

# LUMINÁRIA DE BANCADA EM LED COM DIMERIZAÇÃO EM MALHA FECHADA

*Data de aceite: 03/07/2023*

### **Nadson Vieira dos Santos**

Centro Universitário São Lucas  
Educativo  
Porto Velho – Rondônia

### **Alam Ribeiro da Silva**

Centro Universitário São Lucas  
Educativo  
Porto Velho – Rondônia

<https://lattes.cnpq.br/8913390082288931>

### **Geoziel Nascimento da Silva Junior**

Centro Universitário São Lucas  
Educativo  
Porto Velho – Rondônia

### **Orleans Mendonça Cardoso**

Centro Universitário São Lucas  
Educativo  
Porto Velho – Rondônia

<https://lattes.cnpq.br/9198289414820276>

**RESUMO:** Este projeto tem por finalidade desenvolver uma luminária de bancada de utilização acadêmica. O circuito é alimentado por uma fonte de tensão simétrica. A iluminância dos LEDs é constantemente ajustada pelo controlador proporcional-integral projetado com base na leitura do sensor, um Resistor dependente

de luz (LDR) [7], realizando, assim, o ajuste automático na iluminação para que ela se mantenha constante diante de qualquer perturbação luminosa que seja captada pelo sensor, sendo possível obter uma iluminância dentro dos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

**PALAVRAS-CHAVE:** Luminária, amplificador operacional, LDR, iluminância, NBR/ISO.

### LED COUNTERTOP LIGHT WITH CLOSED LOOP DIMERIZATION

**ABSTRACT:** The purpose of this project is to develop a benchtop luminaire for academic use. The circuit is powered by a symmetrical voltage source. The illuminance of the LEDs is constantly adjusted by the proportional-integral controller designed based on the reading of the sensor, a Light Dependent Resistor (LDR) [7], thus performing the automatic adjustment in illuminance so that it remains constant in the face of any light disturbance that is captured by the sensor, being possible to obtain an illuminance within the parameters established by ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

**KEYWORDS:** Lighting, operational

## 1 | INTRODUÇÃO

A iluminação de um ambiente acadêmico é de grande importância para o desenvolvimento estudantil, quando a falta de iluminância e/ou o excesso são condições as quais os estudantes passam a conviver são, sem dúvidas, um fator que gera desconforto, cansaço e, principalmente, atrapalha o crescimento acadêmico do aluno. Devido a essas condições ditas, a iluminação de cada ambiente é pré-definida em alguns parâmetros, parâmetros estes estudados e definidos pela ABNT NBR/ISO 8995 - Iluminação em Ambientes de Trabalho. Conseqüentemente, quando a iluminação não correspondente aos parâmetros pré-definidos, a iluminação prejudica o desenvolvimento de competências, sejam elas pessoais e/ou profissionais dos alunos [2]. Portanto torna-se extremamente importante uma correta iluminação desses locais de estudo e dos ambientes de práticas (laboratórios), dessa maneira, originando o projeto a qual esse artigo é direcionado.

## 2 | LEVANTAMENTO DE DEMANDAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA LUMINÁRIA DE BANCADA DE LED

Na figura 6, podemos ver que para atingir o objetivo do projeto pensou-se em projetar um circuito de controle para que a dimerização pudesse ser feita automaticamente, e um circuito de modulador para gerar o PWM que será enviado para o driver. O circuito é constituído por circuitos integrados, resistores, capacitores e transistores. Nesse projeto utilizamos o LM324 que funciona com uma tensão de até 32V [5] e possui 4 amplificadores operacionais embutidos em sua estrutura.

## 3 | REVISÃO DE LITERATURA

Com as demandas devidamente definidas, foi dado início a revisão de literatura relativa à teoria de iluminância, geração de sinal PWM, comportamento do LDR, teoria de controle, funcionamento e características dos amplificadores operacionais, componentes eletrônicos que foram selecionados para a implementação do projeto e possíveis formas de solução de problemas.

## 4 | PARÂMETROS DE ILUMINÂNCIA

Visto que cada tipo de ambiente exige um determinado nível de iluminância, foi dado início à pesquisa relativa as normas que regulamentam esta característica. Inicialmente foi estudada a NBR 5413 - Iluminância de interiores, onde estabelece os valores de iluminâncias médias mínimas em serviço para iluminação artificial em interiores, onde se

realizem atividades de comércio, indústria, ensino, esporte e outras [3]. Na página 4 da presente norma, item 5.3.13, é estabelecido o nível de iluminância para ambientes escolares. Tendo ciência do nosso objetivo, foi utilizado como parâmetro níveis de iluminação para laboratórios, conforme figura 1.

### 5.3.13 Escolas

- salas de aulas .....	200 - 300 - 500
- quadros negros .....	300 - 500 - 750
- salas de trabalhos manuais .....	200 - 300 - 500
- laboratórios	
. geral .....	150 - 200 - 300
. local .....	300 - 500 - 750

Figura 1 - Tabela de iluminância NBR 5413. Valores em Lux

Ao dar andamento nos trabalhos, durante a revisão final, foi identificado que a NBR 5413 havia sido revogada, sendo a norma vigente a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 - ILUMINAÇÃO EM AMBIENTES DE TRABALHO [2], que na página 21 da presente norma estabelece outros parâmetros de iluminação, conforme figura 2.

