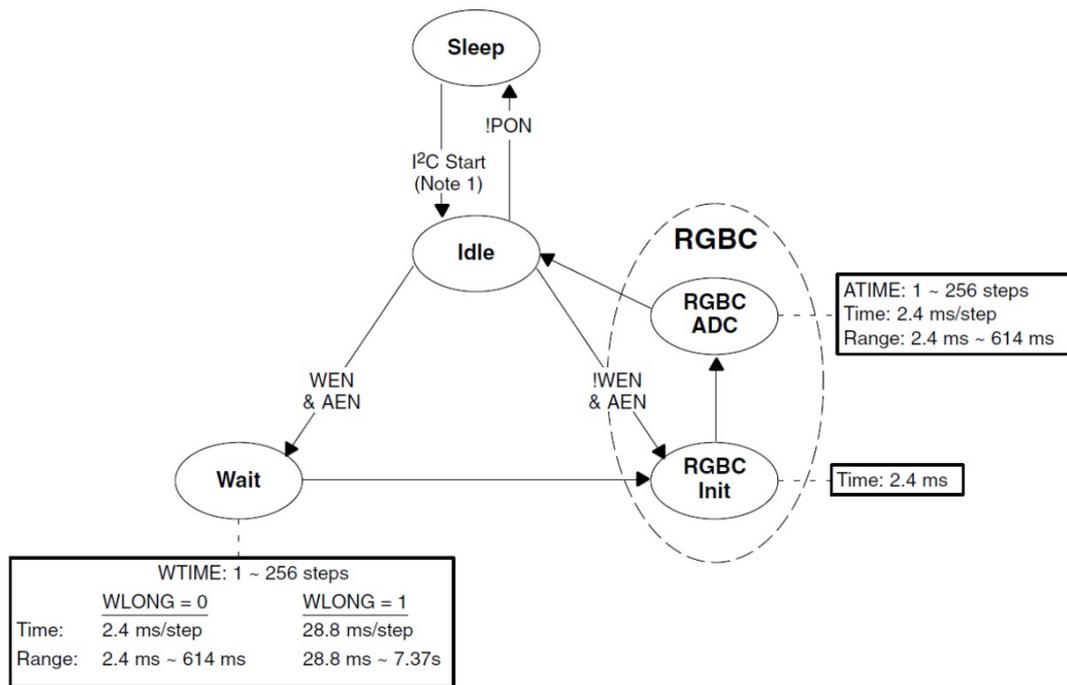
Tabela 3.1: Características do ADC do sensor TCS3472-5

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Dark ADC count value	Ee = 0, AGAIN = 60x, ATIME = 0xD6 (100 ms)	0	1	5	counts
ADC integration time step size	ATIME = 0xFF	2.27	2.4	2.56	ms
ADC number of integration steps <sup>(1)</sup>		1		256	steps
ADC counts per step <sup>(1)</sup>		0		1024	counts
ADC count value <sup>(1)</sup>	ATIME = 0xC0 (153.6 ms)	0		65535	counts
Gain scaling, relative to 1X gain setting	4X	3.8	4	4.2	X
	16X	15	16	16.8	
	60X	58	60	63	

Fonte: (AMS AG, 2020)

Os valores escolhidos para os registradores WEN e ATIME levam em conta o interesse de uma aquisição rápida, de forma que o registrador WEN é mantido em zero, fazendo o sensor ir do estado de IDLE para a aquisição, sem intervalos. Uma vez que o número máximo de contagens para um incremento de integração é constante em 1024 e o máximo de contagens total é de 65535, a máxima resolução é obtida com 64 incre-

Figura 3.6: Máquina de estados do sensor TCS3472-5



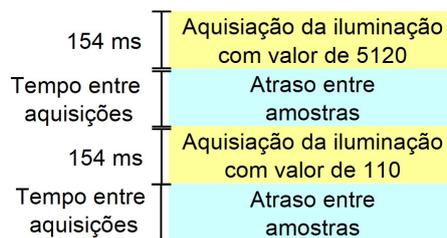
Fonte: (AMS AG, 2020)

mentos ( $ATIME = 0xC0$ ), resultando em um tempo de integração de 154 ms. Através de experimentos preliminares verificou-se que os ambientes analisados possuem elevada iluminação, o valor para o registrador de ganho ( $AGAIN$ ) é fixado em 1X.

Visando à determinação do caminho crítico do sistema e assim ampliar a máxima frequência de aquisição, realiza-se um experimento em que o sistema é excitado com uma iluminação que oscila entre os valores de 5120 e 110 contagens do canal Clear, conforme pode ser observado na Figura 3.7. Ao iniciar a aquisição verifica-se os valores da iluminação do ambiente é mantida constante em 5 contagens. A distância entre a fonte e o sensor é mantida constante em 10 cm durante todos os experimentos. Mantém-se constante o tempo de integração em 154 ms. Os valores entre aquisições do sensor se iniciam em 200 ms, são reduzidos com um incremento de 20 ms até ocorrer variação nos valores obtidos e são realizadas 10 repetições por nível.

Os resultados deste experimento estão dispostos na Tabela 3.2. Ao reduzir o intervalo para valores inferiores a 160 ms, obtém-se a média dos dois valores, portanto se define tal valor como o mínimo entre duas aquisições. Realizou-se outro experimento para identificar o motivo de tal limitação, através da repetição do experimento anterior, modificou-se o parâmetro de tempo de integração. O parâmetro variou entre os valores de 0xE7 (60 ms) e 0x9C (240 ms), sem resultar na modificação do comportamento perante

Figura 3.7: Descrição do experimento realizado para a determinação do intervalo entre aquisições



Fonte: Autor

o intervalo entre medições. Não fica claro se tal limitação é resultado da implementação, *driver* I2C (do sistema).

Tabela 3.2: Relação da média das contagens e intervalo entre aquisições

Tempo entre aquisições [ms]	Média do primeiro valor	Média do segundo valor
200	5120	110
180	5120	110
160	5120	110
140	2615	2615
120	2615	2615

Fonte: Autor

### 3.2 Atuador

Visando criar uma iluminação variável, faz-se necessário um atuador que permita modificar a variável de interesse. Tal atuador consiste de dois componentes: a fonte luminosa e um *driver* que permita seu acionamento.

A fim de determinar as características ideais para a fonte de iluminação deve-se ter em mente dois fatores: as normas que definem a iluminação de ambientes fechados e como funciona a visão humana. Na Subseção 2.3.2 (Cones e a visão colorida) é descrito o funcionamento da visão humana, sendo possível verificar na Figura 2.6 que, na faixa de iluminação de interiores, a visão é essencialmente composta pelos três cones.

Como abordado na Seção 2.4 (Iluminação artificial e percepção humana), dentre as diversas fontes de iluminação o LED, possui maior eficiência luminosa, longa vida útil e, com esse dispositivo, é possível obter diversas distribuições espectrais, variando-se sua composição. Por tais vantagens, optou-se pela utilização do LED. Tendo em vista a

Figura 3.8: LED fixados na estrutura



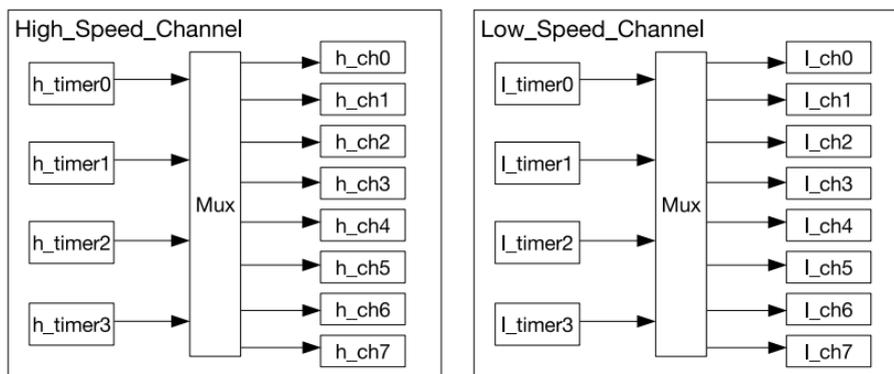
Fonte: Autor

utilização de três fontes LED com baixo espalhamento espectral, o IRC será menor que 100, causando distorção nas cores (Subseção 2.6.2), não sendo indicada a utilização em ambientes que necessitem de extrema confiabilidade na coloração.

A fonte luminosa consiste de três LED (12010 COB LED Strip) de 12V, 10 W do fabricante *Cooleon Lighting*: um com comprimento de onda central de 452 nm (azul), outro com 520 nm (verde) e o terceiro com 620 nm (vermelho), conforme pode ser observado na Figura 3.8. Cada LED possui uma corrente máxima de 850 mA e é composto por 48 LED menores, que resultam em 1000 lúmens de potência radiante.

Devido à incompatibilidade de corrente e de tensão das portas do microcontrolador com os LED, faz-se necessária a utilização de um dispositivo que permita a atuação nos LED, o *Driver*. Para o acionamento, optou-se pela utilização do PWM frente a um *driver* baseado em fonte de corrente. O *driver* utilizado consiste em um *driver* do tipo *Buck*, da marca *Yoshimura Tech*, possuindo uma entrada entre 6 e 30V e corrente de saída de 700 mA, inferior ao limite de corrente máxima, mas o mais próximo encontrado comercialmente. Possui frequência máxima de modulação de 20 kHz.

Figura 3.9: Arquitetura do PWM do ESP-32WROOM



(ESPRESSIF, 2021)

O microcontrolador ESP32-WROOM possui 16 canais de PWM que são divididos em dois grupos, os canais de alta (**h\_ch**) e os de baixa velocidade (**l\_ch**). A estrutura de

blocos do PWM pode ser vista na Figura 3.9, na qual percebe-se que os canais de alta e de baixa velocidade possuem *timers* distintos. Os *timers* dos canais de alta velocidade podem ter como osciladores as fontes APB\_CLK (80 MHz) e REF\_TICK (1 MHz). Os de baixa velocidade, por sua vez, tem como fontes RTC8M\_CLK ou REF\_TICK, cujas frequências são 8 MHz e 1 MHz, respectivamente. O oscilador do *timer* escolhido e a máxima resolução desejada, afetam a frequência de operação, como pode ser observado na Tabela 3.3. Ao utilizar o canal de alta velocidade com oscilador APB\_CLK de 80 MHz e uma frequência de 10 kHz, obtém-se uma resolução de 12 bits. Tal frequência de oscilação é superior ao valor considerado seguro para humanos, definido na Subseção 2.4.1 (Iluminação artificial LED e suas consequências), de 3kHz (ESPRESSIF, 2021).

Tabela 3.3: Resolução PWM ESP-32WROOM

LEDC Clock Source	LEDC Output (PWM) Frequency	Highest Resolution
APB_CLK (80 MHz)	1 kHz	1/65536 (16 bit)
APB_CLK (80 MHz)	5 kHz	1/8192 (13 bit)
APB_CLK (80 MHz)	10 kHz	1/4096 (12 bit)
RTC8M_CLK (8 MHz)	1 kHz	1/4096 (12 bit)
RTC8M_CLK (8 MHz)	8 kHz	1/512 (9 bit)
REF_TICK (1 MHz)	1 kHz	1/512 (9 bit)

Fonte: (ESPRESSIF, 2021)

Tendo como objetivo verificar o funcionamento do Atuador, são realizados quatro experimentos, cujos valores dos *Duty cycle* do PWM são incrementado do valor mínimo (0) ao máximo (4095), com um incremento de 256 em intervalos de dois segundos entre modificações. A distância distância entre o sensor e os LED é mantida contante me 10 cm durante toda a rodada experimental. A cada incremento, será obtida a média dos valores da iluminação através da utilização do sensor TCS3472-5. O primeiro experimento, cujos resultados estão na Tabela 3.4, consiste na excitação de todos os canais simultaneamente.

