

Simulação de Iluminação Circadiana Aplicada ao Conforto Visual: Protótipo de Automação de Baixo Custo baseado em Tecnologia Neurolighting

Jéssica Louise da Silva | jessica.l10@aluno.ifsc.edu.br¹

João Gabriel da Silva | joao.g19@aluno.ifsc.edu.br¹

Pâmela Lídia dos Santos da Silva |pamela.l1998@aluno.ifsc.edu.br¹

Carlos Toshiyuki Matsumi | matsumi@ifsc.edu.br²

Joice Luiz Jeronimo | joice.jeronimo@ifsc.edu.br²

Edital de fomento do trabalho nº 03/2025 - PROEN/PROPI/PROEX

Trabalho de Ensino, Pesquisa e Extensão

DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

A iluminação artificial influencia diretamente o bem-estar humano, especialmente na regulação do ciclo circadiano, afetando sono, alerta e desempenho cognitivo. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de automação residencial baseado em *neurolighting*, capaz de simular a dinâmica da luz natural ao longo do dia por meio da variação automatizada da temperatura de cor. A metodologia caracteriza-se como aplicada e experimental, envolvendo o uso de microcontrolador, módulo de relógio em tempo real, fitas de LED do tipo CCT e sensor espectral para monitoramento dos parâmetros luminosos. Algoritmos de interpolação garantiram transições suaves no ciclo diário. Os resultados apresentaram erros inferiores a 5% e comportamento compatível com a curva circadiana teórica, demonstrando a viabilidade da solução como ferramenta didática e o potencial de tecnologias na iluminação centrada no ser humano.

Palavras-chave: *neurolighting*; automação residencial; ciclo circadiano; temperatura de cor.

Introdução

A qualidade da iluminação artificial em ambientes internos vai além da visibilidade, influenciando diretamente o ciclo circadiano humano. Estudos em psicofisiologia, neurociência e cronobiologia demonstram que a luz regula processos como vigília, secreção hormonal, metabolismo e bem-estar. Esse controle é mediado pelo Núcleo Supraquiasmático (NSQ), localizado no hipotálamo, que interpreta estímulos luminosos captados pela retina e sincroniza o relógio biológico com o ambiente externo (Reppert; Weaver, 2002).

¹ Estudante do curso Engenharia Elétrica do IFSC campus Joinville

² Servidor do curso de Engenharia Elétrica do IFSC campus Joinville.

A luz natural apresenta variação espectral ao longo do dia, com tons mais quentes no amanhecer (~3000K), temperaturas mais elevadas ao meio-dia (~6500K) e retorno gradual a tons quentes no entardecer. Essa dinâmica atua como principal zeitgeber do ritmo circadiano. Em ambientes com iluminação artificial estática, a ausência dessa variação pode provocar desregulação do sono, redução do desempenho e impactos à saúde (Terán *et al.*, 2026; Fishbein *et al.*, 2021).

Com o avanço das tecnologias embarcadas e a disponibilidade de LEDs controláveis, torna-se viável o desenvolvimento de sistemas capazes de simular essa dinâmica luminosa. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um protótipo em escala reduzida para reprodução da variação circadiana da temperatura de cor, integrando ensino e pesquisa por meio da aplicação de conceitos de eletrônica, programação e automação.

Fundamentação teórica

O ciclo circadiano é um ritmo endógeno de aproximadamente 24 horas que regula funções fisiológicas como sono, metabolismo e temperatura corporal. Sua regulação ocorre no núcleo supraquiasmático, que interpreta sinais luminosos captados pela retina e coordena respostas neuroendócrinas responsáveis pela sincronização do organismo com o ambiente (Reppert; Weaver, 2002; Blume *et al.*, 2019).

A resposta circadiana à luz depende da intensidade, duração da exposição e composição espectral. A luz de alta temperatura de cor, rica em componentes azuis (~480 nm), promove estado de alerta e supressão da melatonina, enquanto temperaturas mais baixas favorecem o relaxamento e o início do sono. A exposição inadequada à luz azulada no período noturno pode causar desregulação circadiana e impactos à saúde (Duffy; Czeisler, 2009; Terán *et al.*, 2026).