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\bar{E}_m$ lux	$UGR_L$	$R_a$	Observações
Sala de leitura	500	19	80	Recomenda-se que a iluminação seja controlável.
Quadro negro	500	19	80	Prevenir reflexões especulares.
Mesa de demonstração	500	19	80	Em salas de leitura 750 lux.
Salas de arte e artesanato	500	19	80	
Salas de arte em escolas de arte	750	19	90	$T_{cp} > 5\ 000\ K.$
Salas de desenho técnico	750	16	80	
Salas de aplicação e laboratórios	500	19	80	

Figura 2 - Parâmetros para iluminância de laboratórios ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

Mesmo o projeto estar calculado e prototipado para atender a NBR 5413, os parâmetros podem ser reajustados para atender os valores da nova tabela, bem como atender outros ambientes. Devido ao conceito e circuito não se alterar, optou-se em atender os valores fornecidos pela antiga NBR visto que o objetivo do trabalho foi alcançado.

## 5 | AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Ao definirmos que seria usado o CI LM324, que possui 4 ampops em sua estrutura, foi consultado o seu datasheet para reunir informações sobre os níveis de tensões,

corrente, temperaturas de trabalho e outros dados relevantes ao desenvolvimento do projeto. Também foi consultado o funcionamento dos amplificadores operacionais nas configurações amplificador não-inversor, amplificador inversor, subtrator, comparador, buffer de tensão, e outros modos de operação utilizados.

## 6 | IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Após realizada a revisão da literatura, foi iniciada a fase de montagem, simulações e testes virtuais dos circuitos projetados para verificação do funcionamento. Assim como relacionado na primeira fase, a montagem seguiu a seguinte sequência: circuito modulador, circuito de controle, interligação dos circuitos.

### 6.1 Circuito modulador

Na etapa de revisão de literatura, foi visto que uma das formas mais simples de se gerar um sinal PWM é através da comparação de uma tensão de referência com um sinal triangular simétrico [4]. Para obter o sinal PWM para alimentação do LED, foi desenvolvido um circuito de modulação de sinal. Após estudos, análises e testes em simuladores virtuais, obteve-se o circuito apresentado na figura 3.

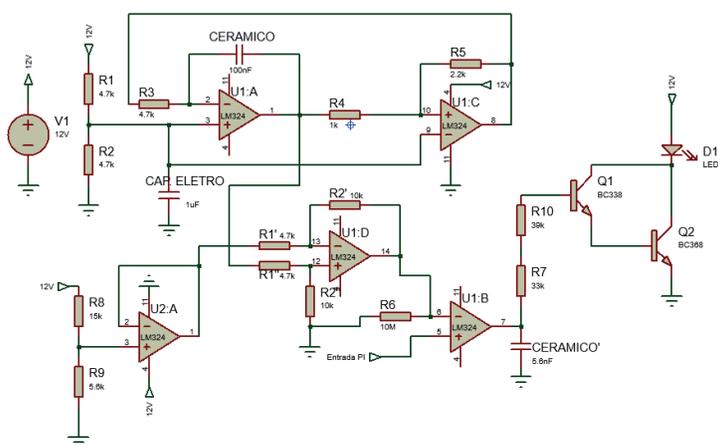


Figura 3 - Circuito do modulador simulado em Software.

O primeiro estágio do circuito é formado por dois ampops que realizam, juntos, a função de oscilador, um ampop no modo de realimentação positiva e outro como um filtro ativo passa-baixa, gerando uma onda triangular. Foi identificado que a onda gerada pelo oscilador estava com uma amplitude de 6V, de 3.4V a 9.4V, sendo o ideal uma onda triangular com a maior amplitude possível, 12V.

Para alcançar o objetivo, foi inserido um amplificador operacional no modo subtrator amplificador, para que a onda triangular original pudesse ter um curso de 0V a 12V. O ampop no modo subtrator amplificador irá subtrair uma tensão de referência dos valores

obtidos e amplificar o sinal para que se obtenha a amplitude desejada. Foi utilizado um ampop no modo buffer de tensão para que o divisor de tensão feito para obter a tensão de referência não interfira na configuração do subtrator.

Com a onda triangular com amplitude de 12V gerada, ela será enviada ao último ampop do circuito que está no modo comparador. A onda triangular obtida será comparada com um sinal que virá do circuito de controle gerando o sinal PWM - (Pulse Width Modulation) realizando o controle de potência fornecida ao LED.

Através de testes, foi identificado que a saída do circuito modulador fornece uma corrente máxima de 60mA, entretanto o LED consome uma corrente máxima de 500mA. Para solucionar esse problema foi projetado um driver para que o LED funcione corretamente.