Tabela 3.4: Relação entre o *Duty cycle* idêntico em todos os canais e as contagens

<i>Duty cycle</i>	R	G	B	C	<i>Duty cycle</i>	R	G	B	C
0	0	0	0	1	2303	5372	9733	13864	29805
255	140	170	234	608	2559	6204	11288	16056	34531
511	224	382	573	1202	2815	7042	12853	18258	39287
767	737	1279	1881	3985	3071	7872	14428	20476	44053
1023	1394	2446	3560	7585	3327	8705	16009	22698	48824
1279	2130	3769	4547	11648	3583	9535	17597	24935	53616
1535	2912	5190	7461	15991	3839	11160	20708	29338	63004
1791	3719	6668	9550	20501	4095	13403	25383	35575	65532
2047	4543	8188	11693	25124					

Fonte: Autor

O segundo experimento consiste na excitação somente da componente vermelha, resultados presentes na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Relação entre *Duty cycle* Vermelho e contagens

<i>Duty cycle</i>	<b>R</b>	G	B	C	<i>Duty cycle</i>	<b>R</b>	G	B	C
0	<b>0</b>	0	0	1	2303	<b>3283</b>	272	463	3652
255	<b>120</b>	12	17	138	2559	<b>3792</b>	314	536	4218
511	<b>175</b>	15	20	158	2815	<b>4301</b>	357	607	4788
767	<b>460</b>	38	65	512	3071	<b>4811</b>	400	680	5355
1023	<b>864</b>	71	122	961	3327	<b>5323</b>	444	753	5930
1279	<b>1313</b>	108	185	1460	3583	<b>5829</b>	487	825	6493
1535	<b>1788</b>	147	252	1989	3839	<b>6830</b>	572	968	7612
1791	<b>2279</b>	188	321	2535	4095	<b>8158</b>	686	1156	9095
2047	<b>2778</b>	230	392	3091					

Fonte: Autor

O terceiro consiste na excitação da componente verde, cujos dados estão na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Relação entre *Duty cycle* Verde e contagens

<i>Duty cycle</i>	R	G	B	C	<i>Duty cycle</i>	R	G	B	C
0	0	<b>0</b>	0	1	2303	2120	<b>8052</b>	5254	16297
255	30	<b>103</b>	62	252	2559	2472	<b>3980</b>	6122	18993
511	77	<b>296</b>	200	603	2815	2827	<b>10722</b>	7002	21717
767	264	<b>1009</b>	672	2050	3071	3187	<b>12078</b>	7900	24474
1023	513	<b>1957</b>	1292	3967	3327	3549	<b>13437</b>	8798	27254
1279	799	<b>3046</b>	2000	6170	3583	3914	<b>14806</b>	9708	30047
1535	1110	<b>4225</b>	2766	8553	3839	4642	<b>17543</b>	11523	35623
1791	1436	<b>5464</b>	3570	11059	4095	5801	<b>21883</b>	14380	44495
2047	1774	<b>6743</b>	4403	13646					

Fonte: Autor

O quarto consiste na excitação do canal azul, dados presentes na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Relação entre *Duty cycle* Azul e contagens

<i>Duty cycle</i>	R	G	B	C	<i>Duty cycle</i>	R	G	B	C
0	0	0	<b>0</b>	1	2303	151	1731	<b>8583</b>	10719
255	2	32	<b>104</b>	209	2559	176	2004	<b>9954</b>	12430
511	5	78	<b>355</b>	445	2815	202	2281	<b>11338</b>	14165
767	18	246	<b>1163</b>	1455	3071	228	2561	<b>12742</b>	15914
1023	36	456	<b>2198</b>	2747	3327	254	2844	<b>14147</b>	17671
1279	56	690	<b>3362</b>	4200	3583	281	3127	<b>15554</b>	19430
1535	78	939	<b>4606</b>	5751	3839	333	3694	<b>18375</b>	22959
1791	102	1196	<b>5900</b>	7368	4095	417	4480	<b>22397</b>	27985
2047	126	1461	<b>7230</b>	9028					

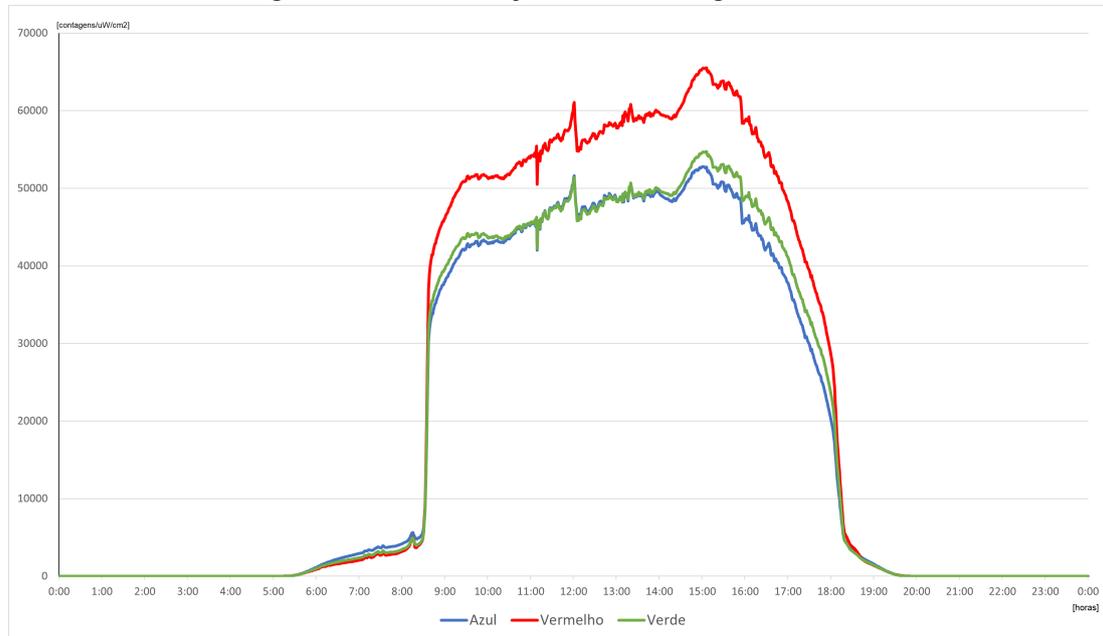
Fonte: Autor

### 3.3 Perfil de iluminação de Referência

A iluminação utilizada como referência consiste em uma réplica da iluminação natural modificada para atender as normas de iluminação de interiores em todos os horários. Adquiriu-se a iluminação natural através da utilização do sensor TCS3472-5, durante 24 horas, com um intervalo de aquisição de 1 minuto, cujos dados estão disponíveis na

Figura 3.10. Utilizou-se uma caixa com uma única abertura voltada para o sul (coordenadas geográficas 29°47'22.0"S 51°09'01.3"W), pela qual a luz poderia entrar através da reflexão em um anteparo branco a 45° de inclinação.

Figura 3.10: Iluminação solar ao longo de um dia

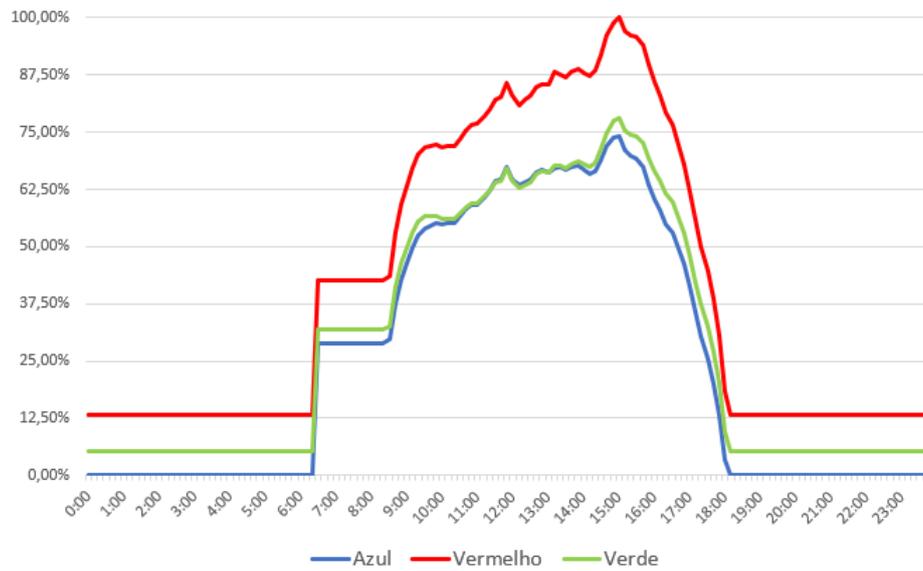


Fonte: Autor

Fez-se a média aritmética a cada 10 valores, assim resultando em três tabelas com 144 pontos, um valor para cada componente a cada 10 minutos. Os valores anteriores às 9h e posteriores às 18h30min foram substituídos pelos primeiros e últimos valores de luz do dia resultando no gráfico presente na Figura 3.11, assim permitindo a utilização do sistema no contrarturno.

Como observado na Seção 2.6, a norma que rege a iluminação de interiores é composta de três fatores, a iluminância média, o IRC e o ofuscamento. O IRC depende da fonte luminosa escolhida e, portanto, não é alterado pelo sistema durante sua operação. Desta forma, se não forem atingidos os requisitos mínimos necessários para o ambiente, deve-se alterar a fonte luminosa por um LED com espectro mais amplo. Os fatores de iluminância média e ofuscamento são modificados ao longo da operação do sistema. O ofuscamento é evitado com a utilização de uma luminária que ou impeça a visada direta ou um anteparo que cause um escurecimento e espalhamento da iluminação, sendo escolhida para o sistema uma chapa opaca. Para calcular a iluminância média, utiliza-se a Equação 3.3 definida no documento AMS (2013) em conjunto com um estado de depuração do sistema com o fim de o usuário determinar se os valores de iluminância média do ambiente são adequados à norma. Tal estado consiste em uma oscilação entre os valores

Figura 3.11: Padrão de iluminação proposto



Fonte: Autor

definidos pelo usuário como máximos e mínimos das fontes luminosas e no envio de mensagens informando a iluminância média em cada configuração. Os valores da referência são escalados de forma que a potência máxima e mínima de cada fonte sejam os valores máximos e mínimos das tabelas.

$$Lux = \frac{(R' \cdot 0,136 + G' \cdot 1 - B' \cdot 0,444) \cdot 310}{AGAIN \cdot ATIME} \quad (3.3)$$

A obtenção do horário para a modificação da referência no momento correto é dada através da utilização do protocolo NTP (*Network Time Protocol*) na inicialização do sistema. A biblioteca utilizada consiste na `esp_snntp` criada pela empresa Espressif (2016 - 2022).

### 3.4 Controlador

O sistema de controle tem como variáveis de interesse as componentes  $R'$ ,  $G'$  e  $B'$ , sendo, portanto, composto de três controladores SISO (*Single Input Single Output*). A determinação dos parâmetros dos controladores é feita utilizando o método VRFT, no elemento do sistema Sintonizador. Tal elemento consiste em um *script* Python que utiliza a biblioteca `pyvrft` descrita no artigo de Boeira e Eckhard (2020).

Assim como verificado na Seção 2.7 (Controle baseado em dados), a primeira etapa para utilização do método VRFT consiste na escolha da classe do controlador (C) e

modelo de transferência ( $T_d$ ), tomando cuidado para garantir a causalidade do controlador. Essa propriedade é garantida para os casos em que o grau relativo do modelo de referência é maior ou igual ao grau da planta ( $G(z)$ ). No caso de o controlador ideal escolhido não pertencer à classe de controladores definida para o método, é possível empregar um filtro ( $L(z)$ ) para garantir tal propriedade. Após a definição de tais fatores, faz-se necessária a obtenção dos valores de  $u$  e  $y$ . Os três controladores possuem classe proporcional integral (PI), como pode ser observado na Equação 3.4.

$$C(z, \rho) = [K_p, K_i] \cdot \left[1, \frac{z}{z-1}\right]^T \quad (3.4)$$

O modelo de transferência projetado está descrito na Equação 3.5. O filtro projetado também segue a equação.

$$T_d = \frac{0.7}{z - 0.3} \quad (3.5)$$

Visando verificar o funcionamento do controle do sistema como um todo, são realizados dois experimentos: o primeiro consiste na aplicação de uma referência e na determinação do tempo de acomodação e *overshoot*; o segundo tem por objetivo a análise da rejeição de uma perturbação em forma de salto introduzida pelo bloqueio do sensor durante uma ou duas amostras. A obtenção dos dados é feita através de *Logs* na serial. Os resultados serão apresentados na Seção 4.2 (Resultados).

### 3.5 Comunicação

A comunicação entre as partes do sistema é feita através da utilização do protocolo MQTT. Para sua implementação são utilizadas as bibliotecas Paho MQTT (Python) e MQTT client (C). O *broker* consiste de um *broker* local (Mosquitto) rodando em um computador com o sistema operacional Ubuntu 20.4. As informações são encapsuladas através da utilização de JSON através das bibliotecas cJSON (C) e JSON (Python). É utilizado um conjunto de seis tópicos no sistema:

1. /topic/lamp1
2. /topic/control1
3. /topic/parameters1
4. /topic/config1

5. /topic/sistem1

6. /topic/sensors1

O primeiro tópicos (/topic/lamp1) possui QoS 0, tendo como objetivo o envio dos dados obtidos pelo sensor para o atuador. Tendo em vista a existência de diversos sensores enviando seus dados para o atuador, é necessário verificar o atraso entre envio e recebimento de tais mensagens. Ao estabelecer tal valor, pode-se determinar o tempo máximo entre o recebimento da primeira mensagem e a espera pelas próximas. Assim, deixa-se de fixar o número de sensores e se permite o funcionamento do sistema com uma quantidade variável. Os itens e tipos de variáveis deste tópico estão dispostos na lista abaixo:

- **ID** consiste na identificação do sensor que envia a mensagem e tem seu tipo como **uint8** permitindo até 256 sensores;
- **RED, GREEN, BLUE e CLEAR** consistem nas contagens, em  $\mu W/cm^2$ , dos canais Vermelho, Verde, Azul e Sem filtro do sensor, tendo seus tipos **uint16**;

O segundo tópico (/topic/control1) tem por objetivo o envio dos valores das entradas ( $u$ ) e saídas ( $y$ ) das três plantas para o cálculo dos parâmetros dos três controladores através do método VRFT no *script* em Python. Cada mensagem enviada no tópico consiste de uma batelada de valores. Esse tópico também possui QoS 0, mas pode ser modificado para QoS 2 a fim de garantir integridade no envio dos dados, uma vez que os atrasos nesse tópico não afetam a temporização do sistema. A estrutura das mensagens deste tópico é a seguinte:

- **U\_RED, U\_GREEN e U\_BLUE** consistem nos valores de entrada da planta (*Duty cycle* do PWM). Como observado na Seção 3.2 (Atuador), a resolução do PWM para a frequência escolhida é de 12 bits, logo o tipo da mensagem é **uint16**;
- **Y\_RED, Y\_GREEN e Y\_BLUE** consistem nas contagens dos três canais com a remoção de infravermelho e possuem seu tipo como **uint16**.