Nesse contexto, a *neurolighting* propõe o uso da iluminação artificial considerando seus efeitos biológicos, buscando reproduzir a dinâmica da luz natural para promover bem-estar e desempenho (Leon Martinez; Valiente Lopez, 2025). A temperatura de cor correlacionada (TCC), expressa em Kelvin, é o principal parâmetro para descrever a aparência da luz, sendo valores mais baixos associados ao relaxamento e valores mais altos ao estímulo cognitivo (Mills; Tomkins; Schlangen, 2007).

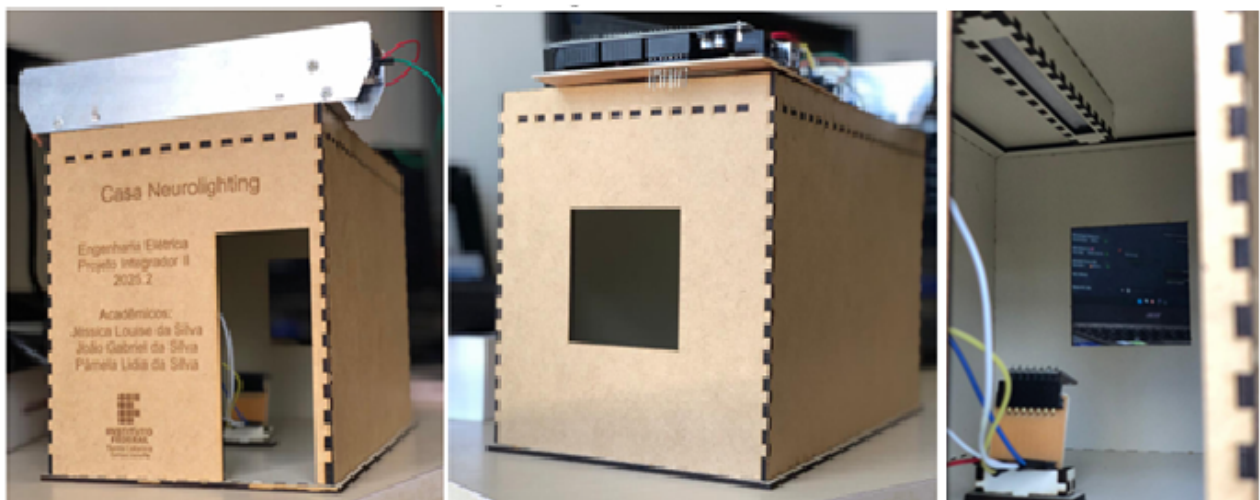
Em sistemas baseados em LEDs CCT, a variação da TCC é realizada por modulação PWM, permitindo o controle da mistura entre luz quente e fria. Integrados a microcontroladores, esses sistemas possibilitam a implementação de iluminação circadiana dinâmica com sincronização temporal e monitoramento por sensores espectrais (Wang *et al*, 2023).

Procedimentos metodológicos

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de natureza experimental e abordagem quantitativa. O desenvolvimento foi organizado em etapas sequenciais: modelagem do ambiente, construção da maquete, desenvolvimento do sistema eletrônico, programação e validação experimental.

O ambiente de referência foi modelado no software DIALux, representando um dormitório multifuncional. A maquete foi construída em MDF, com corte a laser e escala de 1:20 (Figura 1).

Figura 1 - Vistas do protótipo físico finalizado em escala 1:20, evidenciando a montagem e o sistema de iluminação integrado.



Fonte: Autoria própria (2025).

O sistema eletrônico baseou-se em um microcontrolador Arduino Mega 2560, integrado a um módulo RTC para sincronização temporal. A iluminação foi implementada

com fita LED, segmento de 10 cm fixado internamente, do tipo CCT (tensão de operação de 12V e potência nominal de 5 W/m, fluxo luminoso de 350 lm/m, composta por chips SMD 2835 e SMD 5050) controlada por sinais PWM via MOSFETs, permitindo a variação da temperatura de cor. O monitoramento foi realizado por sensor espectral TCS34725, responsável pela leitura e estimativa da TCC. A interface utilizou display LCD com comunicação I2C e botões para seleção de modos, com integração em placa de circuito impresso dedicada.

