



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



GUSTAVO HENRIQUE BRAGA PEIXOTO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ILUMINÂNCIA

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



GUSTAVO HENRIQUE BRAGA PEIXOTO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ILUMINÂNCIA

Monografia de graduação apresentada ao Colegiado do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador:

Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Ouro Preto, 2019

P379d

Peixoto, Gustavo Henrique Braga.
Desenvolvimento de um sistema de medição de iluminância [manuscrito] /
Gustavo Henrique Braga Peixoto. - 2019.

71f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José Rocha Reis.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas
Fundamentais.

1. Medição Iluminância. 2. Metrologia. 3. Calibração. 4. Instrumentação. I.
Rocha Reis, Agnaldo José . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Monografia defendida e aprovada, em 10 de abril de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis – Orientador

A handwritten signature in blue ink, appearing as a series of connected, wavy lines.

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, circular loop at the beginning followed by several smaller loops and a final flourish.

Prof. Dr. Alan Kardek Rego Segundo – Professor Convidado

RESUMO

No presente trabalho objetivou-se o desenvolvimento de um sistema de medição de iluminância de baixo custo. Para alcançar tal objetivo foi utilizado um sensor LDR, e como sensor de referência para a calibração foi escolhido o BH1750. Para a realização do processo de calibração optou-se pela construção de um ambiente fechado e isolado de interferências externas. Esse ambiente foi desenvolvido de forma a possibilitar, através de comandos em um software no computador, variar a iluminância em seu interior permitindo assim a sua utilização para a obtenção dos pontos para a calibração. Para tal ambiente, foi desenvolvido um circuito eletrônico e uma lógica de programação para o Arduino. Para o sistema de medição foi construído um outro circuito que pudesse realizar as leituras, através de um segundo Arduino, tanto do LDR quanto para sensor padrão de referência, o BH1750. Para que fosse possível variar a iluminância do ambiente e obtenção das leituras dos sensores foram criadas duas aplicações gráficas para computador. O resultado final foi um sistema de medição de baixo custo e totalmente funcional que pode ser aplicado a inúmeros projetos como os voltados à domótica.

Palavras-chave: Medição Iluminância, LDR, Calibração, Instrumentação, Metrologia.

ABSTRACT

This work's goal is the low-cost illuminance measurement system development. So that it could be achieved this goal was used an LDR sensor and how reference sensor to calibrate was used a commercial sensor, BH1750. To carry out the calibration procedure it was decided to construct a closed and isolated environment of interference. This environment has been developed to allow, through computer commands, vary the internal illuminance with the objective of obtaining the points for the calibration. For this environment an electronic circuit and programming logic was developed through an Arduino. For the measuring system, another circuit was built to allow the readings of the sensors through a second Arduino for LDR and BH1750. To vary the illuminance and to obtain the readings of the sensors, two applications for computers were developed. The end result was a low-cost and fully functional measuring system that can be used in home automation projects.

Key words: Illuminance Measurement, LDR, Calibration, Instrumentation, Metrology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um processo monitorado

Figura 2: Esquema de um processo controlado

Figura 3: Módulos básicos de um sistema de medição

Figura 4: Circuito de variação de iluminância

Figura 5: Circuito de medição

Figura 6: Módulo do sensor LDR

Figura 7: Diagrama de bloco simplificado do BH1750

Figura 8: Sensor BH1750

Figura 9: Ligação do LM7812

Figura 10: Fonte de alimentação do circuito

Figura 11: Pinagem CI L293D

Figura 12: Fita de LED semelhante à utilizada no projeto

Figura 13: Arduino do sistema de medição

Figura 14: Arduino sistema de variação de iluminância

Figura 15: Módulos funcionais que compõem o sistema de medição desenvolvido

Figura 16: Esquema de ligação do LDR

Figura 17: Sinal analógico sendo amostrado e quantizado

Figura 18: Interferências sujeitas sistema de medição desenvolvido

Figura 19: Ambiente de calibração desenvolvido

Figura 20: Exemplo de sinais PWM com diferentes *Duty Cycle*

Figura 21: Medição da tensão sob o LDR

Figura 22: Ambiente com 20% e 100% de iluminância, respectivamente

Figura 23: Gráfico obtido com a calibração

Figura 24: Fluxograma do *firmware* do sistema de medição

Figura 25: Fluxograma da lógica da obtenção da constante k para correção do erro sistemático