O terceiro tópico (/topic/parameters1) refere-se ao envio, pelo *script* em Python, dos parâmetros  $k_p$  e  $k_i$  dos três controladores para o controlar/atuador. Assim como o tópico anterior, o QoS utilizado é 0, mas pode ser modificado para 3 a fim de garantir o recebimento dos parâmetros. O *script* em Python aguarda a chegada de 30 mensagens para então calcular os parâmetros e enviá-los. Devido à biblioteca cJSON não desempacotar valores *float*, todos os parâmetros são arredondados para três casas depois da vírgula e são multiplicados por 1000 antes de serem enviados. Esse tópico possui a seguinte

estrutura:

- **rho0\_r** e **rho1\_r** consistem nos parâmetros  $k_p$  e  $k_i$  do controle da cor vermelha, possuindo tipo **uint16**;
- **rho0\_g** e **rho1\_g** consistem nos parâmetros  $k_p$  e  $k_i$  do controle da cor verde, possuindo tipo **uint16**;
- **rho0\_b** e **rho1\_b** consistem nos parâmetros  $k_p$  e  $k_i$  do controle da cor azul, possuindo tipo **uint16**.

O quarto tópico (`/topic/config1`) é utilizado pelo usuário para definir as restrições máximas e mínimas de iluminância do sistema e a continuidade do estado de depuração da iluminação. Esse tópico utiliza uma QoS de 0 e possui a seguinte estrutura:

- **MAX** e **MIN** consistem nos valores máximos e mínimos que a iluminação do sistema pode atingir. Os dados representam percentagens e possuem tipo **uint8**;
- **confirma** consiste na confirmação dos valores escolhidos; uma vez sendo verdadeiro, o sistema sai do estado de depuração e passa para a aquisição dos dados da planta; possui tipo **boolean**.

O quinto tópico (`/topic/sistem1`) é utilizado pelo consumidor/atuador para enviar os valores máximos e mínimos da média dos sensores de iluminância para o usuário poder ajustar os parâmetros do tópico anterior (`/topic/config1`). O *script* em Python está cadastrado nesse tópico e, ao receber uma mensagem, ele mostra no terminal os valores obtidos. Esse tópico utiliza uma QoS de 0 e possui a seguinte estrutura:

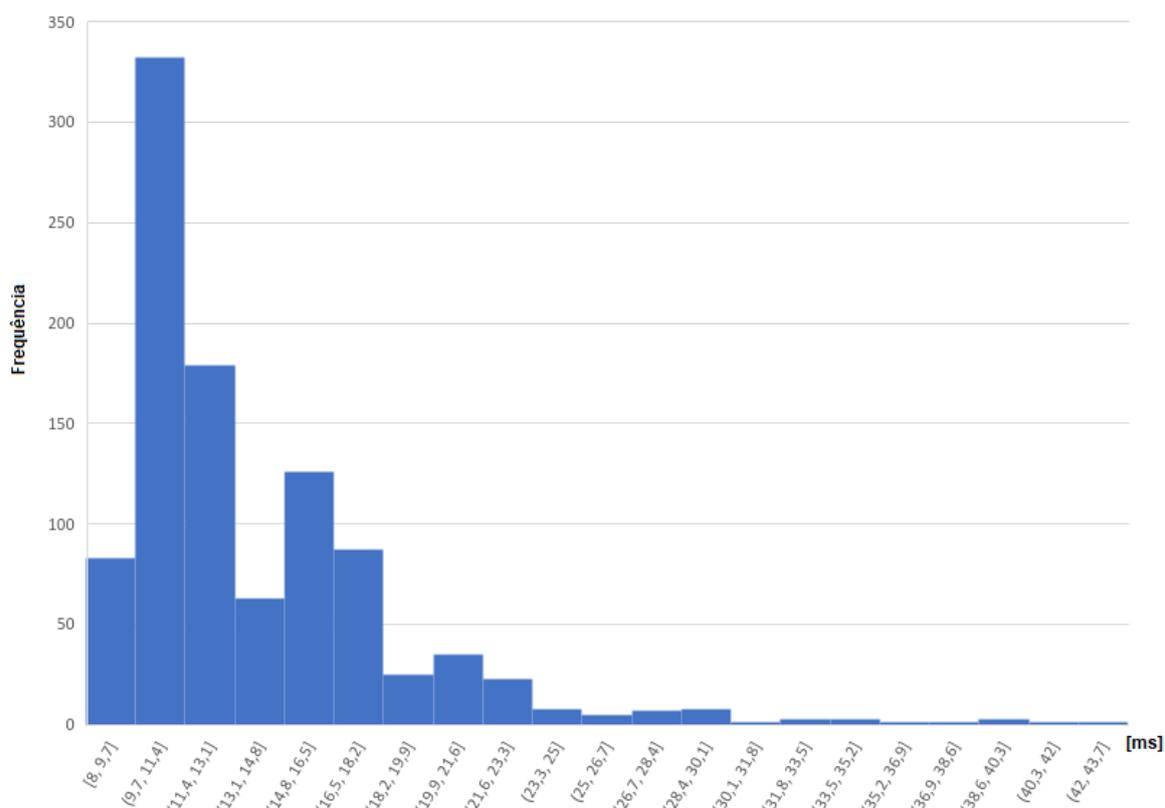
- **lux\_max** indica a iluminância máxima obtida pela média espacial dos sensores e possui tipo **uint16**;
- **lux\_min** indica a iluminância mínima obtida pela média espacial dos sensores e possui tipo **uint16**.

O sexto tópico (`/topic/sensors1`) é utilizado pelo consumidor/atuador para ativar ou reiniciar os sensores. O tópico possui QoS de 0, assim permitindo uma maior sincronia entre os sensores, e possui a seguinte estrutura:

- **reset** consiste no comando para reinício dos sensores, permitindo assim uma res-sincronização dos sensores e tem seu tipo como **boolean**;
- **start** consiste no comando para o início da aquisição dos sistema, desbloqueando as tarefas do *publisher* MQTT e do sensor TCS, tendo seu tipo definido como **boolean**.

Os atrasos de envio das mensagens no tópic `/topic/lamp1` impactam no tempo de resposta do sistema. Os atrasos da primeira mensagem afetam o início do intervalo de espera e posterior cálculo e aplicação do controle. Os atrasos entre mensagens influenciam o valor do intervalo com que o sistema aguarda as demais mensagens do mesmo lote. Por isso, verifica-se o tempo de envio e recebimento das mensagens através da utilização de *logs* enviados pela serial, com uma resolução de ms. São realizados três experimentos, nos quais são enviadas e recebidas 2000 mensagens, analisando seus atrasos médios e desvio padrão amostral.

Figura 3.12: Histograma do atraso entre envio e recebimento de uma mensagem



Fonte: Autor

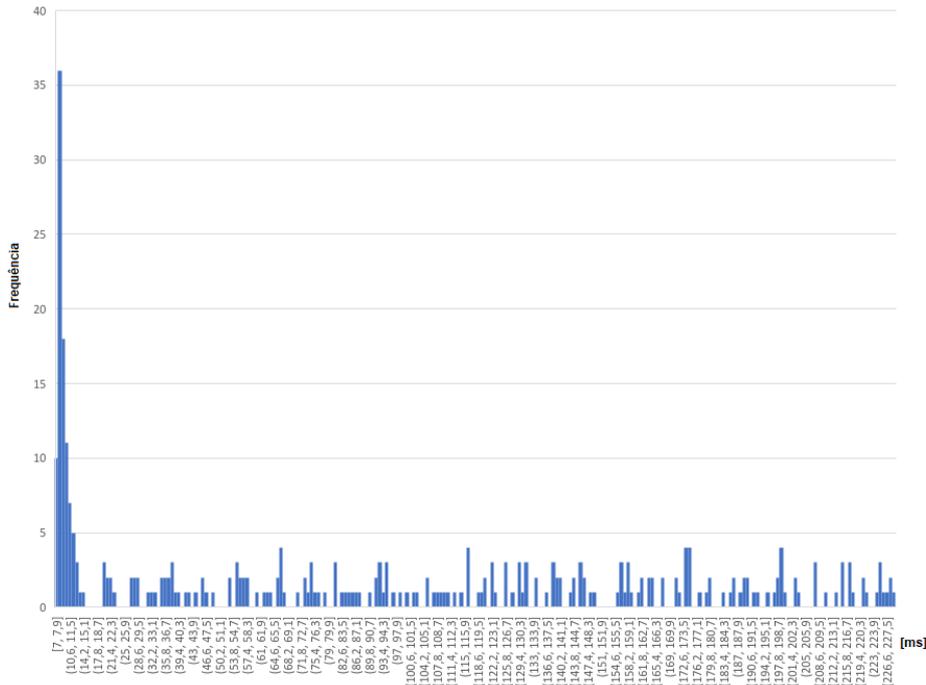
O primeiro experimento visa determinar o atraso entre o envio de uma mensagem pelo sensor e o recebimento pelo controlador/atuador. A análise do atraso de uma mensagem pode ser observada no histograma presente na Figura 3.12, cuja a média é 14,0 ms e o desvio padrão amostral 5,7 ms.

O segundo experimento consiste na análise dos atrasos entre mensagens, ao utilizar dois sensores. O histograma de tais atrasos está presente na Figura 3.13, em que obteve-se os valores de média 89,5 ms e de desvio padrão amostral de 73,2 ms.

O terceiro experimento consistiu em utilizar três sensores e verificar o atraso entre a primeira e a terceira mensagem recebida. A Figura 3.14 consiste no histograma de tais

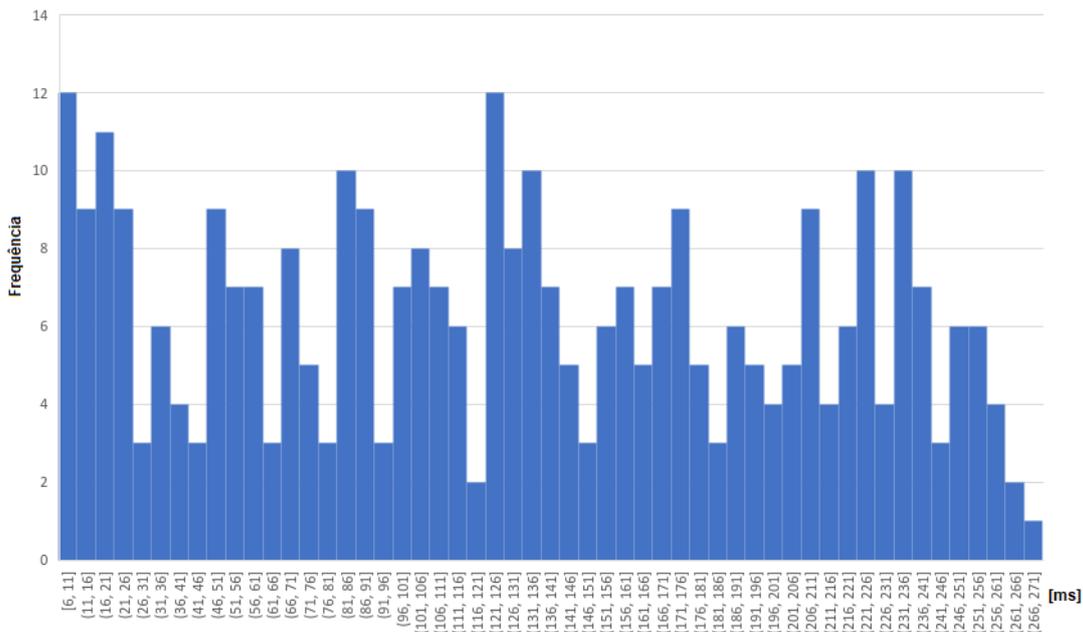
valores. A média de tais valores consiste em 129,5 ms e desvio padrão amostral de 75 ms. Utilizando tais valores pode-se determinar a janela de espera entre mensagens do mesmo lote. Como a distribuição se assemelha a uma distribuição retangular, definiu-se o valor de atraso máximo como 280 ms, valor superior ao maior valor obtido.

Figura 3.13: Histograma do atraso entre o recebimento de 2 mensagens



Fonte: Autor

Figura 3.14: Histograma do maior atraso entre o recebimento de 3 mensagens



Fonte: Autor

### 3.6 Síntese das especificações

Como especificado ao longo desse capítulo, o sistema é composto de três partes: um sistema de aquisição de dados periódicos, formado por até quatro sensores e micro-controladores; um *script* em Python, responsável pela determinação dos parâmetros da planta e configuração dos valores de iluminação do sistema, e um sistema de controle e atuação composto por um microcontrolador, três LED e três *drivers*.