O driver é composto por dois transistores, BC338 e BC368, dispostos em cascata na configuração Darlington, configuração que se faz necessária para o driver suportar até duas vezes a corrente nominal em regime permanente, e tem a função de amplificar a corrente fornecida pelo circuito modulador, para que o led funcione corretamente. A configuração foi escolhida por proporcionar um grande ganho de corrente [1]. O funcionamento do circuito modulador é demonstrado pelo fluxograma da figura 4.

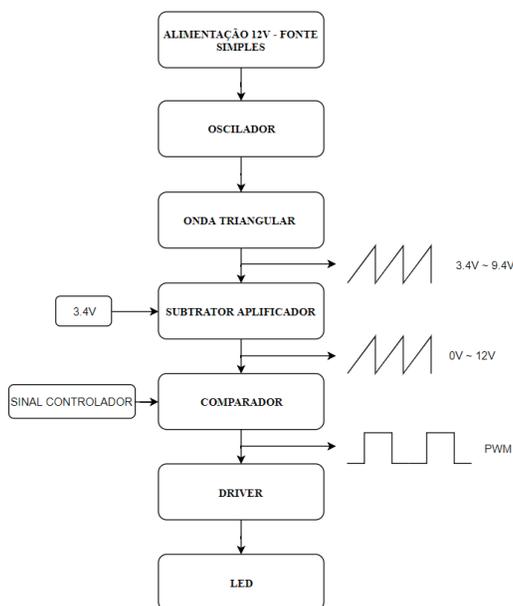


Figura 4 - Fluxograma funcionamento do circuito modulador.

## 6.2 Circuito controlador

Na etapa de revisão de literatura, constatou-se que uma forma de se realizar o controle da iluminação poderia ser feito por um controlador proporcional-integral e ele atenderia os requisitos do sistema proposto, que é manter um nível de iluminação constante.

Sabendo disso, foi desenvolvido o circuito de controle escolhido, e após estudos, análises e testes em simuladores virtuais, obteve-se o circuito apresentado na figura 5, que, diferente do circuito modulador, a alimentação desse circuito é feito através de uma fonte simétrica de +/-12V.

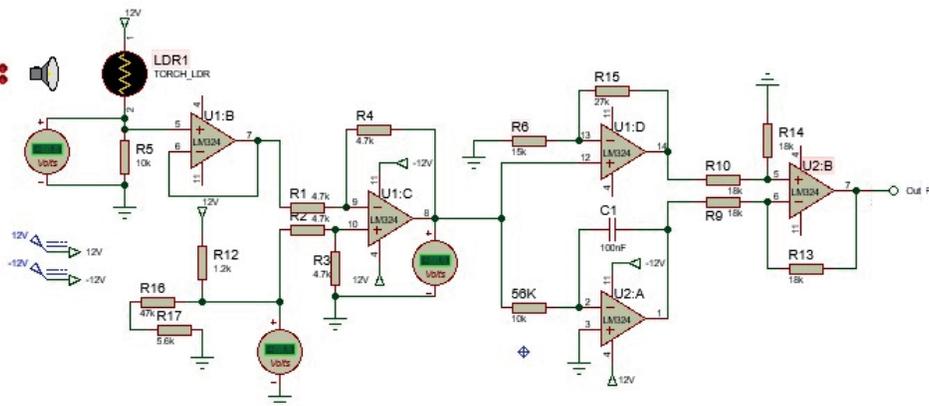


Figura 5 - Circuito Controlador Proporcional-Integral.

Inicialmente, temos um ampop no modo subtrator unitário que irá calcular a diferença entre a tensão de referência(setpoint) e a tensão fornecida pelo sensor (offset). Neste caso, a intensidade luminosa está sendo representada por níveis de tensão. Através do método de tentativa e erro, foi obtido um setpoint de aproximadamente 9.78V, que representa a intensidade luminosa desejada, aproximadamente 700 luxes.

O ampop no modo buffer de tensão isola o divisor de tensão formado por um resistor fixo e o sensor utilizado, mantendo o sinal de entrada na saída, para que não haja interferência entre as resistências equivalentes de cada etapa. O buffer de tensão é capaz de realizar tal função devido a sua alta impedância de entrada e baixa impedância de saída e possui ganho unitário [7].

Na saída do subtrator unitário, será fornecido um offset, dada pela diferença entre a tensão de referência e a tensão lida pelo sensor. Esse offset irá para as duas ações do circuito de controle: a ação proporcional e a ação integral.

Na ação proporcional, o offset será multiplicado por um ganho a fim de que esse erro obtido no subtrator seja zerado, porém não é possível zerar o erro apenas com a ação proporcional, o erro irá oscilar em torno de zero, porém atingirá um regime permanente mais rapidamente. Com parâmetros bem ajustados, essa oscilação será mínima. Calcular os parâmetros da ação proporcional seria um processo longo, visto que nenhum dos integrantes do grupo possuem o domínio de controle, por isso o ajuste de ganho foi feito manualmente através da instalação de um potenciômetro na realimentação. Obteve-se uma resposta satisfatória com um ganho de 1.8.

Na ação integral, o offset que ainda resta após a aplicação da ação proporcional é acumulado no capacitor na realimentação do ampop. A ação é responsável por multiplicar a integral do erro pelo ganho integral. Assim como na ação proporcional, o ganho integral foi obtido manualmente através do método de tentativa e erro. Foi instalado um potenciômetro na entrada inversora do ampop. Obteve-se uma resposta satisfatória com um ganho de 178.