Figura 26: Fluxograma do *firmware* do sistema de variação de iluminância

Figura 27: Aplicação de supervisão das medidas dos sensores

Figura 28: Aplicação de variação de iluminância

Figura 29: Interior do ambiente de calibração

Figura 30: Sensores no interior do ambiente de calibração

Figura 31: Medição da temperatura durante a calibração

Figura 32: Fitas de LED do ambiente de calibração

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação do LDR

Tabela 2: Especificação do BH1750

Tabela 3: Especificação do LM7812

Tabela 4: Medições obtidas na calibração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos gerais	13
1.2 Objetivos específicos	13
1.3 Justificativa do trabalho.....	13
1.4 Metodologia.....	14
1.5 Estrutura do trabalho	14
2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE FOTOMETRIA	16
2.1 Intensidade Luminosa.....	16
2.2 Fluxo Luminoso.....	16
2.3 Iluminância	16
3 CONCEITOS SOBRE SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	17
3.1 Tipos de indicações	17
3.2 Finalidades de um sistema de medição.....	18
3.2.1 Monitoramento	18
3.2.2 Controle	19
3.3 Erro de medição.....	19
3.3.1 Tipo de erros	20
3.3.1.1 Erro sistemático	20
3.3.1.2 Erro aleatório	21
3.3.2 Correção do erro sistemático	21
3.3.3 Incerteza padrão.....	22
3.3.4 Repetitividade.....	22
3.4 Módulos básicos de um sistema de medição	23
3.4.1 Transdutor.....	23
3.4.2 Condicionador de sinais	23
3.4.3 Dispositivo registrador	24
3.4.4 Dispositivo de indicação.....	24
3.5 Calibração.....	24
4 CONSTITUIÇÃO DO TRABALHO	25
4.1 Materiais	26
4.1.1 Sensor LDR	26
4.1.2 Sensor BH1750.....	28

4.1.3 Regulador de tensão.....	29
4.1.4 Fonte de alimentação.....	30
4.1.5 Circuito L293D.....	31
4.1.6 Fita de LED.....	31
4.1.7 Arduino.....	32
5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO.....	34
5.1 Funcionamento do sistema.....	34
5.2 Processo de medição.....	34
5.2.1 Interferências.....	35
5.3 Ambiente de calibração.....	37
5.4 Instrumentação.....	38
5.4.1 Circuito eletrônico do LDR.....	39
5.4.2 Circuito do sistema de variação de iluminância.....	39
5.5 Processo calibração.....	41
5.6 Firmwares.....	43
5.6.1 Firmware do sistema de medição.....	43
5.6.2 Firmware do sistema de variação de iluminância.....	45
5.7 Aplicações gráficas desenvolvidas.....	46
5.7.1 Aplicação de supervisão.....	46
5.7.2 Aplicação de variação de iluminância.....	47
5.8 Resultados obtidos.....	48
5.8.1 Calibração.....	48
5.8.2 Correção de erro sistemático.....	48
5.8.3 Construção física.....	49
6 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS.....	53
APÊNDICE A.....	55
APÊNDICE B.....	59
APÊNDICE C.....	61
APÊNDICE D.....	66

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade a necessidade de se medir surgiu de forma natural, fazendo parte da evolução da nossa espécie. Posteriormente, as necessidades cotidianas nos levaram ao desenvolvimento das primeiras noções matemáticas, sendo inicialmente a concepção dos conceitos de números, de contagem e mais adiante o de medição.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), o aprimoramento crescente das civilizações trouxe novas situações em que os números não eram mais suficientes para exprimir concretamente certas necessidades. A noção de distância, demarcação de terrenos, o comércio de alimentos, não poderiam ser realizados sem algum tipo de unidade que pudesse ser, de alguma forma, associada à quantidade a ser expressa.

As primeiras unidades de medidas criadas se baseavam na anatomia humana como por exemplo a distância que era medida em pés.