O sensor TCS3472-5 é configurado para permitir maior frequência de aquisição com maior resolução possível, logo tendo um tempo de integração de 154ms (ATIME = 0xC0) e estado de espera desabilitado (WEN = 0). Como o sistema visa controlar a iluminação de ambientes internos, onde a iluminação sempre será elevada, o ganho utilizado é de uma vez (AGAIN = 0x00). Na documentação técnica, o fabricante indica a remoção do restante da componente infravermelha para aumentar a precisão do sistema através da utilização do canal *Clear*. Para garantir a validade dos dados obtidos e máxima frequência de aquisição, determinou-se experimentalmente um atraso de 160 ms entre amostras. Tal atraso é inferior ao necessário, uma vez que este deve ser maior que a soma do tempo no qual o sistema de Controle/Atuação aguarda (280 ms) e descarta (70 ms) as mensagens, resultando em um atraso de 350 ms entre aquisições.

Como fonte luminosa são utilizados três LED com comprimentos de onda central de 452 nm (azul), 520nm (verde) e 620 nm (vermelho) e dispersões desconhecidas. Para seu acionamento, utiliza-se um *driver* PWM para cada fonte. O PWM é configurado para 12 bits e 10 kHz. Verificou-se o funcionamento do sistema de atuação através da obtenção dos valores do sensor TCS3472-5 para as diversas configurações de *Duty cycle*.

Como valores de referência para o sistema de controle, utilizou-se a iluminação solar. São adquiridas 1440 amostras de iluminação ao longo de um dia (24 horas) com a utilização do sensor TCS3472-5. É feita a média a cada 10 amostras para obter uma tabela com 144 valores, cujos itens iniciais e finais do dia são modificados para adequarem-se às normas de iluminação.

Utiliza-se o método VRFT em conjunto com a biblioteca *pyvrft* para a determinação dos três controladores PI, independentes. Realiza-se experimentos para a verificação do tempo de acomodação, *overshoot* e análise de rejeição a perturbações do tipo salto para o sistema como um todo.

Para a comunicação entre as partes do sistema é utilizado o protocolo MQTT. Ao coletar os atrasos entre os envios dos dados dos sensores e os recebimentos no sistema de

controle, verifica-se um pequeno atraso entre o envio e o recebimento da primeira mensagem dos sensores pelo Atuador. Ao analisar o atraso entre o recebimento das mensagens no Controlador/Atuador, são obtidos valores bem elevados. Tais valores são utilizados como parâmetros para a especificação do tempo máximo de espera no Controlador/Atuador, sendo este definido como 280 ms. Um resumo de tais especificações encontram-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Especificações obtidas no capítulo

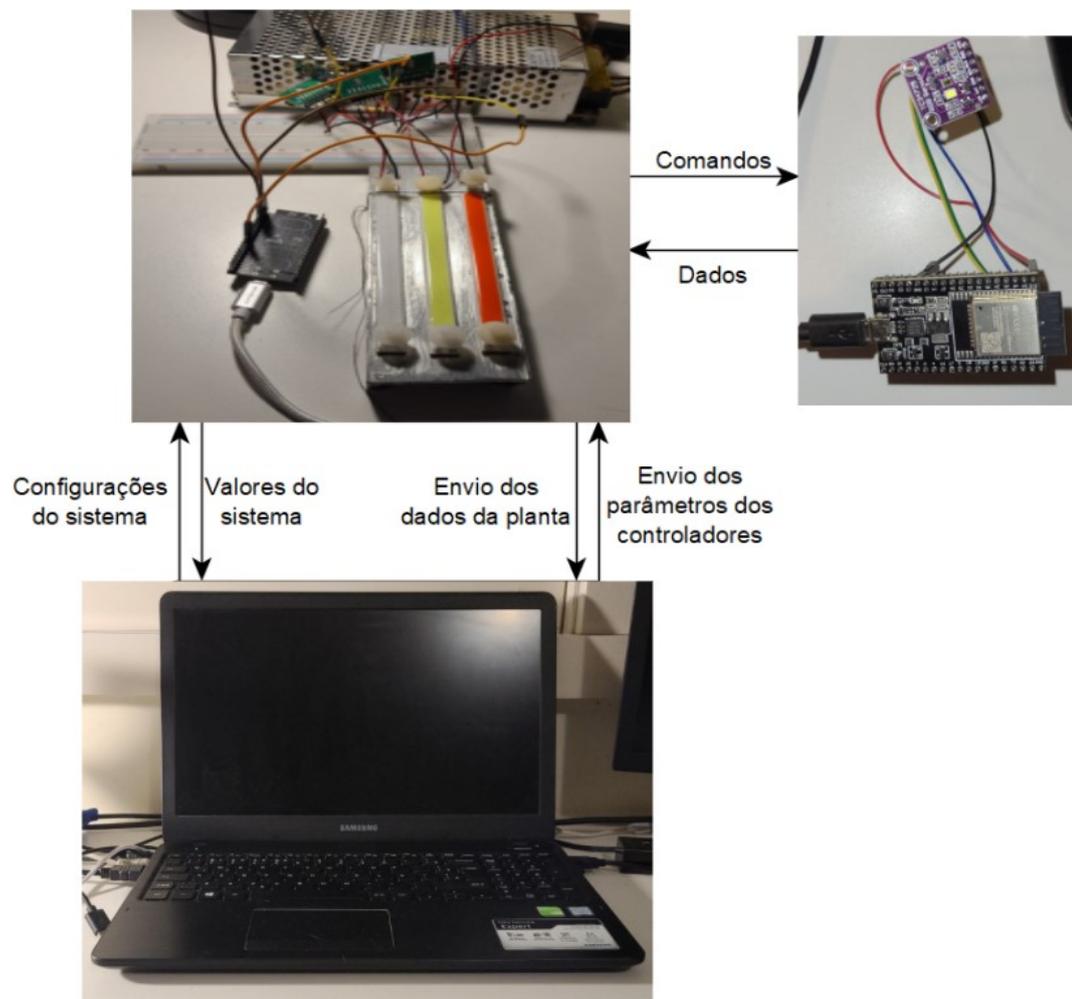
<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Fonte luminosa	LED
Quantidade de fontes luminosas	Três (RGB)
Método de <i>Dimming</i>	PWM
Acionamento dos LED	Driver Buck
Frequência do <i>Dimming</i>	10 KHz
Luminária	Chapa opaca
Microprocessador	ESP32 WROOM
Atraso máximo entre mensagens	280 ms
Sensor	TCS3472-5
Tempo de integração	154 ms
Atraso entre amostras	350 ms
Ganho do ADC	1X
Método de controle	VRFT
Classe do controlador	PI
Taxa de atualização	A cada amostra

Fonte: Autor

## 4 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados a implementação e os resultados do sistema como um todo. A implementação foi dividida em quatro subseções, nas quais as três primeiras descrevem o funcionamento das partes individuais do sistema e a quarta descreve a temporização do sistema, enfatizando a relação entre os Sensores e o Controlador/A-tuador. A seção dos resultados, contempla sobre as respostas do sistema aos ensaios de seguimento referência e rejeição de perturbações. A conexão e interação entre as partes individuais do sistema pode ser observada na Figura 4.1.

Figura 4.1: Conexões do sistema completo

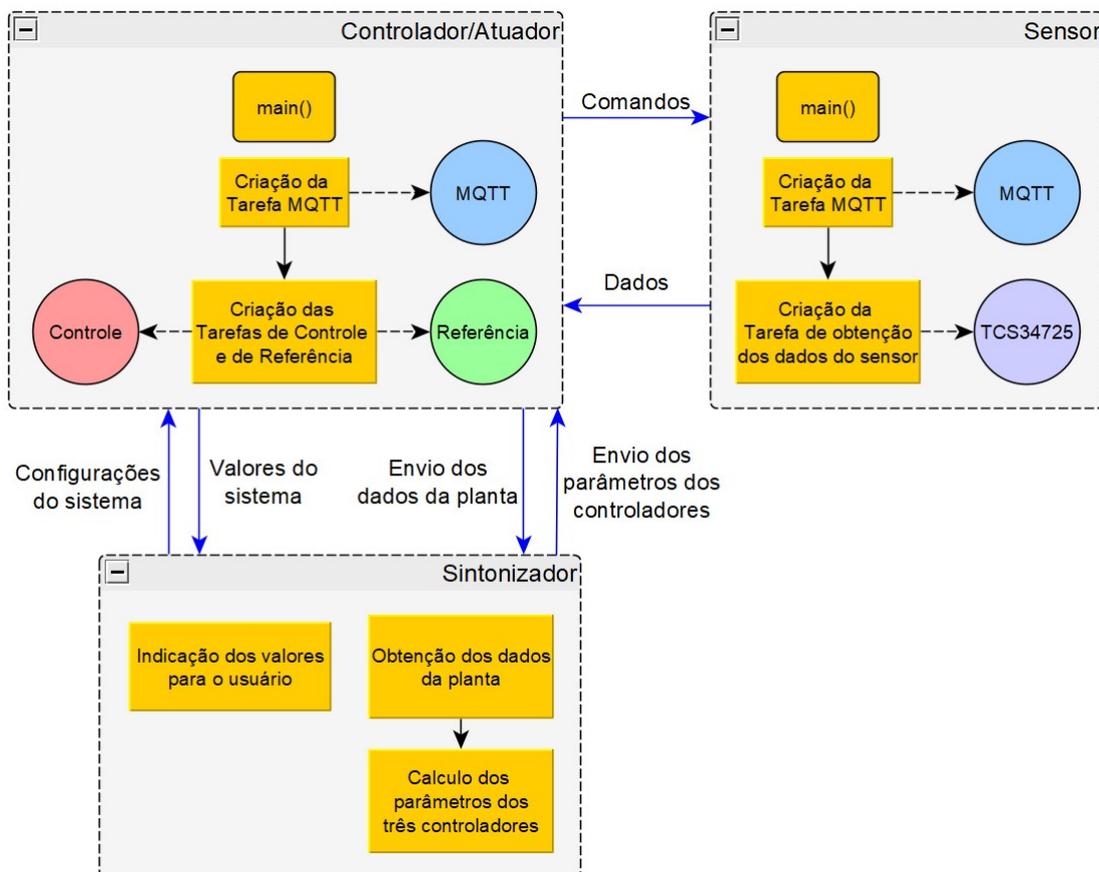


Fonte: Autor

## 4.1 Implementação do sistema

A implementação do sistema se dá através da divisão do sistema em três partes fisicamente distintas. A relação entre as partes se dá pela comunicação do controlador/atuador com os sensores e com o sintonizador. A implementação deste sistema utiliza o protocolo MQTT, conforme pode ser observado na Figura 4.2. A comunicação do controlador/atuador com os sensores é realizada através do envio de comandos e no recebimento dos dados. A comunicação entre o controlador/atuador e o sintonizador ocorre com dois objetivos: a configuração dos limites de operação e obtenção dos valores de iluminância correspondentes, e o envio dos dados da planta e recebimento dos parâmetros do controlador. A figura também indica as tarefas e funções que são realizadas em cada uma das partes. Os círculos representam as tarefas, e os quadrados, as funções.

Figura 4.2: Fluxo simplificado do sistema



Fonte: Autor

O controlador/atuador é responsável por: coordenar os sensores (enviando comandos para iniciar a aquisição ou para reiniciar); enviar os dados da planta para o Sintonizador; gerar o sinal de controle, e atuar na iluminação. Os sensores aguardam comandos

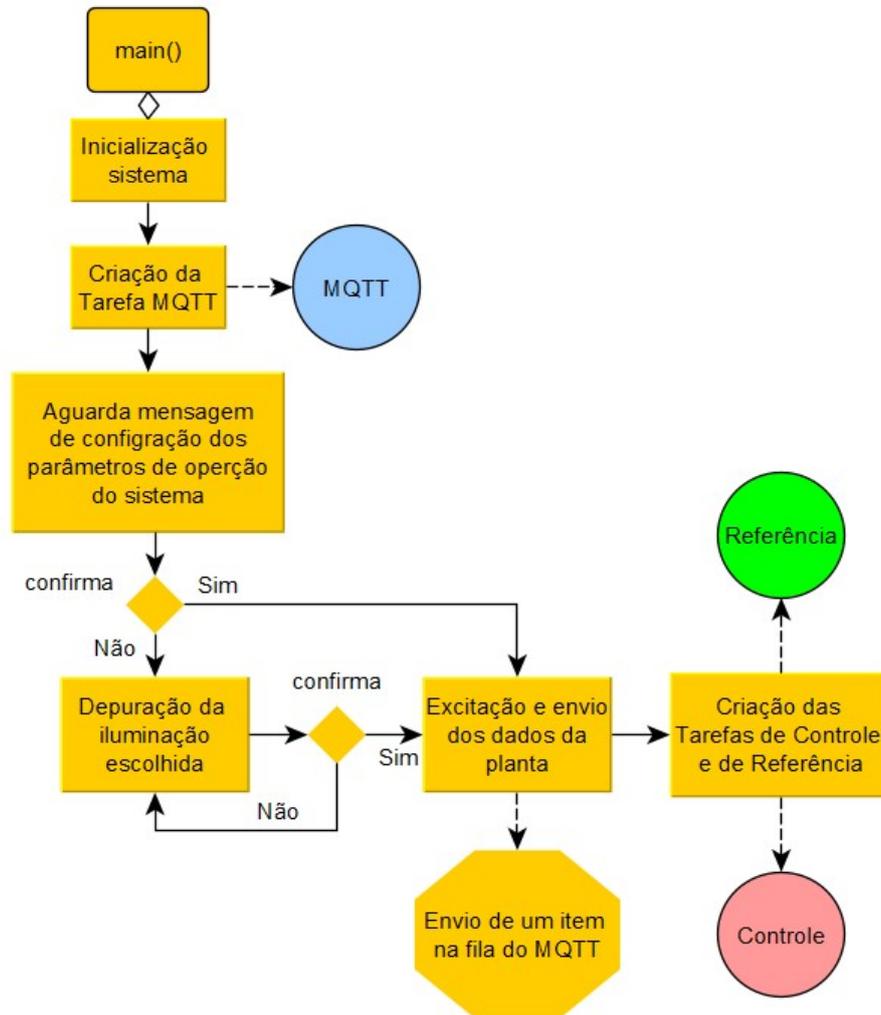
do controlador/atuador e enviam os dados da iluminação. O Sintonizador tem como objetivo: definir os valores máximos e mínimos do *Duty cycle* do PWM, assim ajustando a iluminação para parâmetros adequados e confortáveis para o usuário; indicar os valores definidos para a iluminância do sistema para o usuário verificar se suas configurações estão adequadas com os valores mínimos de iluminância para aquele ambiente; e calcular e realizar o envio dos parâmetros do controlador.