Os valores obtidos na ação proporcional e na integral são inseridos no último amplificador do circuito, que está no modo subtrator unitário, onde fará a subtração dos dois resultados, obtendo em sua saída um erro igual a zero. Com o erro zerado, tem-se um sinal de saída do circuito de controle. Esse sinal será inserido no comparador do circuito modulador, e a comparação da onda triangular com a tensão de controle irá gerar o PWM que irá fornecer a potência necessária para que o LED tenha uma intensidade luminosa que, somada com a iluminação ambiente, atenda aos requisitos estabelecidos pela norma.

O fluxograma do circuito de controle é demonstrado pelo fluxograma da figura 6.

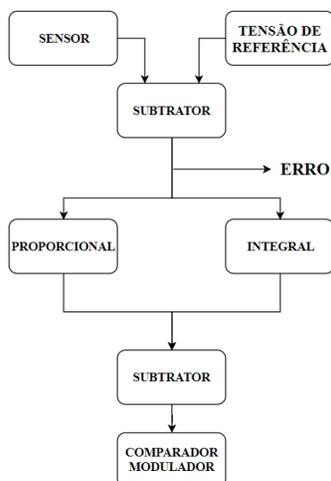


Figura 6 - Fluxograma funcionamento do circuito de controle.

### 6.3 Interligação dos circuitos

Após projetar, simular e testar virtualmente os circuitos de modulação e de controle, eles foram interligados, obtendo o circuito da figura 7. Conforme descrito nas seções anteriores, o circuito de controle irá fornecer um sinal que será ajustado conforme a leitura do sensor, esse sinal vai ser comparado com uma onda triangular e será gerado um sinal PWM para ajustar a potência fornecida para o LED, para que a iluminação ambiente + iluminação LED mantenham o valor constante de 700 lux durante as oscilações de iluminação.

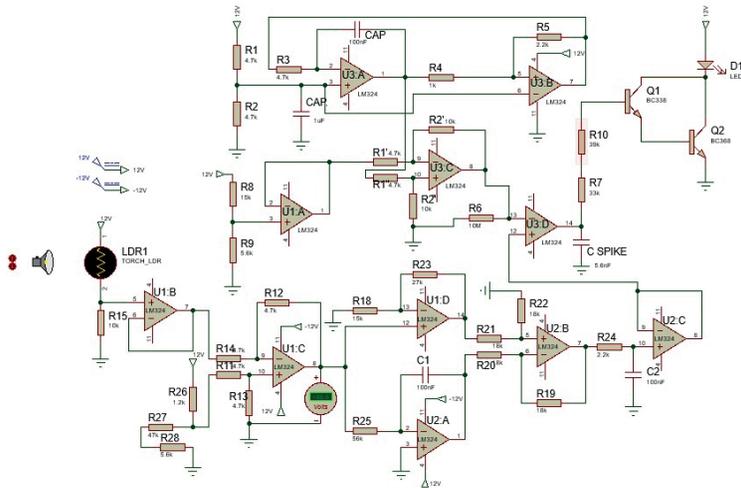


Figura 7 - Circuito final da luminária simulado em Software.

O Funcionamento do circuito final obtido através de estudos e simulações é demonstrado pelo fluxograma da figura 8.

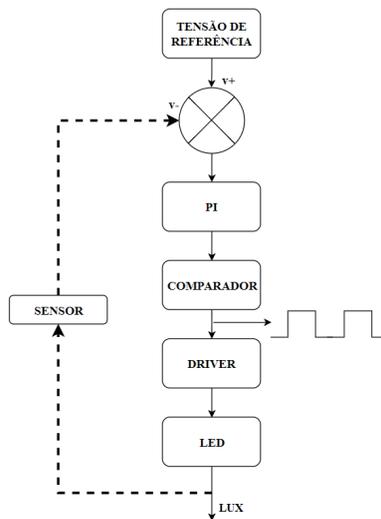


Figura 8 - Fluxograma funcionamento luminária.

## 7 | RESULTADOS

### 7.1 Agrupamento e prototipagem dos circuitos

Após os testes, os circuitos de modulação e controle da luminária foram agrupados e prototipados em duas placas de fenolite separadas, conforme figuras 9 e 10, com o intuito de visualizar a implementação e a funcionalidade do projeto.



Figura 9 - Circuito modulador prototipado.

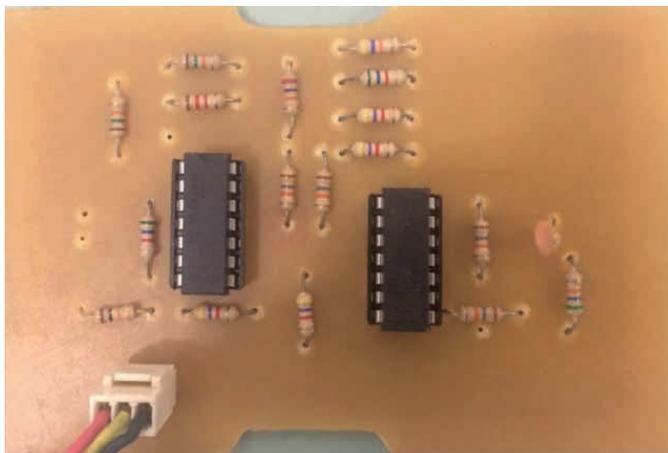


Figura 10 - Circuito de controle prototipado.