Com o passar dos anos os sistemas de medições evoluíram e alguns se transformaram hoje, no que são conhecidos instrumentos de medições eletrônica. Com advento das novas tecnologias no ramo da eletrônica foi possível o desenvolvimento de sistemas de medições sofisticados. Hoje é possível através de sensores eletrônicos, devidamente calibrados, se mensura grandezas como temperatura, vazão, distância, iluminância e inúmeras outras de forma precisa e rápida.

Atualmente, os sistemas de medição que utilizamos no nosso dia a dia são, em grande parte, resultados de uma necessidade de se estabelecer parâmetros que permitissem validar e oferecer uma referência para as nossas ações.

É através dos valores obtidos através de um sistema de medição, que podemos tomar decisões referentes ao controle das atividades envolvidas para obtenção de algum resultado. Os sistemas de medições são extremamente importantes seja dentro das indústrias no controle e monitoramento de processo, ou seja, nas atividades mais simples e corriqueiras do dia a dia.

De acordo com Bega (2003), em todos os processos é indispensável se controlar e manter as principais variáveis, tais como pressão, nível, vazão, temperatura, PH, condutividade, velocidade, umidade, etc.

Pode se concluir que de acordo com o autor supracitado a necessidade de se estabelecer um sistema de medição que possa representar de forma satisfatória o resultado de medição, indicando o seu valor real. Essas necessidades são na maioria dos casos atendidas aplicando se corretamente as técnicas da metrologia, instrumentação e normas de regulamentação.

O presente trabalho aborda os conceitos de metrologia e instrumentação e os aplica no desenvolvimento de um sistema de medição de iluminância. Para o desenvolvimento desse sistema utilizou-se o LDR como elemento sensor.

1.1 Objetivos gerais

- Desenvolver um sistema de medição de iluminância de baixo custo.

1.2 Objetivos específicos

- A obtenção de um sistema capaz se ser aplicado em projetos voltados ao controle e monitoramento de iluminância.

1.3 Justificativa do trabalho

A justificativa para o trabalho pode ser subdivida de por dois fatores. O primeiro fator é o fato de se tratar de um trabalho de desenvolvimento de um sistema de medição. Os conceitos teóricos e técnicos utilizados para esse desenvolvimento estão intimamente ligadas à área de Automação. Conceitos de eletrônica, instrumentação, programação e metrologia faz parte dos pilares da Automação. A escolha desse tema possibilitou a aplicação, de uma considerável carga, de importantes conhecimentos.

O segundo fator foi o da escolha de qual sistema de medição desenvolver. Após pesquisas sobre que tipo de sistema desenvolver, concluiu se que seria interessante o desenvolvimento de um sistema de medição de iluminância visto a sua ampla aplicação em sistema de controle e monitoramento.

A controle adequado de iluminância de certos ambientes podem apresentar ótimos resultados paras as atividades exercidas nesse ambiente. A correta iluminância de um ambiente pode propiciar um

aumento da facilidade de exercer uma atividade, criar uma atmosfera agradável e propiciar um ambiente mais seguro para o trabalho.

Dentro da aplicabilidade do sistema desenvolvido tem-se a sua utilização para a avaliação de iluminância para a adequações conforme NBR5413.

Segundo a NBR5413 o seu objetivo é “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. ”

É possível perceber que a questão de iluminância em ambientes tem um fator de importância considerável que é regido por norma. Sendo assim o desenvolvimento desse trabalho se mostrou válido.

1.4 Metodologia

O trabalho baseou se na utilização do conhecimento teórico em consonância com o conhecimento prático.

Foram utilizados ensaios práticos desde a confecção dos circuitos eletrônicos à confecção do ambiente de calibração. Os resultados foram validados através de ensaios e analisados em conjunto com o conhecimento teórico necessário.

Para a determinação da correção do erro sistemático, por exemplo, foi utilizado uma metodologia experimental para a determinação de sua tendência de correção, visto que utilização da equação teórica não se mostrou viável.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi subdivido nos seguintes capítulos:

No capítulo 1, é feita uma introdução a respeito do conceito de medição e sua história, apresentação dos objetivos gerais, objetivos específicos, justificativa e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2, são apresentados alguns dos conceitos básicos sobre fotometria necessários para o desenvolvido do trabalho. Dentre esses conceitos tem-se o de: intensidade luminosa, fluxo luminoso e iluminância.