#### 4.1.1 Controlador/Atuador

A Figura 4.3 indica o funcionamento da função `main()` do controlador/atuador. Ao iniciar o sistema, o microcontrolador verifica a integridade de sua memória e inicializa o Wi-Fi como *access point*. Ao inicializar o Wi-Fi e obter o IP por DHCP, cria-se a tarefa responsável pela publicação das mensagens (“MQTT”). Nesta tarefa, representada na Figura 4.4, é feita a configuração do cliente MQTT, registro da função responsável pelo tratamento das interrupções (*event handler*) do MQTT e, ao finalizar, a tarefa bloqueia-se, aguardando o recebimento dos dados da planta para a publicação através da fila “xQueueControl”.

Ao ser registrada a função responsável pelo tratamento das interrupções do MQTT, o sistema fica aguardando por uma mensagem no tópico “/topic/config1” especificando as restrições de iluminação através da fila “xQueueConfig”. Enquanto não ocorrer o recebimento de uma mensagem com o item “confirma” como 1, o sistema fica oscilando a cada 2 segundos, entre os limites definidos, e envia pelo tópico “topic/sistem1” os valores de iluminância obtidos para o sistema. Ao confirmar a escolha dos valores, o sistema então envia a mensagem `start:1` no tópico “/topic/sensors1”, iniciando a aquisição dos sensores e aguarda o primeiro lote de mensagens para começar a identificação da planta.

No bloco “Excitação e envio dos dados da planta”, o sistema fica aguardando a primeira mensagem dos sensores e, ao receber-la, inicia um *Timer* de 280 ms como janela para o recebimento das demais mensagens. Após o recebimento de todas as mensagens ou o estouro do *Timer*, é bloqueado o recebimento pelos próximos 70 ms e são enviados os dados para o Sintonizador pelo tópico “/topic/control1”. Só ocorre a mudança do valor de *Duty cycle* aplicado na iluminação com o recebimento das mensagens de todos os sensores ou como a interrupção do *Timer*. São aplicados três conjuntos de 30 valores de *Duty cycle* para a obtenção das características da planta, um para cada canal. Tais valores são estruturados de forma a ocorrer a excitação individual dos canais, uma vez que os

Figura 4.3: Fluxo da função `main()` do Controlador/Atuador

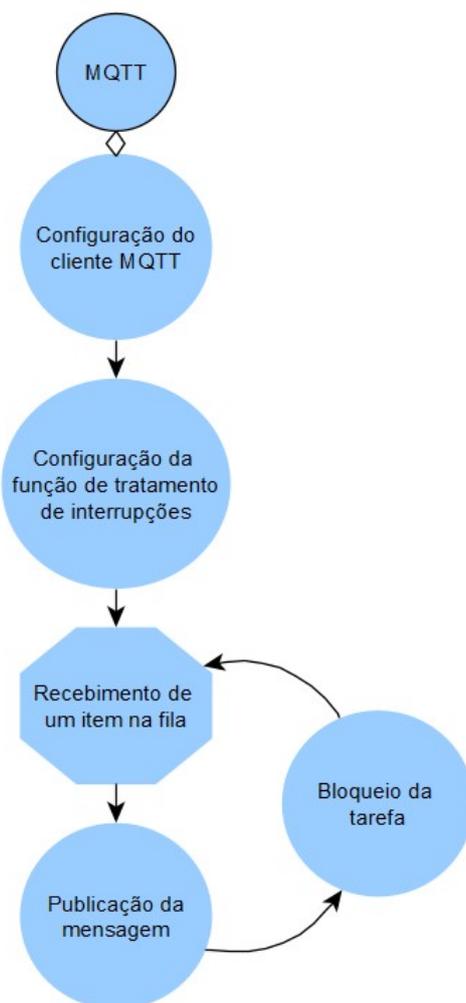
Fonte: Autor

controladores são SISO. Ao executar os 30 valores de referência, o sistema então cria as tarefas Referência e Controle, apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6.

A tarefa “Referência” (Figura 4.5) tem por objetivo a obtenção dos três valores de referência, em contagens, normalizados pelos valores máximos e mínimos do sistema, para o horário atual. A tarefa configura a conexão com o servidor “pool.ntp.org”, o fuso horário e faz a requisição do horário atual; verifica em qual divisão, de 10 minutos, o horário atual se encaixa e obtém da tabela as referências para essa divisão do dia; envia as referências através da fila “xQueueReference”, e se bloqueia até atingir tempo para a próxima requisição, em 10 minutos.

A tarefa “Controle” (Figura 4.6) consiste na tarefa responsável pelo cálculo do controle e a atuação na planta. A tarefa fica suspensa aguardando o recebimento dos parâmetros dos controladores vindos do Sintonizador no tópico “/topic/parameters1” através da fila “xQueueParameters”. Ao receber, tais parâmetros, então aguarda os valores das

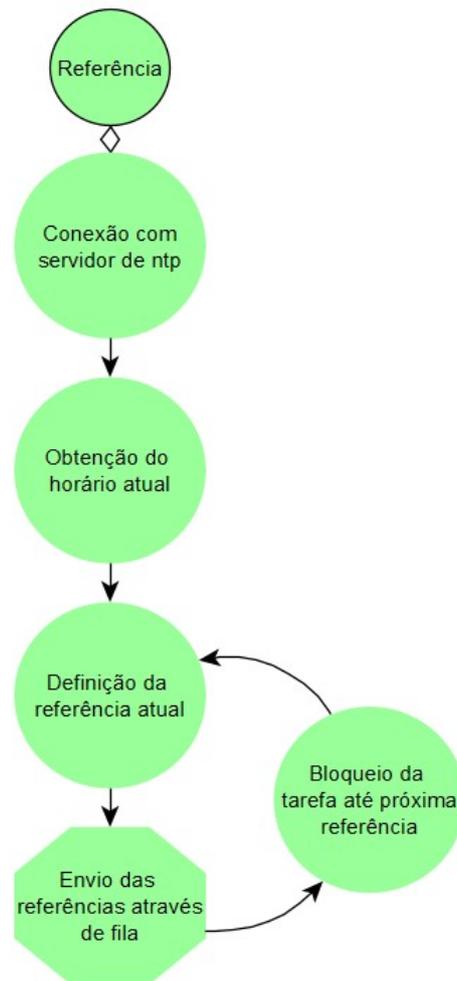
Figura 4.4: Fluxo da tarefa de publicação MQTT do controlador



Fonte: Autor

três referências através da fila “xQueueReference”. Ao receber todos os itens necessários, bloqueia-se, aguardando a primeira mensagem do lote; com seu recebimento, inicia-se um *Timer* de 280 ms para o recebimento das demais mensagens. Ao receber uma mensagem, aplica-se o filtro de IR (Equação 3.2), modifica-se o sinalizador de recebimento daquele sensor e incrementam-se as variáveis comuns entre os sensores. Ao receber todas as mensagens ou estourar o *Timer*, a tarefa sinaliza para o *handler* MQTT que não devem ser mais tratadas mensagens no tópico “topic/lamp1” por 70 ms. A tarefa verifica quantos sensores enviaram suas mensagens e calcula o erro atual de cada componente, ao subtrair a variável incrementada por cada sensor dividida pelo número de sensores da referência obtida pela tarefa “Referência”. É calculado o valor de controle, verifica-se se o valor está dentro dos limites máximos e mínimos de atuação e aplica-se nos LED. Caso alguma das componentes tenha um erro maior que 10%, inicia-se uma contagem a cada execução; se o erro persistir por 10 amostras, o sistema, ao aplicar os valores do controle, também

Figura 4.5: Fluxo da tarefa de referencia do controlador



Fonte: Autor

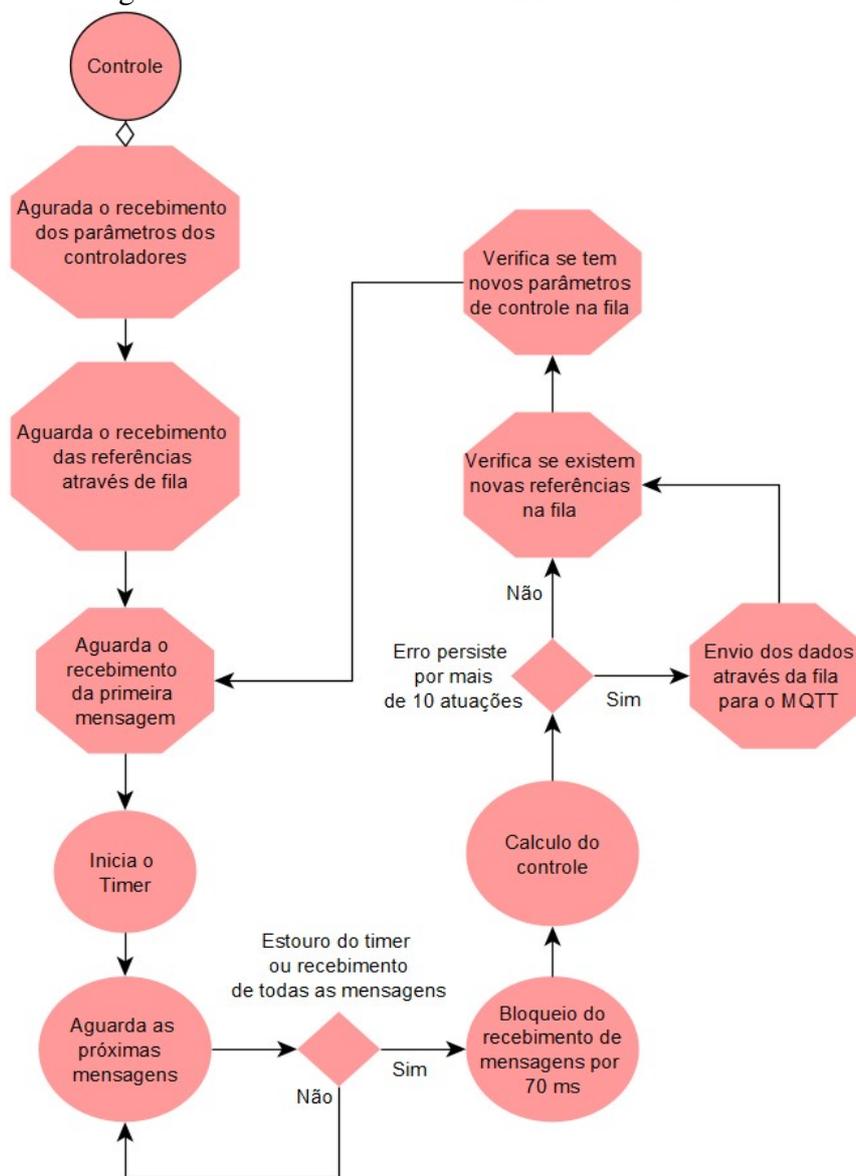
envia mensagens para o tópico “topic/control1” com os valores de  $u$  e  $y$  para fazer uma nova sintonia. Ao enviar 30, o sistema para de enviar e aguarda o erro ficar menor que 10% para habilitar tal função novamente. Finalizando a aplicação do controle, o sistema verifica nas filas se existe novo valor de referência e novos parâmetros; caso existam, os parâmetros são atualizados.

#### 4.1.2 Sensores

O funcionamento do sensores está descrito na Figura 4.7. A inicialização do sistema consiste na verificação da memória interna e inicialização do Wi-Fi no modo *Station*. Após a inicialização, cria-se a tarefa do MQTT e a de obtenção dos dados (TCS34725).