## 7.2 Circuito modulador

Realizada as medições em laboratório com osciloscópio, pôde-se verificar o funcionamento e características do circuito. O oscilador gerou uma onda triangular mostrada na figura 11.

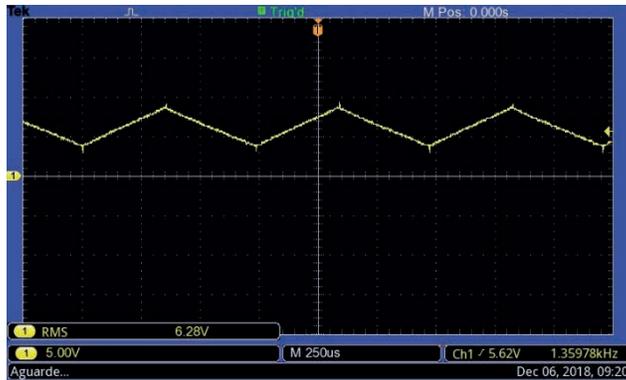


Figura 11 - Onda triangular na saída do oscilador.

A onda triangular apresenta uma amplitude de 6.4V, tendo como valor mínimo 3V e máximo de 9.4V, conforme informações obtidas no osciloscópio, exibidos na figura 12.



Figura 12 - Folha de Dados Onda triangular na saída do oscilador.

Após passar pelo subtrator amplificador, foi obtida a onda triangular mostrada na figura 13.

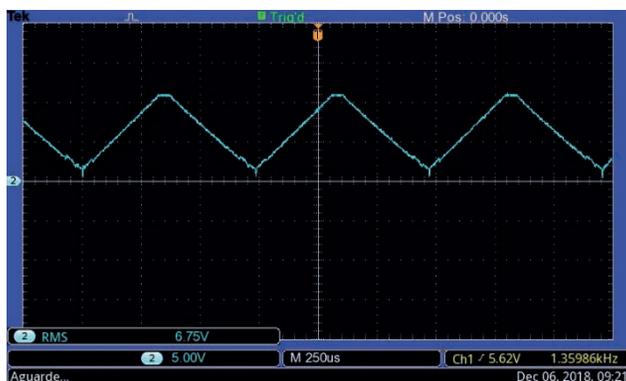


Figura 13 - Onda triangular na saída do subtrator amplificador.

A onda triangular apresenta uma amplitude de 8V, tendo como valor mínimo 0.4V e máximo de 11V, conforme informações obtidas no osciloscópio, exibidos na figura 14.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	737.0us	Larg. Pos	335.0us	Excesso pos.	2.50%
Frequência	1.357kHz	Larg. Neg	402.0us	Excesso Neg.	30.0%
Pico a Pico	10.6V	RMS	6.74V	Larg estouro	2.216ms
Médio	6.10V	Cursor RMS	6.74V	Cnt pls pos	3.00
Ciclo RMS	6.98V	Ciclo Tarefa	45.4%	Cnt pls neg	3.00
Mínimo	400mV	Ciclo neg.	54.5%	Cnt brd dsc	3.00
Máximo	11.0V	Média ciclo	6.36V	Cnt brd asc	3.00
T. subida	213.0us	Média cursor	6.10V	Área	15.24mVs
T. descida	231.0us	Alto	10.8V	Área ciclo	4.686mVs
Amplitude	8.00V	Baixo	2.80V		

2 5.00V M 250us Ch1 / 5.62V 1.35909kHz  
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:22

Figura 14 - Folha de dados Onda triangular na saída do subtrator amplificador.

O resultado difere do circuito simulado por questões de não existirem componentes ideais, porém o resultado obtido é satisfatório.

### 7.3 Circuito de controle

Realizadas as medições em laboratório com osciloscópio, pôde-se verificar o funcionamento e características do circuito. Podemos ver na figura 15 que a tensão lida no sensor consegue seguir a tensão de referência.

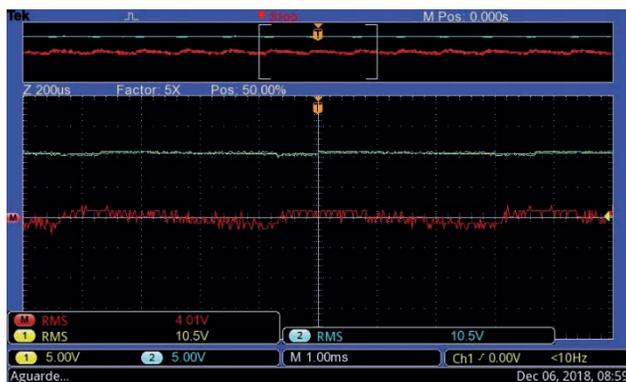


Figura 15 - Tensão no sensor, em amarelo. Tensão de referência, em azul. Erro medido através da função MATH do osciloscópio.