No capítulo 3, são apresentados importantes conceitos a respeito de sistemas de medições. Dentre os conceitos abordados tem-se: tipos de indicações, finalidade de um sistema de medição, monitoramento, controle, erro de medição, classificação de erros, correção do erro sistemático, determinação da incerteza padrão, determinação da repetibilidade, módulos básicos constituintes de um sistema de medição, transdutores, condicionamento de sinais, dispositivo registrador, dispositivo de indicação e calibração

No capítulo 4, tem-se os elementos constituintes do trabalho em si. Nesse capítulo foram apresentados os circuitos desenvolvidos e os materiais utilizados.

No capítulo 5, é apresentado o sistema de medição desenvolvido. Nesse capítulo é apresentado o funcionamento do sistema de forma geral, o processo de medição, as interferências nas quais o sistema está sujeito, ambiente de calibração, instrumentação, circuito do LDR, circuito do sistema de variação de iluminância, processo de calibração, *firmwares* desenvolvidos, aplicações gráficas desenvolvidas e resultados obtidos.

No capítulo 6, é apresentado a conclusão.

2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE FOTOMETRIA

Uma fonte de radiação é aquela que emite ondas eletromagnéticas que possuem diferentes comprimentos. Alguns desses comprimentos são perceptíveis ao olho humano. A luz é, portanto, a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual.

2.1 Intensidade Luminosa

Expressa em candelas, é a intensidade do fluxo luminoso de uma fonte de luz com refletor ou de uma luminária, projetado em uma determinada direção. Uma candela é a intensidade luminosa de uma fonte pontual que emite um fluxo luminoso de um lúmen em um ângulo sólido de um esferoradiano. (OSRAM, 2000)

2.2 Fluxo Luminoso

Fluxo luminoso é a quantidade de luz emitida por uma fonte, medida em lúmens.

2.3 Iluminância

Expressa em lux (lx), indica o fluxo luminoso de uma fonte de luz que incide sobre uma superfície situada à uma certa distância dessa fonte. É a relação entre intensidade luminosa e o quadrado da distância. Na prática, é a quantidade de luz dentro de um ambiente.

3 CONCEITOS SOBRE SISTEMA DE MEDIÇÃO

Um sistema de medição pode ser definido como:

[...] o conjunto de instrumentos ou dispositivos de medição, padrões, operações, métodos, dispositivos de fixação, software, pessoal, ambiente e premissas usadas para quantificar a unidade de medição ou corrigir a avaliação da característica que está sendo medida, ou seja, o processo completo utilizado para obter as medições (IQA, 2004, P. 5).

Um sistema de medição tem por finalidade mensurar quantitativamente o valor de uma grandeza física. ‘Lord Kelvin afirmou, em 1883, que “o conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou fenômeno somente existirá quando for possível medi-lo e expressá-lo por meio de números” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 3). Assim, é possível perceber que somente análises qualitativas são insuficientes para a análise dos fenômenos ou processos.

Medir é uma forma de descrever o mundo através dos números. “Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 3).

Para que se possa validar o quantitativo de uma grandeza física é necessário compará-la com uma grandeza padrão e analisar a quantidade de vezes que essa grandeza está contida no mensurando avaliado. É necessário que a grandeza de referência seja bem definida e reconhecida internacionalmente. A grandeza a ser medida recebe o nome de mensurando. Como exemplos de mensurando tem-se: velocidade de um veículo em movimento, temperatura de uma estufa, massa de um objeto, iluminância de uma lâmpada etc.

3.1 Tipos de indicações

Todo mensurando, após ser devidamente medido, retornará uma indicação, que é “o valor de uma grandeza fornecida por um sistema de medição” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 4). Existem dois tipos de indicação: a indicação direta e a indicação indireta. A indicação direta advém de uma medição direta, que é obtida através de dados experimentais. O valor que se deseja, da grandeza, é obtido comparando-se diretamente o mensurando com instrumentos de medição, graduados na unidade correspondente. Como exemplo de medições diretas tem-se: comprimento, temperatura