O firmware, desenvolvido em C++, implementa três modos de operação: automático, baseado na variação circadiana; manual, com definição de valores fixos de TCC; e apresentação, com simulação acelerada do ciclo diário. O controle baseia-se no mapeamento temporal para sinais PWM, garantindo transições suaves.

A validação foi conduzida em ambiente controlado, sem interferência de luz externa. O sensor foi posicionado no centro da maquete, em plano equivalente à altura de trabalho. A coleta de dados ocorreu em duas etapas: validação estática, com medições em diferentes valores de TCC, e validação dinâmica, com comparação entre valores medidos e a curva teórica ao longo do ciclo diário.

Resultados e discussões

O protótipo funcional em escala 1:20 apresentou integridade estrutural adequada e condições apropriadas para realização dos testes em ambiente controlado.

Na validação estática (Tabela 1), o sistema demonstrou alta precisão no controle da Temperatura de Cor Correlacionada. O erro relativo máximo foi de 3,17% (3500K → 3389K) e o mínimo de 0,10% (6000K → 5994K), mantendo-se abaixo do limite de 5%. Os resultados também atendem às tolerâncias da norma ANSI C78.377. A iluminância média obtida foi de 541 lux, valor próximo às recomendações da ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013, sendo o leve aumento associado à estratégia de mistura PWM dos canais de LED.

Na avaliação dinâmica, observou-se forte correspondência entre os valores medidos e a curva circadiana teórica. O sistema apresentou variação progressiva da temperatura de cor ao longo do dia, atingindo aproximadamente 6000K ao meio-dia e

retornando a valores próximos de 3400K no início e final do ciclo, evidenciando a correta implementação do algoritmo de interpolação e da sincronização temporal.

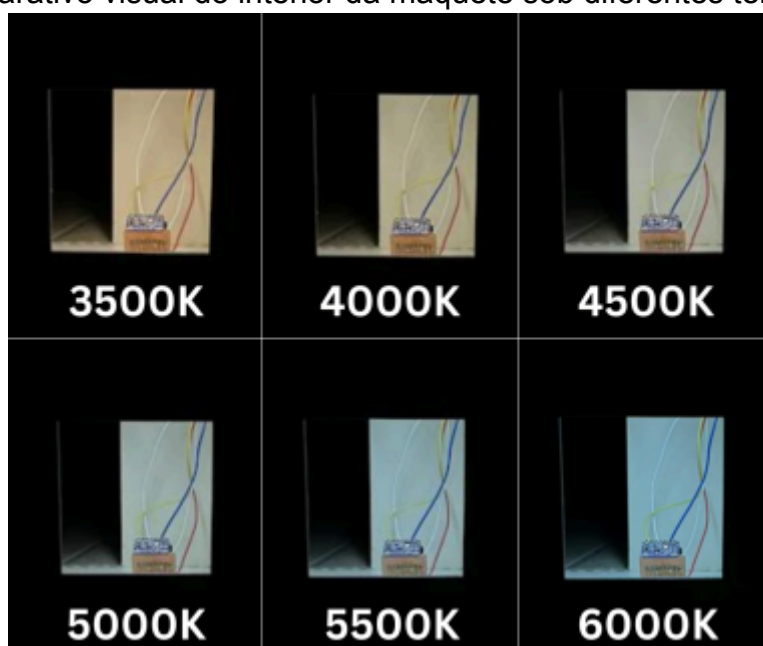
Tabela 1 – Comparativo entre TCC Alvo e Medida em pontos estáticos no modo Kelvin.