A tensão de referência possui um valor RMS de 10.5V, conforme mostra figura 15 e figura 16.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	80.00us	Larg. Pos	80.00us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	12.50kHz	Larg. Neg	0.000s	Excesso Neg	0.00%
Pico a Pico	600mV	RMS	10.5V	Larg estouro	99.52ms
Médio	10.5V	Cursor RMS	10.5V	Cnt pls pos	239
Ciclo RMS	10.5V	Ciclo Tarefa	100%	Cnt pls neg	240
Mínimo	10.2V	Ciclo neg.	0.00%	Cnt brd dsc	128
Máximo	10.8V	Média ciclo	10.5V	Cnt brd asc	127
T. subida	26.66us	Média cursor	10.5V	Área	1.058Vs
T. descida	160.0us	Alto	10.8V	Área ciclo	840.0uVs
Amplitude	600mV	Baixo	10.2V		

1 5.00V 2 5.00V M 10.0ms Ch1 0.00V <10Hz  
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:03

Figura 16 - Folha de dados tensão de referência.

A tensão fornecida pelo sensor através da leitura da iluminação tem um valor RMS de 10.5V, conforme folha de dados na figura 17.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	780.0us	Larg. Pos	740.0us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	1.282kHz	Larg. Neg	40.00us	Excesso Neg	0.00%
Pico a Pico	1.20V	RMS	10.5V	Larg estouro	97.70ms
Médio	10.5V	Cursor RMS	10.5V	Cnt pls pos	84.0
Ciclo RMS	10.5V	Ciclo Tarefa	94.8%	Cnt pls neg	85.0
Mínimo	9.80V	Ciclo neg.	5.13%	Cnt brd dsc	2.00
Máximo	11.0V	Média ciclo	10.5V	Cnt brd asc	2.00
T. subida	160.0us	Média cursor	10.5V	Área	1.056Vs
T. descida	280.0us	Alto	11.0V	Área ciclo	8.230mVs
Amplitude	1.20V	Baixo	9.80V		

1 5.00V 2 5.00V M 10.0ms Ch1 0.00V <10Hz  
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:03

Figura 17 - Folha de dados tensão no Sensor.

O erro calculado através da função MATH do osciloscópio, onde ele realiza a subtração de um sinal do outro, tem um valor RMS de 203mV conforme mostrado na figura 18.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	757.3us	Larg. Pos	444.0us	Excesso pos.	200%
Frequência	1.320kHz	Larg. Neg	313.3us	Excesso Neg	200%
Pico a Pico	1.00V	RMS	203mV	Larg estouro	99.80ms
Médio	-27.7mV	Cursor RMS	203mV	Cnt pls pos	328
Ciclo RMS	192mV	Ciclo Tarefa	58.6%	Cnt pls neg	329
Mínimo	-600mV	Ciclo neg.	41.3%	Cnt brd dsc	329
Máximo	400mV	Média ciclo	-70.9mV	Cnt brd asc	329
T. subida	16.00us	Média cursor	-27.7mV	Área	-2.776mVs
T. descida	10.66us	Alto	0.00V	Área ciclo	-53.76uVs
Amplitude	200mV	Baixo	-200mV		

1 5.00V 2 5.00V M 10.0ms Ch1 / 0.00V <10Hz  
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:03

Figura 18 - Folha de dados erro função MATH.

O erro real medido na saída do subtrator unitário do circuito de controle possui a forma mostrada na figura 19.

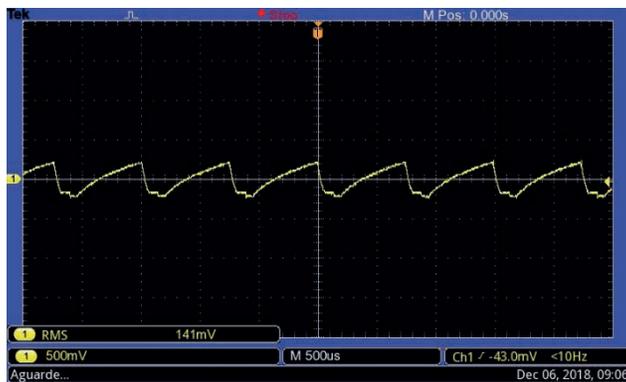


Figura 19 - Erro medido na saída do subtrator.

Podemos ver que o erro medido possui um valor RMS de 142mV, com mínimo de -240mV, máximo de 260mV, e amplitude de 500mV, conforme folha de dados da figura 20.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	750.0us	Larg. Pos	410.0us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	1.333kHz	Larg. Neg	340.0us	Excesso Neg	0.00%
Pico a Pico	500mV	RMS	142mV	Larg estouro	4.864ms
Médio	-8.18mV	Cursor RMS	142mV	Cnt pls pos	6.00
Ciclo RMS	141mV	Ciclo Tarefa	54.6%	Cnt pls neg	7.00
Mínimo	-240mV	Ciclo neg.	45.3%	Cnt brd dsc	7.00
Máximo	260mV	Média ciclo	-2.77mV	Cnt brd asc	6.00
T. subida	430.0us	Média cursor	-8.18mV	Área	-40.88uVs
T. descida	62.00us	Alto	260mV	Área ciclo	-2.080uVs
Amplitude	500mV	Baixo	-240mV		

1 500mV M 500us Ch1 / -43.0mV <10Hz  
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:06

Figura 20 - Folha de dados erro medido no subtrator.