através de um termômetro de mercúrio, pressão em um manômetro etc. Já a indicação indireta é aquela que é obtida através da medição direta de outras grandezas, ligadas por uma relação física. As indicações indiretas ocorrem comumente em sistemas de instrumentação eletrônica, nos quais se determina o valor de uma mensurando através da medição de outra variável física. Um exemplo clássico é a medição de massa através de uma balança. Muitas balanças utilizam como elemento sensor os chamados *straining gage* que funcionam pelo princípio da deformação física de um elemento resistivo, que altera o seu valor de resistência elétrica. Através da variação de sua resistência elétrica, tem-se a variação da tensão sobre esse elemento. Esta variação pode ser relacionada com uma outra variável física como por exemplo massa. Tem-se, então, uma relação matemática do tipo:

$$M(V) = \text{Relação física}$$

Onde V é a tensão em volts e M é a massa em Kg.

No exemplo acima tem-se como medição direta a variação de tensão sobre a resistência; através de uma formulação matemática obtém-se o valor da massa sobre a balança.

3.2 Finalidades de um sistema de medição

Os sistemas de medição têm, comumente, duas finalidades: a de monitoramento e a de controle de determinada grandeza física.

3.2.1 Monitoramento

Entende-se por monitoramento como sendo o processo de observar o valor de um mensurando ao longo do tempo. O interesse pode ser em seu valor momentâneo, acumulado ou no histórico de sua variabilidade. Como exemplo, pode-se monitorar a variação da temperatura em um ambiente e relacionar o seu impacto em determinado processo que ocorra neste local. Na figura 1 tem-se um esquema de um processo monitorado.

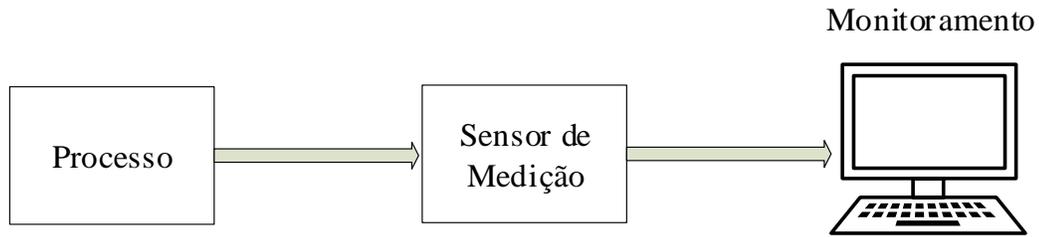


Figura 7: Esquema de um processo monitorado

3.2.2 Controle

Em sistemas de controle, o foco vai além do monitoramento de determinada variável. O objetivo neste caso é manter o mensurando dentro de uma faixa ou com valor fixo durante determinado momento. Na figura 2 tem-se um esquema de um processo controlado.

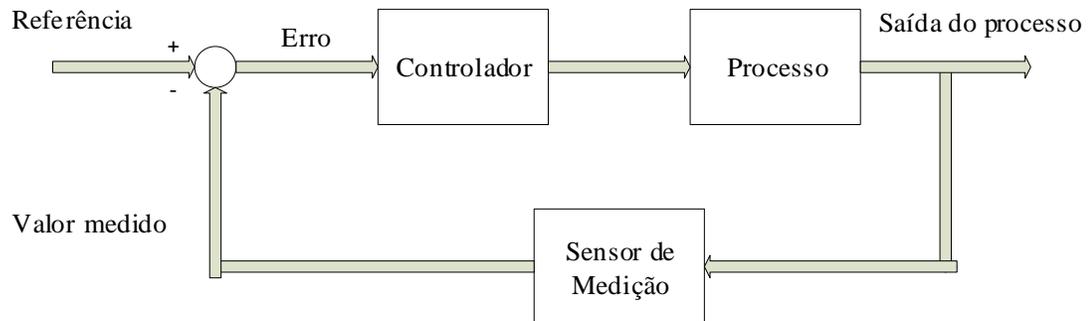


Figura 8: Esquema de um processo controlado

No sistema da figura 2 há um valor definido de *setpoint*, que é o valor, de uma grandeza física, que se deseja manter constante durante determinado período de tempo. O valor de *setpoint* é aplicado a um controlador, que o compara com o valor mensurado no processo. Se o valor do *setpoint* for diferente do valor medido, um sinal de erro é obtido e o controlador o utilizará para corrigir o processo. Pode-se citar como exemplo de sistemas de controle: controle de temperatura em uma estufa, controle de nível de água em um tanque, etc.