TCC Alvo [K]	TCC Medida [K]	Erro Relativo [%]	Iluminância [lux]
3500	3389	3,17	455
4000	3990	0,25	476
4500	4396	2,31	493
5000	4874	2,52	536
5500	5398	1,85	569
6000	5994	0,1	602

Fonte: elaborada pelos autores

A análise qualitativa, por meio de registros visuais (Figura 2), confirmou a distinção perceptível entre diferentes condições de iluminação, reforçando a capacidade de modulação do sistema. Em conjunto, os resultados quantitativos e qualitativos validam o protótipo como uma solução funcional e uma ferramenta didática para demonstração de conceitos de iluminação centrada no ser humano.

Figura 2 – Comparativo visual do interior da maquete sob diferentes temperaturas de cor.



Fonte: Autoria própria (2025).

Considerações finais

O trabalho desenvolveu e validou um protótipo de iluminação circadiana em escala reduzida, demonstrando a viabilidade técnica do *neurolighting* com tecnologias de baixo custo. A viabilidade econômica da solução é evidenciada pelo uso de componentes de ampla disponibilidade no mercado, cujo custo total representa uma fração do investimento exigido por sistemas comerciais equivalentes de *neurolighting*. Os resultados indicaram alta precisão no controle da Temperatura de Cor Correlacionada (erro < 5%) e aderência consistente à curva circadiana teórica.

A interpolação linear mostrou-se adequada para reproduzir variações contínuas da temperatura de cor, enquanto o uso de LEDs CCT com modulação PWM evidenciou uma solução eficiente, acessível e confiável. Apesar da escala reduzida, o protótipo possui potencial de aplicação em ambientes reais, permitindo adaptar condições de iluminação conforme a atividade desenvolvida, contribuindo para conforto e desempenho dos usuários.

No âmbito educacional, o projeto promoveu a integração entre teoria e prática e o desenvolvimento de competências técnicas e analíticas. Como limitações, destacam-se restrições na comunicação entre dispositivos, afetando a estabilidade do sistema. Para trabalhos futuros, sugere-se o uso de plataformas mais robustas e a implementação de controle em malha fechada.

Referências

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI C78.377:2017** Electric Lamps - Specifications for the Chromaticity of Solid-State Lighting Products. Washington: ANSI, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:** iluminação de ambientes de trabalho – parte 1: interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BLUME, Christine; GARBAZZA, Corrado; SPITSCHAN, Manuel. **Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood**. Somnologie, v. 23, n. 3, p. 147-156, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x>.



DUFFY, Jeanne F.; CZEISLER, Charles Effect of light on human circadian physiology. **Sleep Medicine Clinics**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 165–177, 2009.

FISHBEIN, Anna B.; KNUTSON, Kristen L.; ZEE, Phyllis C. Circadian disruption and human health. **The Journal of Clinical Investigation**, v. 131, n. 19, p. e148286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1172/JCI148286>.

LEON MARTINEZ, Nubi; VALIENTE LOPEZ, Mercedes. Analysis of Exposure to ALAN (Artificial Light at Night) in the Urban Space of Madrid and Toledo (Spain) and Its Impact on Human Circadian Rhythms:“Circadian Neurolighting”. **Urban Science**, v. 9, n. 9, p. 386, 2025.

MILLS, Peter R.; TOMKINS, Susannah C.; SCHLANGEN, Luc JM. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. **Journal of circadian rhythms**, v. 5, n. 1, p. 2, 2007.

REPPERT, Steven M.; WEAVER, David R. Coordination of circadian timing in mammals. **Nature**, [S. l.], v. 418, n. 6901, p. 935–941, 2002.

WANG, Siyuan; JI, Xiaokun; LIU, Zongyuan; XIE, An; WU, Tingzhu; CHEN, Hao. Spectral monitoring system based on TCS34725 color sensor. In: **International Conference on Optical Imaging and Measurement (ICOIM)**, 2023. Proceedings [...] [S.l.]: IEEE, 2023. p. 212–215.

TERÁN, Emiliano; YEE-RENDON, Cristo Manuel; SOSA-ARÁMBULA, Hugo J.; DE LA HERRÁN-ARITA, Alberto K.; WOODS, Russell L. Home lighting, blue-light filtering, and their effects on melatonin suppression. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 16, n. 1, artigo 2850, 2026.