Com base nas medições feitas, é possível visualizar que o circuito de controle satisfaz o seu objetivo de funcionamento e consegue adequar a intensidade luminosa fornecida pela luminária para que a iluminação fique em um nível constante durante todo o tempo de funcionamento.

## 7.4 Curva de regressão não-linear

Para atestar o funcionamento correto do sensor utilizado, foi feita uma curva de regressão não-linear, onde foram medidos os valores das resistências apresentadas no LDR conforme os níveis de iluminância medidos com um luxímetro. É necessário fazer este levantamento devido a cada LDR ter suas características e respostas únicas, não sendo possível obter valores através de consultas à datasheets. Na figura 21, podemos ver a tabela que foi montada em Excel com os valores necessários para montar a curva de regressão do sensor.

Na primeira coluna temos os valores de resistência medidos no LDR, conforme a iluminância medida que está indicada na segunda coluna. Na terceira coluna estão relacionados os valores de resistência calculados para o LDR conforme a iluminância medida. A fórmula para calcular a resistência do LDR é dada por:

$$R_{ldr} = \frac{R0}{E^n}$$

Onde:

- R0 = Resistência a 1 lux
- E = Intensidade luminosa em lux
- n = Fator individual do LDR, entre 0.6 e 0.

LDR 3 (pequeno)						
Rldr real (k ohms)	E (lux)	Rldr calculado	Erro (Real - calculado)	Erro² =	Sqtot = (Real - média)²	
62,30	5	60,64650425	1,65	2,734048196	2855,381	
29,60	11	31,53755804	-1,94	3,75413116	429,972	
22,60	14	25,82076017	-3,22	10,37329606	188,671	
12,89	33	12,68067106	0,21	0,045818604	16,207	
10,39	48	9,29371525	1,10	1,201840254	2,328	
8,15	70	6,798726067	1,35	1,831350338	0,510	
7,07	71	6,717240599	0,35	0,124439195	3,219	
5,52	105	4,85583478	0,66	0,441115444	11,184	
4,61	116	4,470749587	0,14	0,019390677	18,099	
4,82	126	4,174431821	0,65	0,416758273	16,356	
3,83	177	3,149108318	0,68	0,463613483	25,344	
2,61	284	2,127604906	0,48	0,232705026	39,115	
2,60	285	2,12141195	0,48	0,229046522	39,241	
2,33	325	1,902487823	0,43	0,182766661	42,696	
2,17	365	1,727890894	0,44	0,195460462	44,813	
1,454	592	1,157005333	0,30	0,088205832	54,912	
0,880	1068	0,709288123	0,17	0,029142545	63,748	
0,740	1206	0,641290034	0,10	0,009743657	66,003	
0,610	1812	0,45753237	0,15	0,023246378	68,132	
0,616	1833	0,453180993	0,16	0,026510029	68,033	
0,359	4860	0,201872296	0,16	0,024689115	72,339	
8,86			Soma e² = / Soma SQ =	22,4453179	4126,303	

Figura 21 - Tabela de Dados Regressão Não-Linear.

Na quinta coluna está calculado o erro quadrático entre os valores medidos e calculados,  $(R_{ldr\text{ real}} - R_{ldr\text{ calculado}})^2$ . A somatória destes valores será utilizada para encontrar os valores de R0 e n. Para encontrar os valores de R0 e n, foram estimados alguns valores aleatórios para os mesmos e utilizada a ferramenta Solver do Excel para minimizar o erro quadrático através da alteração dos parâmetros R0 e n, a fim de aproximar os valores calculados dos valores reais. Como resultado, foram obtidos os seguintes valores:

- $R_0 = 230.4\text{ k}\Omega$
- $n = 0.8293$

Plotando o gráfico da curva de regressão não-linear obtemos as curvas conformes figura 22.



Figura 22 - Curva de Regressão Não-Linear.

Para assegurar a confiabilidade dos valores obtidos, foi utilizado o método do Coeficiente de Determinação. Também chamado de  $R^2$ , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados. O  $R^2$  varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados [6].

A fórmula do  $R^2$  é dada por:

$$R^2 = 1 - \frac{e^2}{g^2}$$

$$e^2 = \sum_{1}^n (R_{ldr\text{ medido}} - R_{ldr\text{ calculado}})^2$$

$$g^2 = \sum_{1}^n (R_{ldr\text{ medido}} - \text{média dos valores})^2$$

Realizando os cálculos, foi obtido um  $R^2 = 0.9946$ , o que indica que o sensor utilizado no projeto tem alta confiabilidade.