3.3 Erro de medição

O erro de medição é “a diferença entre o valor indicado pelo sistema de medição e o valor verdadeiro do mensurando” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 42). Matematicamente, é representado pela equação 2:

$$E = I - VVC \quad (2)$$

Onde E é o erro de medição, I é a indicação do sistema de medição e VVC é o valor verdadeiro convencional ou valor verdadeiro do mensurando.

Em um modelo ideal, um sistema de medição deve ser livre de erros e o seu resultado deve corresponder fielmente ao valor verdadeiro do mensurando. Na prática, a obtenção desse modelo ideal se torna inviável. Os sistemas de medições, mesmo quando muito bem projetados, apresentam algum grau de erro em sua medição. Este grau de erro é esperado e geralmente se encontra dentro de uma faixa aceitável para aquela grandeza. Geralmente os erros são causados por imperfeições do equipamento, influências externas, influência do operador e tempo de uso do sistema de medição. Considerando que os erros de medição existem, é necessário estar atento a este fator e trabalhar para minimizar o seu impacto no processo de aferição.

3.3.1 Tipo de erros

O sistema apresentará erros quando houver divergência entre o valor medido e o valor verdadeiro. Mesmo que o processo de medição seja bem feito, o erro sempre existirá em maior ou menor grau. Em uma medição podem ocorrer erros de vários tipos, que são divididos em dois grandes grupos: os erros sistemáticos e erros aleatórios.

3.3.1.1 Erro sistemático

Erro sistemático “é a parcela previsível do erro. Corresponde ao erro médio” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 40). É um erro que afeta de forma igual todas as n medições efetuadas por um sistema. Assim, um conjunto completo de medições de um mesmo mensurando encontra-se deslocado igualmente do valor verdadeiro.

Os erros sistemáticos podem ser ocasionados por problemas na calibração do instrumento, por influências do ambiente e pelo operador.

3.3.1.2 Erro aleatório

Erro aleatório “é a parcela imprevisível do erro. É o agente que faz com que repetições levem a resultados diferentes” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 41). É a medida da dispersão das n medições em torno de um valor verdadeiro.

Os erros aleatórios são causados por variações aleatórias no processo de medição, que são provenientes de fatores incontroláveis ou que não foram levados em conta no desenvolvimento do dispositivo de medição.

3.3.2 Correção do erro sistemático

Por definição sabe-se que o erro sistemático é um erro que pode ser estimado. Para tal, necessita-se realizar o cálculo da tendência, que “é uma estimativa do erro sistemático” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 47), como mostra a equação 3.

$$Td = \bar{I} - VVC \quad (3)$$

Onde Td é a tendência, \bar{I} é a média de um número finito de indicações e VVC é o valor verdadeiro convencional ou valor verdadeiro do mensurando. O valor verdadeiro convencional é uma estimativa próxima do valor verdadeiro do mensurando.

A correção do erro sistemático é dada pela equação 4.

$$C = -Td \quad (4)$$

Onde C é a correção e Td é a tendência.

Obtendo-se o valor da correção, é possível calcular o valor da indicação corrigida, que é dada pela equação 5.

$$Ic = I + C \quad (5)$$

Onde Ic é a indicação corrigida e I é a indicação da medição corrente.

3.3.3 Incerteza padrão

O desvio padrão de uma distribuição mede o seu grau de dispersão. Para se caracterizar de forma quantitativa a intensidade da componente aleatória do erro de medição, utiliza-se o desvio padrão de uma distribuição normal. A estimativa para o desvio padrão para finitas medições pode ser obtida pela equação 6.

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{v}} \quad (6)$$

Onde μ é a incerteza padrão, I_i a i -ésima indicação, \bar{I} a média das n medições repetitivas efetuadas.

Define-se v como o número de graus de liberdade com o qual a incerteza padrão é estimada e é dado pela equação 7:

$$v = n - 1 \quad (7)$$

Onde v é o número de graus de liberdade e n o número de medições repetitivas efetuadas.