A tarefa MQTT é responsável pela configuração do cliente MQTT e pelo envio dos dados no tópico “topic/lamp1”. Ao iniciar, configura-se o cliente MQTT e a função de

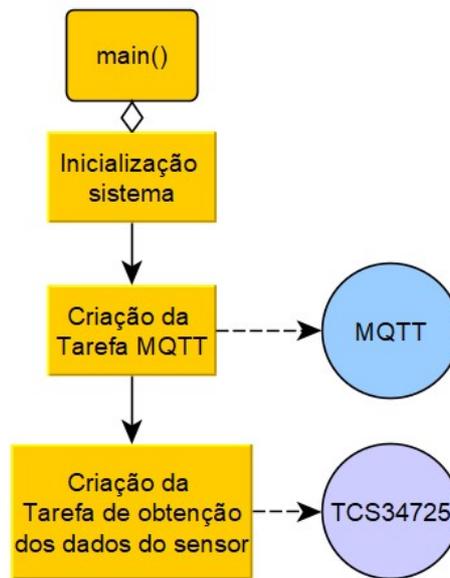
Figura 4.6: Fluxo da tarefa de controle do controlador



Fonte: Autor

tratamento de interrupções; então, suspende-se, aguardando o recebimento da mensagem `start:1` no tópico `“topic/sensors1”` para sair do estado de suspensão e aguardar os dados na fila `“xQueue”`. Ao receber um valor na fila, a tarefa publica-o e fica, em bloqueio, aguardando um novo. Caso seja recebida a mensagem `reset:1` no tópico `“topic/sensors1”`, o sistema então é reiniciado, forçando a resincronização dos sensores.

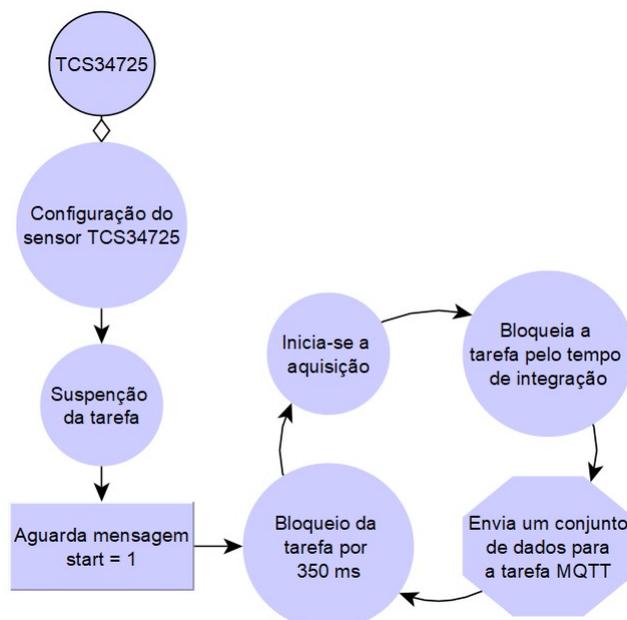
A tarefa `“TCS34725”` é responsável pela obtenção dos dados de iluminação, o seu envio pela fila `“xQueue”` e a temporização do sistema. Ao iniciar, a tarefa configura o sensor com os parâmetros de tempo de integração e ganho e suspende-se, aguardando a mensagem `start:1` no tópico `“topic/sensors1”`. Ao receber a mensagem `start:1`, a tarefa entra no estado pronta e se bloqueia por 350 ms. Finalizando o tempo de bloqueio, a tarefa

Figura 4.7: Fluxo da função `main()` do sensor

Fonte: Autor

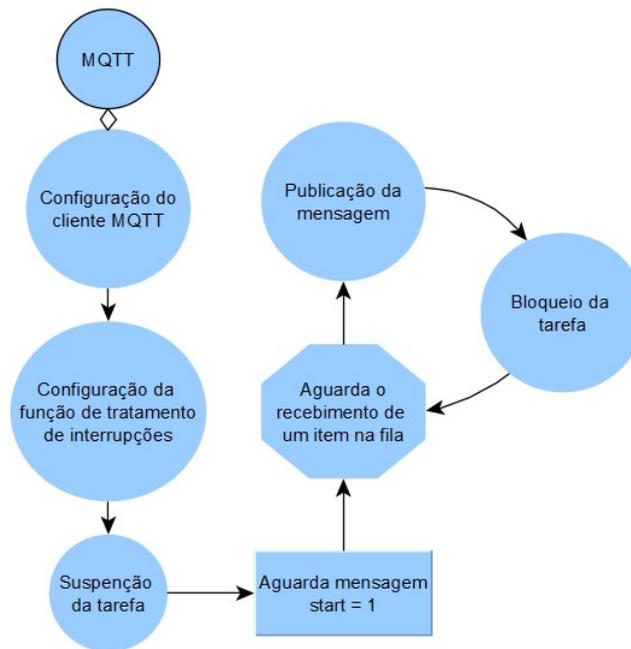
inicia a aquisição dos dados e se bloqueia novamente pelo tempo configurado como de integração. Ao expirar esse tempo, a tarefa envia os dados para a “MQTT” e se bloqueia outra vez pelo tempo entre aquisições (350 ms).

Figura 4.9: Fluxo da tarefa TCS34725



Fonte: Autor

Figura 4.8: Fluxo da tarefa de publicação MQTT do sensor

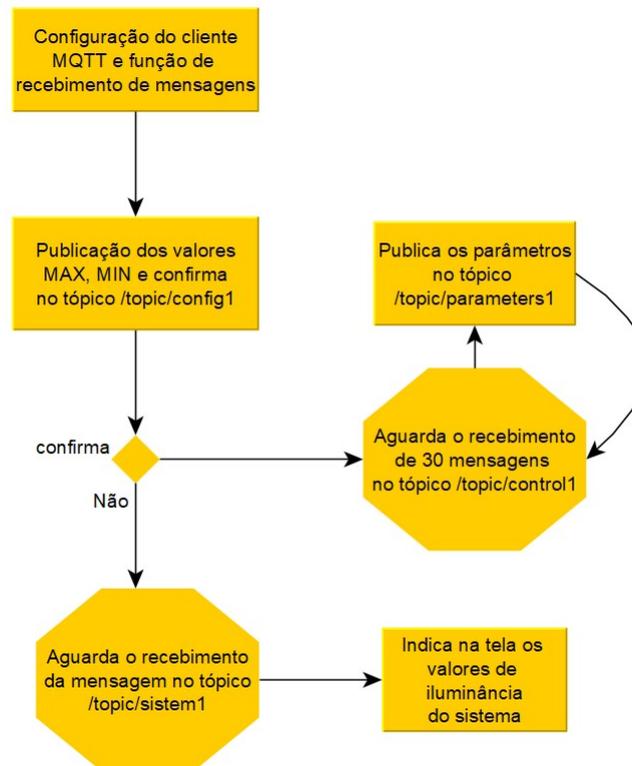


Fonte: Autor

### 4.1.3 Sintonizador

O sintonizador consiste em um *script* em Python executado no computador no qual esta rodando o *broker* MQTT. A Figura 4.10 demonstra a estrutura de funcionamento deste programa, que tem dois objetivos: a configuração da iluminação do sistema e no cálculo dos parâmetros dos controladores. Ao iniciar o programa, são passados, como parâmetros obrigatórios, os valores MAX, MIN e confirma. Configura-se a função de tratamento/recebimento de novas mensagens e o cliente MQTT. Configurado o cliente, publica-se os parâmetros de entrada no tópico “/topic/config1”; caso o valor de “confirma” seja falso, o programa aguarda a mensagem no tópico “/topic/sistem1”, indica os valores através de logs na tela e encerra o código. Se o valor for verdadeiro, o programa aguarda o recebimento de 30 valores da planta – separando as excitações individuais – para calcular os parâmetros dos três controladores e publicá-los no tópico “/topic/parameters1”. Ao finalizar o envio, o programa aguarda novas mensagens, reiniciando o ciclo. Os parâmetros  $T_d$ ,  $C$  e  $L$  são definidos neste código.

Figura 4.10: Fluxo de funcionamento do Sintonizador



Fonte: Autor

#### 4.1.4 Fluxo temporal do sistema

Essa subseção tem como objetivo ressaltar a temporização da comunicação entre os diversos Sensores e o Controlador/Atuador no momento em que está ocorrendo a obtenção dos dados da planta e quando o sistema está controlando a iluminação. A Figura 4.11 demonstra um exemplo de interação entre dois sensores e o Controlador/Atuador. Como disposto na figura, a comunicação inicia com o controlador sinalizando o início da aquisição e então aguardando pela primeira mensagem, podendo aguardar até  $2^{32}$  segundos (49,7 dias). Ao receber o comando, ambos sensores começam sua rotina de aquisição de dados que consiste em um bloqueio por 350 ms, seguido pela integração da luz ambiente (154 ms, na configuração atual) e posterior envio dos dados. Ao receber a primeira mensagem de um dos sensores, o Controlador/Atuador passa a aguardar por 280 ms o recebimento das próximas. Como o sistema está com somente dois sensores, o Controlador/Atuador continua a aguardar as próximas mensagens até terminar o período. Finalizando o tempo, o Controlador/Atuador deixa de tratar as mensagens recebidas no tópico “/topic/lamp1” por 70 ms, enquanto calcula e atua na iluminação (aproximadamente 10 ms). Como pode ser percebido, a atuação na iluminação ocorre antes dos Sensores

começarem a nova aquisição de dados, com um intervalo de 60 ms.

Figura 4.11: Fluxo temporal do sistema com dois sensores

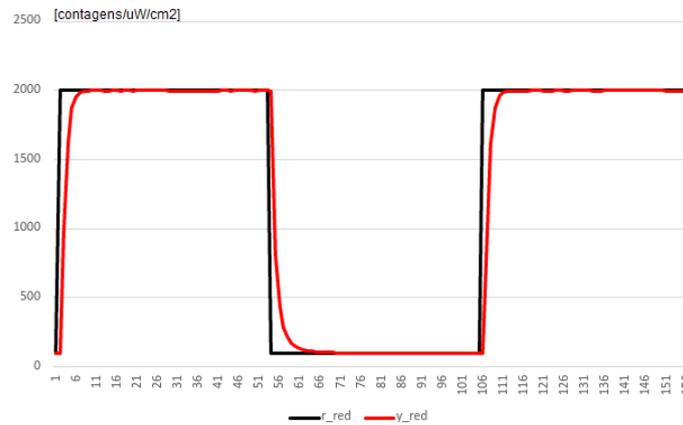


Fonte: Autor

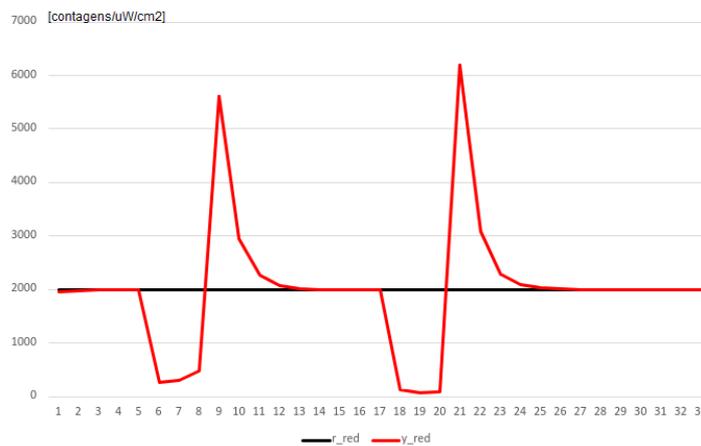
## 4.2 Resultados

Visando determinar o comportamento do sistema em diversas situações distintas, obteve-se três conjuntos de gráficos. Um responsável por demonstrar as respostas individuais dos controladores às mudanças de referência e as perturbações, mantendo a referência dos demais constantes em zero. Outro, tem o objetivo de indicar a resposta do sistema, ao definir as três referências com o mesmo valor e o comportamento do mesmo a rejeição de perturbações. O último visa a demonstrar as três respostas individuais ao definir valores de referência distintos. Define-se a variação de 5% do valor de referência como valor de regime permanente.

Figura 4.12: Resposta ao controle individual no canal Vermelho



(a) Resposta a um salto



(b) Análise de rejeição a perturbações

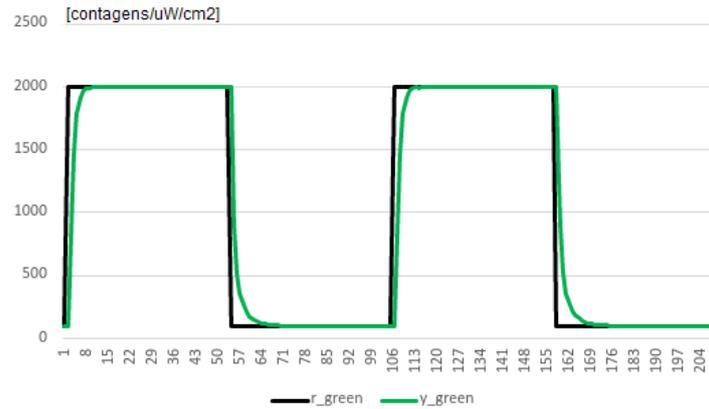
Fonte: Autor

A Figura 4.12a demonstra a resposta do controle para o canal vermelho, cujo atraso obtido é de 4 amostras e não existe *Overshoot*. A Figura 4.12b demonstra a resposta do controle vermelho à perturbação causada pelo bloqueio do único sensor utilizado no experimento. Foram realizados dois bloqueios nesse conjunto de dados, um entre as amostras 6 e 8 e o outro entre a 18 e 20. Para ambos os bloqueios, obteve-se um atraso de 3 amostras.