## 7.5 Comparador e saída do controlador PI

Foram obtidos os seguintes sinais referentes as tensões de saída do controlador PI, em amarelo, e do PWM gerado pelo comparador, em azul.



Figura 23 - Saída controlador PI, em amarelo. Saída PWM comparador, em azul.

O sinal do controlador possui uma boa estabilidade, com um valor RMS de 3.2V no ponto que foi medido, com uma amplitude de 1.8V, com mínimo de 2.2V e máximo de 4V, conforme mostrado na figura 24.

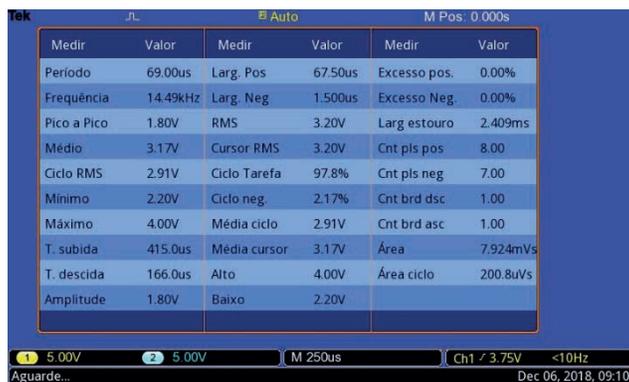


Figura 24 - Folha de dados sinal controlador.

Neste mesmo ponto, o sinal PWM gerado pela comparação do sinal do controlador com a onda triangular tem um Duty cycle de 17.1%, com um valor RMS de 4.09V, conforme mostrado na figura 25.



Figura 25 - Folha de dados sinal PWM.

A fim de verificar a faixa de frequência de operação da luminária, foram coletados a frequência do circuito quando a luminária estava quase totalmente apagada e quando ela estava em seu brilho máximo.



Figura 26 - Folha de dados PWM com Duty cycle a 1.1%

Com o Duty cycle do PWM a 1.1%, podemos ver pela folha de dados da figura 26 que a frequência de operação é de, aproximadamente 1.3kHz.

Na figura 27, podemos ver na folha de dados que com o Duty cycle do PWM em 100%, a frequência de operação é de 500kHz, trazendo a faixa de operação entre 1.3 e 500 kHz.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	2.000us	Larg. Pos	2.000us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	500.0kHz	Larg. Neg	0.000s	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	600mV	RMS	10.9V	Larg estouro	2.496ms
Médio	10.9V	Cursor RMS	10.9V	Cnt pls pos	711
Ciclo RMS	10.9V	Ciclo Tarefa	100%	Cnt pls neg	712
Mínimo	10.6V	Ciclo neg.	0.00%	Cnt brd dsc	36.0
Máximo	11.2V	Média ciclo	10.9V	Cnt brd asc	37.0
T. subida	1.000us	Média cursor	10.9V	Área	27.28mVs
T. descida	1.000us	Alto	11.2V	Área ciclo	21.80uVs
Amplitude	600mV	Baixo	10.6V		

1 5.00V 2 5.00V M 250us Ch2 / 1.80V 1.35869kHz  
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:43

Figura 27 - Folha de dados PWM com Duty cycle a 100%.

Ao final dos testes, foi montada uma estrutura física para a luminária, conforme figura 28.



Figura 28 - Estrutura física da luminária.

Após a implementação do projeto foi obtido uma luminária de baixo consumo. O circuito da figura 7 foi o circuito final montado e testado. Conforme os testes, os circuitos mostraram um comportamento satisfatório e que atendeu os objetivos do projeto. O projeto final teve um custo de aproximadamente R\$80,00 para ser implementado, custo qual possibilita o acesso ao protótipo para a comunidade em geral, porém o circuito montado é inviável para a comercialização devido as novas tecnologias embarcadas presentes no mercado atual. O projeto se mostra como um projeto de média/alta dificuldade de implementação e de baixo custo, sendo viável a sua implementação e prototipagem para a

elaboração de estudos mais aprofundados, ou adaptar o mesmo para plataformas digitais de tecnologia embarcada.

## REFERÊNCIAS

[1] MALVINO, A; BATES, D. J. **Eletrônica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. v. 1.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1**: Iluminação de Ambientes de Trabalho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: [http://paginapessoal.utfpr.edu.br/vilmair/instalacoes-prediais-1/normas-e-tabelas-de-dimensionamento/NBRISO\\_CIE8995-1.pdf/view](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/vilmair/instalacoes-prediais-1/normas-e-tabelas-de-dimensionamento/NBRISO_CIE8995-1.pdf/view). Acesso em: 28 nov. 2018.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5413**: Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM802/NBR5413.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018.

[4] POMILIO, José Antenor. **ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**. Publicação FEEC 01/98 – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas. 2009.

[5] PHILIPS [*NXP Semiconductors*]. **LM324 Datasheet**. 1995. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17871/PHILIPS/LM324.html>. Acesso em: 01 nov. 2018.

[6] R<sup>2</sup>. In: WIKIPEDIA: the free encyclopedia. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/R²>. Acesso em: 01 nov. 2018.

[7] BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.