3.3.4 Repetitividade

Repetitividade “é a faixa de valores simétricos em torno do valor médio, dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado com uma certa probabilidade” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 50). Ela “Representa metade do valor da largura da faixa simétrica em torno do zero. É calculada pelo produto da incerteza-padrão pelo respectivo coeficiente t de *Student*” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 61). Matematicamente, é dada pela equação 8.

$$RE = \pm t \times \mu \quad (8)$$

Onde RE é a repetitividade, t é o coeficiente t de *Student* com 95,45% de probabilidade para um determinado grau de liberdade e μ a incerteza padrão.

Considerando o cálculo da incerteza padrão μ com um número de amostras $n \geq 51$ e o coeficiente t de *Student* para uma probabilidade de 95,45%, pode-se adotar o coeficiente t de *Student* com o valor de 2. Logo:

$$t = 2$$

3.4 Módulos básicos de um sistema de medição

Em geral, um sistema de medição é constituído dos seguintes dispositivos: sensor/transdutor, unidade de processamento de sinais e dispositivo registrador/mostrador. Na figura 3 tem-se a representação do esquema básico de um sistema de medição.

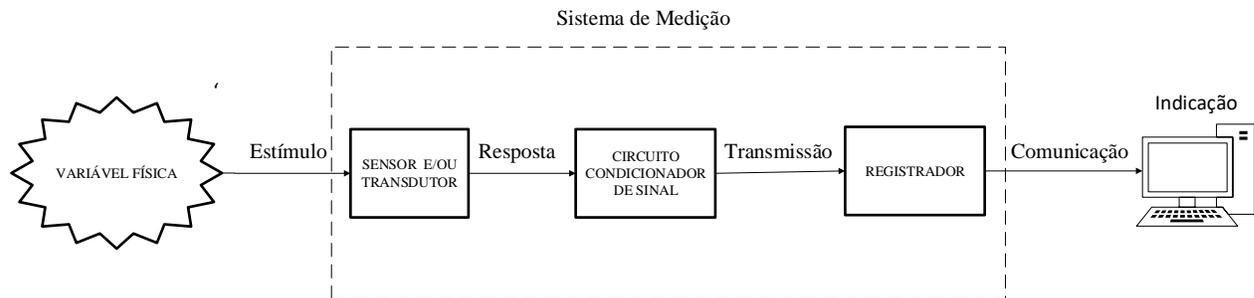


Figura 9: Módulos básicos de um sistema de medição

3.4.1 Transdutor

O transdutor é o primeiro módulo de um sistema de medição, que fica em contato direto com o mensurando. É responsável por transformar uma série de fenômenos físicos em sinais que podem ser medidos. O sinal gerado por um transdutor pode ser elétrico, mecânico, pneumático ou de outra natureza. Esses sinais estão, de algum modo, relacionados fisicamente com a grandeza do mensurando. Resumidamente, pode-se dizer que um transdutor transforma um efeito físico em um outro que seja mais apropriado para ser medido. Em sistemas eletrônicos, em geral, deseja-se transformar as grandezas do mensurando em grandezas elétricas, como tensão e corrente.

3.4.2 Condicionador de sinais

Os transdutores, quando são excitados por algum fenômeno físico, geram em sua saída alguma espécie de sinal. Quando se fala em sistemas de medição eletrônicos o sinal gerado na saída de um transdutor, na maioria dos casos, é um sinal elétrico de corrente ou tensão. É comum que estes sinais, a priori, apresentem um valor baixo de energia, no caso baixa tensão ou baixa corrente. Em sistemas eletrônicos, do tipo embarcados, trabalhar com valores de tensão e corrente baixos é inviável. Um sinal de baixa potência é susceptível a interferências em maior grau que um sinal de maior potência, além do fato de que a percepção de variação de intensidade de sinal pode acabar sendo imperceptível. Para tal, utiliza-se os chamados circuitos de condicionamento de sinal ou

unidade de tratamento de sinal. Este dispositivo tem por finalidade realizar as tarefas de amplificar ou atenuar a potência de um sinal, filtrar, compensar, integrar e processar.