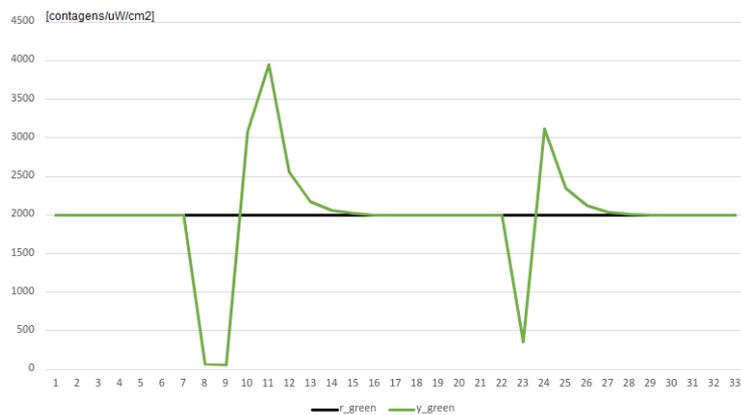
A Figura 4.13a demonstra a resposta do controle para o canal verde, cujo atraso obtido é de 5 amostras e não existe *Overshoot*. A Figura 4.13b demonstra a resposta do controle verde à perturbação causada pelo bloqueio do único sensor utilizado no experimento. Foram realizado dois bloqueios nesse conjunto de dados, um entre as amostras 8 e 9 e o outro na 23. Para ambos os bloqueios, obteve-se um atraso de 4 amostras.

A Figura 4.14a demonstra a resposta do controle para o canal azul, cujo atraso obtido é de 5 amostras e não existe *Overshoot*. A Figura 4.13b demonstra a resposta do

Figura 4.13: Resposta ao controle individual no canal Verde



(a) Resposta a um salto



(b) Análise de rejeição a perturbações

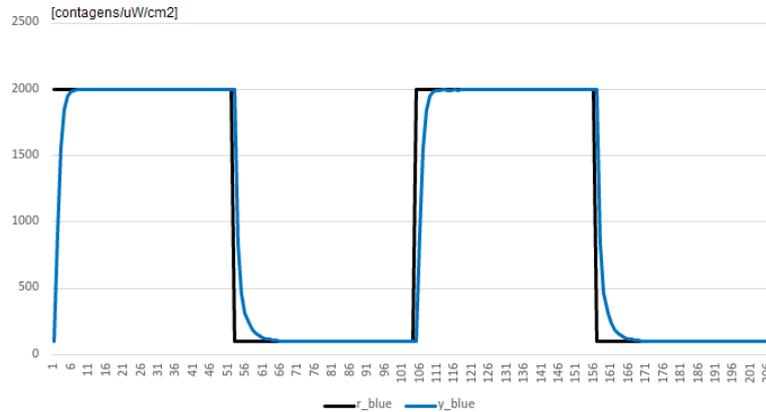
Fonte: Autor

controle verde á perturbação causada pelo bloqueio do único sensor utilizado no experimento. Foi realizado um bloqueio na amostra 10 e obteve-se um atraso de 4 amostras.

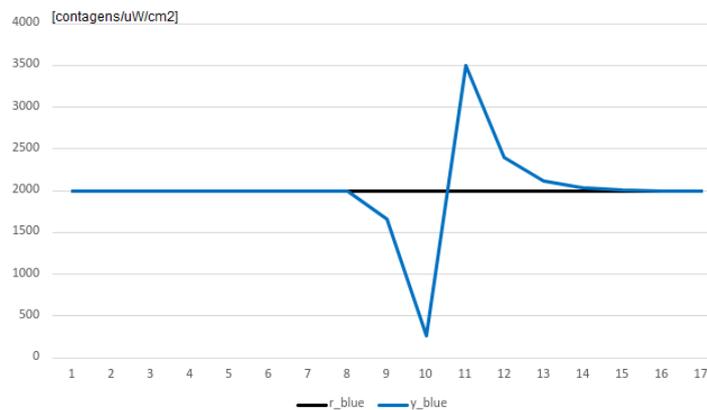
A Figura 4.15 tem por objetivo a demonstração do efeito no sistema aos definir as três referências com o mesmo valor. Observa-se um efeito no canal azul, que aparenta ser um *Overshoot*; contudo, tal efeito ocorre devido à influência do LED verde na resposta do azul. Tal efeito advém da escolha da utilização de três controladores independentes com um sensor que possui sobreposição entre seus canais. A Tabela 4.1 demonstra tal sobreposição em seus canais para três fontes descritas na figura. O tempo de resposta do canal vermelho é de 4 amostras, do canal verde 5 e do canal azul 6.

A Figura 4.13b demonstra a resposta do sistema a uma perturbação causada pelo bloqueio do único sensor utilizado no experimento. Foram realizados dois bloqueios, na amostra 3 e entre as 12 e 14. Obteve-se um atraso de 2 amostras no canal vermelho, 2 no

Figura 4.14: Resposta ao controle individual no canal Azul



(a) Resposta a um salto



(b) Análise de rejeição a perturbações

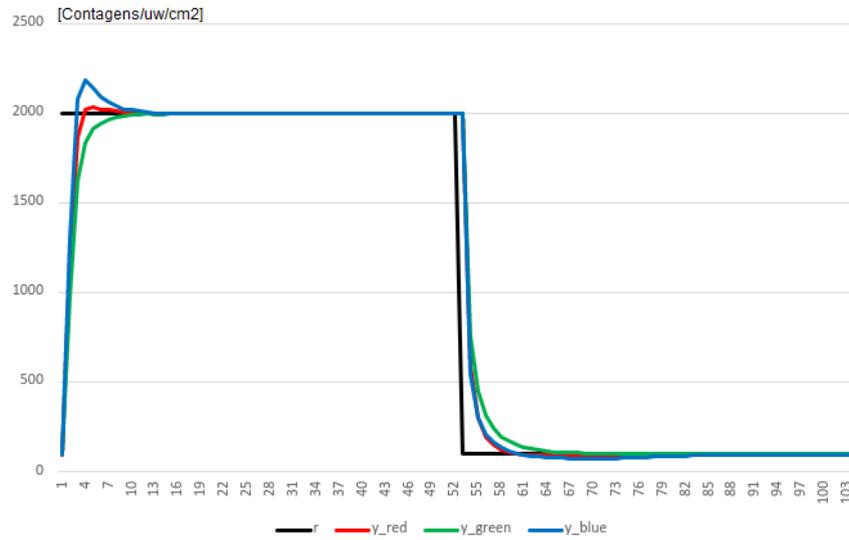
Fonte: Autor

verde e 4 no azul. Nota-se que a influência do canal verde no azul afeta tanto seu tempo de acomodação para seguir uma referência como para rejeitar o ruído.

As Figuras 4.17a, 4.17b e 4.17c indicam a rejeição a uma perturbação para os canais vermelho, verde e azul respectivamente. A rejeição ocorreu em 3 amostras para o vermelho, 2 para o verde e 2 para o azul.

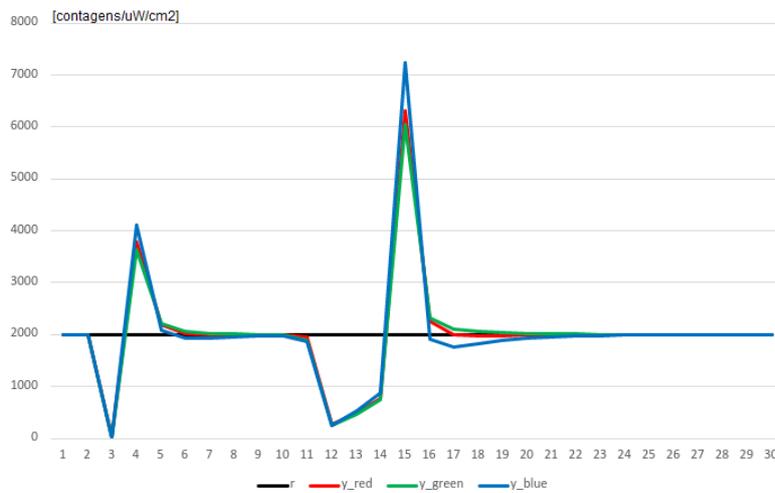
As Figuras 4.18a, 4.18b e 4.18c demonstram a resposta do sistema quando as referências dos três canais são definidas com valores distintos. As três figuras ocorrem simultaneamente de forma que a amostra 1 do vermelho, corresponde a 1 do azul e 1 do verde. Novamente, observa-se a interferência do LED verde no resultado do azul, de forma que mesmo com a fonte azul desligada obteve-se 950 contagens ocasionadas pelo verde estar em 1500.

Figura 4.15: Resposta a um salto com as três referências iguais



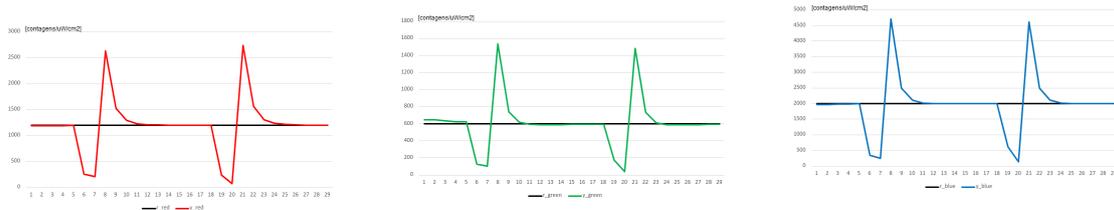
Fonte: Autor

Figura 4.16: Análise de rejeição de ruído com as três referências iguais



Fonte: Autor

Figura 4.17: Rejeição a uma perturbação com as três referências diferentes



(a) Canal vermelho

(b) Canal verde

(c) Canal azul

Fonte: Autor

Tabela 4.1: Resposta do sensor TCS3472-5 a iluminações específicas

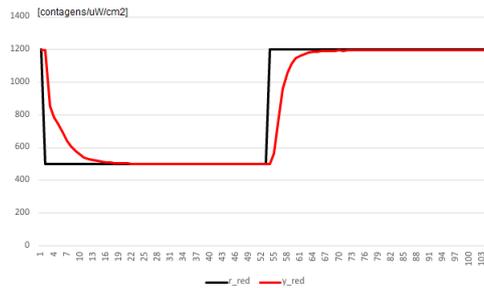
Parameter	Test Conditions	Red Channel		Green Channel		Blue Channel		Clear Channel			Unit
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Typ	Max	
R <sub>e</sub> Irradiance responsivity	$\lambda_D = 465 \text{ nm}^{(2)}$	0%	15%	10%	42%	65%	88%	11.0	13.8	16.6	counts / $\mu\text{W}$ / $\text{cm}^2$
	$\lambda_D = 525 \text{ nm}^{(3)}$	4%	25%	60%	85%	10%	45%	13.2	16.6	20.0	
	$\lambda_D = 615 \text{ nm}^{(4)}$	80%	110%	0%	14%	5%	24%	15.6	19.5	23.4	

**Notes:**

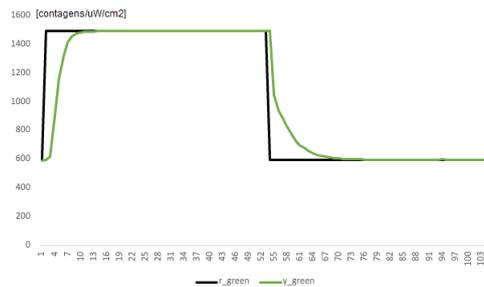
1. The percentage shown represents the ratio of the respective red, green, or blue channel value to the clear channel value.
2. The 465 nm input irradiance is supplied by an InGaN light-emitting diode with the following characteristics: dominant wavelength  $\lambda_D = 465 \text{ nm}$ , spectral halfwidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 22 \text{ nm}$ .
3. The 525 nm input irradiance is supplied by an InGaN light-emitting diode with the following characteristics: dominant wavelength  $\lambda_D = 525 \text{ nm}$ , spectral halfwidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 35 \text{ nm}$ .
4. The 615 nm input irradiance is supplied by a AlInGaP light-emitting diode with the following characteristics: dominant wavelength  $\lambda_D = 615 \text{ nm}$ , spectral halfwidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 15 \text{ nm}$ .

Fonte: (AMS AG, 2020)

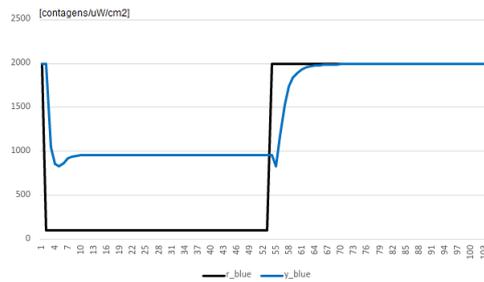
Figura 4.18: Resposta a um salto com as três referências diferentes



(a) Canal vermelho



(b) Canal verde



(c) Canal azul

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, propôs-se a realização de um sistema de controle de iluminação com as seguintes características: possibilidade da utilização independente de suas partes; funcionamento invariante do número de sensores; independência da disposição das partes do sistema para o seu funcionamento; possibilidade de ajuste dos parâmetros de iluminância do sistema, e a ressintonia do controlador em caso de erro persistente.

Visando criar um sistema cujos módulos possam ser utilizados de forma independente e que seu funcionamento independa do número de sensores, estruturou-se o sistema de forma que a temporização do sistema de Controle ocorresse através do recebimento de uma mensagem dos Sensores. Ao utilizar o protocolo MQTT para a transmissão dos dados dos Sensores para o Controlador, introduziu-se uma incerteza no tempo de recebimento da mensagem. Para possibilitar o recebimento de todas as mensagens de um lote, determinou-se uma janela temporal de forma experimental, contudo tal implementação pode variar com o local onde o sistema é utilizado. Ao controlar a planta com três sensores e verificar o atraso máximo entre a primeira e a última mensagem durante 2000 mensagens, não foi perdida nenhuma mensagem do lote. Visando remover tal incerteza, para trabalhos futuros, sugere-se a troca do protocolo de comunicação utilizado para o envio dos dados pelos Sensores.

Com o objetivo de permitir que o sistema independa de sua disposição espacial, de seu número de sensores, e permita a ressintonia do controlador em caso de erro persistente, utilizou-se o método VRFT para a sintonia de três controladores SISO. Esta implementação permitiu obter respostas rápidas no seguimento de referência e na rejeição de ruído para diversas configurações na quantidade e disposição dos sensores. Tal implementação também permitiu a resintonia dos controladores para se adaptar a modificações da planta durante a execução. A utilização de três controladores SISO, em combinação com um sensor com sobreposição dos canais, resultou em comportamentos não desejados para o controle do canal azul, quando a referência do canal verde era significativamente maior que a do azul. Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros, a substituição dos três controladores por um controlador MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) que poderá levar em conta tais sobreposições.

Para adequar o sistemas à normas de iluminação brasileira e possibilitar sua utilização em ambientes distintos, foi introduzido o bloco responsável pela depuração da iluminação escolhida. Este bloco, em conjunto com o Sintonizador, permite ao usuário

determinar os valores máximo e mínimo da iluminação e obter a iluminância média do sistema.

Em suma, os resultados obtidos mostram que o sistema de controle da iluminação ambiente apresenta uma resposta rápida, *Overshoot* nulo no seguimento de referência e rejeição de forma eficaz das perturbações. Tal sistema apresenta desempenho satisfatório no seguimento de diversas referências em configurações distintas de disposição e número de sensores. O sistema proposto possibilita sua utilização em diversos ambientes e é de fácil instalação e configuração.

## REFERÊNCIAS

ABDEL-RAHMAN, F. et al. Caenorhabditis elegans as a model to study the impact of exposure to light emitting diode (led) domestic lighting. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, Taylor & Francis, v. 52, n. 5, p. 433–439, 2017.

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Fundamentos da Biologia Moderna**. [S.l.]: Moderna, 2006. ISBN 85-16-05269-9.

AMS. **Lux and CCT Calculations using ams Color Sensors**. 2013. Disponível em: <[https://ams.com/documents/20143/36005/ColorSensors\\_AN000166\\_1-00.pdf/d1290c78-4ef1-5b88-bff0-8e80c2f92b6b](https://ams.com/documents/20143/36005/ColorSensors_AN000166_1-00.pdf/d1290c78-4ef1-5b88-bff0-8e80c2f92b6b)>.

AMS AG. Calculating color temperature and illuminance using the taos tcs3414cs digital color sensor. feb 2009. Rev C. Disponível em: <[https://ams.com/documents/20143/36005/TCS34xx\\_AN000517\\_1-00.pdf/616f6ed0-8409-a21d-cd85-307a1e377102](https://ams.com/documents/20143/36005/TCS34xx_AN000517_1-00.pdf/616f6ed0-8409-a21d-cd85-307a1e377102)>.

AMS AG. Taos colorimetry tutorial. feb 2016. Disponível em: <[https://ams.com/documents/20143/36005/LightSensors\\_AN000519\\_1-00.pdf/d2a0670d-7557-ed94-cc0e-225cfa8cb031](https://ams.com/documents/20143/36005/LightSensors_AN000519_1-00.pdf/d2a0670d-7557-ed94-cc0e-225cfa8cb031)>.

AMS AG. **Color Light-to-Digital Converter with IR Filter**. [S.l.], 2020. V1-04. Disponível em: <[https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3472\\_DS000390\\_3-00.pdf/6fe47e15-e32f-7fa7-03cb-22935da44b26](https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3472_DS000390_3-00.pdf/6fe47e15-e32f-7fa7-03cb-22935da44b26)>.

BARRY, R. **Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel**. [s.n.], 2016. Disponível em: <[https://www.freertos.org/fr-content-src/uploads/2018/07/161204\\_Mastering\\_the\\_FreeRTOS\\_Real\\_Time\\_Kernel-A\\_Hands-On\\_Tutorial\\_Guide.pdf](https://www.freertos.org/fr-content-src/uploads/2018/07/161204_Mastering_the_FreeRTOS_Real_Time_Kernel-A_Hands-On_Tutorial_Guide.pdf)>.

BOEIRA, E.; ECKHARD, D. pyvrft: A python package for the virtual reference feedback tuning, a direct data-driven control method. **SoftwareX**, v. 11, p. 100383, 2020. ISSN 2352-7110. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/S2352711019302894>>.

CAMPI, M.; LECCHINI, A.; SAVARESI, S. Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers. **Automatica**, v. 38, n. 8, p. 1337–1346, 2002. ISSN 0005-1098. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109802000328>>.

COSTA, M. A. et al. A high efficiency autonomous street lighting system based on solar energy and leds. In: IEEE. **2009 Brazilian Power Electronics Conference**. [S.l.], 2009. p. 265–273.

COSTA, R. E. d. et al. Sistematização do projeto de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão para iluminação pública. Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

ESPRESSIF, S. S. **SNTP Time Synchronization**. 2016 – 2022. Disponível em: <[https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/system\\_time.html#sntp-time-synchronization](https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/system_time.html#sntp-time-synchronization)>.

ESPRESSIF, S. S. **Technical Reference Manual**. 2021. 378-381 p. Disponível em: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf#ledpwm](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf#ledpwm)>.

FELDMAN, D. Índice de reprodução de cor: Limitações da comissão internationale de l'éclairage. 2014. Disponível em: <[https://www.lumearquitetura.com.br/lume/Upload/file/pdf/Ed\\_70/ed\\_70\%20At\%20-\%20IRC.pdf](https://www.lumearquitetura.com.br/lume/Upload/file/pdf/Ed_70/ed_70\%20At\%20-\%20IRC.pdf)>.

GARCIA, J. et al. Dimming of high-brightness leds by means of luminous flux thermal estimation. **IEEE transactions on power electronics**, IEEE, v. 24, n. 4, p. 1107–1114, 2009.

GOODMAN, T. et al. **The Use of Terms and Units in Photometry – Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry**. [S.l.], 2016.

GROOT, J. J. de; VLIET, J. V. **The high-pressure sodium lamp**. [S.l.]: Macmillan International Higher Education, 1986.

HIVEMQ. **MQTT Client and Broker and MQTT Server and Connection Establishment Explained - MQTT Essentials**. 2019. Disponível em: <<https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-3-client-broker-connection-establishment/>>.

JUNIOR, E. M. S. et al. Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para leds de iluminação. 2012.

LEHMAN, B.; WILKINS, A. J. Designing to mitigate effects of flicker in led lighting: Reducing risks to health and safety. **IEEE Power Electronics Magazine**, IEEE, v. 1, n. 3, p. 18–26, 2014.

LUCAS, R. J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. **Trends in neurosciences**, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 1–9, 2014.

MICROSOFT. **Real-Time Operating System**. 2020. Disponível em: <<https://azure.microsoft.com/en-us/resources/real-time-operating-system/>>.

OASIS, S. **3.1. 1. Edited by Andrew Banks and Rahul Gupta. 29 October 2014. OASIS Standard**. 2016. Disponível em: <<http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>>.

OHNO, Y. et al. Principles governing photometry (2nd edition). **Metrologia**, IOP Publishing, v. 57, n. 2, p. 020401, mar 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088\%2F1681-7575\%2Fab72f1>>.

PERINO, G.; PIOCH, T. Banning incandescent light bulbs in the shadow of the eu emissions trading scheme. **Climate Policy**, Taylor & Francis, v. 17, n. 5, p. 678–686, 2017.

PURVES, D. et al. **Neuroscience**. [S.l.]: Sinauer, 2008. ISBN 978-0-87893-697-7.

RODRIGUES, W. et al. Comparative analysis of power leds dimming methods. In: IEEE. **IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.], 2011. p. 2907–2912.

ROENNEBERG, T.; MERROW, M. The circadian clock and human health. **Current biology**, Elsevier, v. 26, n. 10, p. R432–R443, 2016.

STEVENS, R. G. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence. **International journal of epidemiology**, Oxford University Press, v. 38, n. 4, p. 963–970, 2009.

STRAIF, K. et al. **Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting**. [S.l.]: Elsevier, 2007.

ZELE, A. et al. Melanopsin photoreception contributes to human visual detection, temporal and colour processing. **Scientific Reports**, v. 8, 03 2018.

ZWINKELS, J. et al. Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the international system of units (SI). **Metrologia**, IOP Publishing, v. 53, n. 3, p. G1–G1, may 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/3/G1>>.

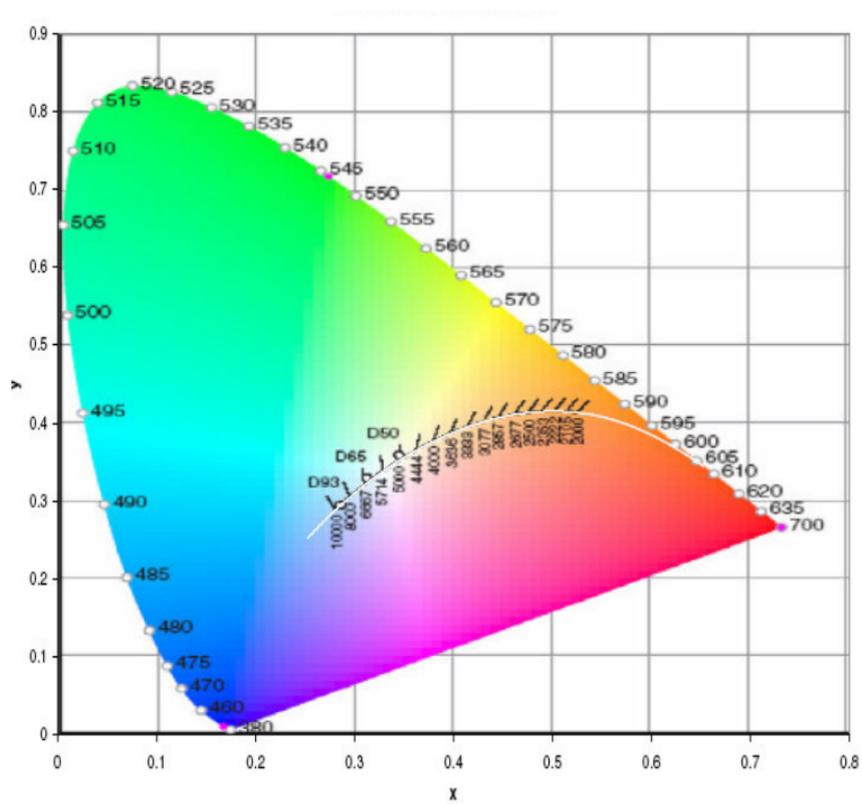
## APÊNDICE A — TEMPERATURA DE COR

A temperatura da cor tem sido usada como métrica para caracterizar fontes de luz de banda larga. É um meio de caracterizar as propriedades espectrais de uma fonte de luz próximas do branco. A temperatura da cor, medida em Kelvin (K), refere-se à temperatura na qual seria necessário aquecer um radiador de corpo negro (ou planckiano) para produzir luz de uma cor específica. Um radiador de corpo negro é definido como um objeto teórico que é um radiador perfeito da luz visível. À medida que o radiador do corpo negro é aquecido, ele irradia energia primeiro no espectro infravermelho e depois no espectro visível como luz vermelha, laranja, branca e, finalmente, branca azulada.

As luzes incandescentes são bons modelos de radiadores de corpos negros, porque a maior parte da luz emitida é devido ao aquecimento de seus filamentos. Para fontes de luz de banda larga que não produzem luz a partir de um elemento aquecido, sua temperatura de cor pode ser caracterizada pela Temperatura de Cor Correlacionada (CCT), que também é medida em Kelvin (K). O CCT foi introduzido para tratar fontes de luz de banda larga que não são modeladas por um radiador de corpo negro. O CCT é definido como a temperatura de um radiador de corpo negro cujo ponto de cromaticidade é o mais próximo do ponto de cromaticidade da fonte de luz não plankiana. A temperatura de cor correlacionada é basicamente uma descrição se a luz é branco azulado, neutro ou branco avermelhado.

O locus de Planck, mostrado na Figura A.1, representa todas as temperaturas de cor possíveis, onde  $x$  e  $y$  representam as coordenadas de cromaticidade. Ele segue as cores de um radiador planckiano, pois seu aquecimento é entre 2.000K a 10.000K. O locus planckiano é a linha curva no centro do diagrama de cromaticidade. (AMS AG, 2009)

Figura A.1: Diagrama de Cromaticidade com locus planckiano



Fonte: (AMS AG, 2009)