3.4.3 Dispositivo registrador

Conhecido também como processador, o registrador é considerado um dos últimos dispositivos de um sistema de medição e tem por finalidade processar o sinal vindo do módulo de condicionamento de sinais. Esse processamento objetiva transformar um sinal, como o de tensão, no valor de grandeza física de interesse. Como exemplo de dispositivo registrador/processador pode-se citar o Arduino. Tal dispositivo é capaz de receber em sua entrada um sinal elétrico, advindo de um circuito de condicionamento de sinais, e através de uma conversão analógica-digital transformar esse valor em um resultado de medição.

3.4.4 Dispositivo de indicação

Pode ser considerado como o dispositivo responsável por exibir a informação de um determinado equipamento de medição. Como exemplo de dispositivo de indicação temos os sistemas supervisórios, display de lcd, etc.

3.5 Calibração

Calibração é o processo experimental que busca obter uma relação matemática entre os valores indicados pelo sistema de medição com os valores reais do mensurando. Isso se deve ao fato de que um sistema de medição deve corresponder ao valor verdadeiro do mensurando.

Para a realização da calibração é necessário ter em mãos um padrão a ser seguido. O padrão pode ser “uma medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008, P. 128).

4 CONSTITUIÇÃO DO TRABALHO

A calibração de um sensor qualquer requer, a priori, um padrão de referência que possa ser seguido. Como por exemplo: para a calibração de uma balança é necessário a utilização de pesos-padrão como referência; para a calibração de um sensor de temperatura é necessário variar a temperatura do ambiente e ter um outro sensor de temperatura como referência. Para o trabalho em questão, foi necessário utilizar um sensor de medição de iluminância, comercial e já calibrado, como referência.

Para que fosse possível obter diferentes valores de iluminância para a realização do processo de calibração, fez-se necessária a construção de um ambiente que pudesse ser controlado de forma a manter a iluminância constante durante determinado período de tempo. Este ambiente foi utilizado para excitar o sensor, a ser calibrado, à diferentes valores de iluminância. A resposta do sensor a ser calibrado foi comparada com a resposta do sensor padrão para que se pudesse obter a curva de calibração. O sensor calibrado é um LDR (*Light Dependent Resistor*) e o sensor padrão é o BH1750.

Para o desenvolvimento do trabalho, utilizou-se de componentes eletrônicos para montagem dos circuitos. O projeto é constituído basicamente de dois sistemas, um para medição dos sensores BH1750 e LDR e outro para a variação da iluminância do ambiente de calibração. Para cada sistema tem-se um circuito separado. Na figura 4 tem-se representado o circuito de variação de iluminância.

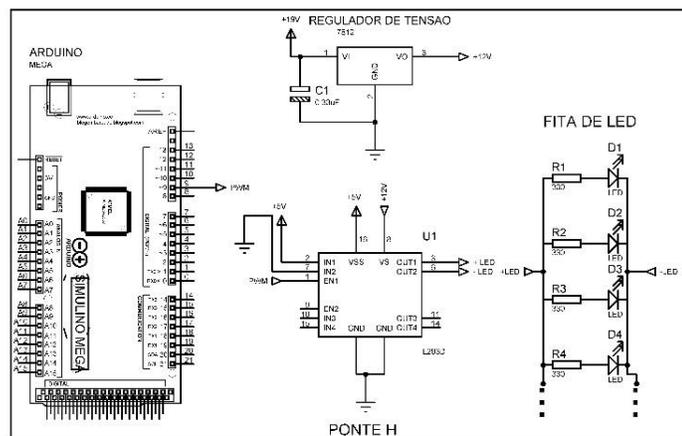


Figura 10: Circuito de variação de iluminância

No circuito tem-se um controlador, o Arduino Mega, responsável por receber o *feedback* do usuário a respeito da iluminância desejada no ambiente. Ao receber o *feedback*, o Arduino Mega envia um

signal de PWM (*Pulse Width Modulation*) para um circuito, que faz o controle de tensão de alimentação da carga. A carga em questão é a Fita de Led, responsável pela iluminância do ambiente de calibração. No circuito tem-se também um regulador de tensão para alimentação da carga.

Na figura 5, tem-se o circuito do sistema de medição, responsável por efetuar a leitura do LDR e do BH1750 e enviar o resultado de medição para o dispositivo mostrador. O dispositivo mostrador neste caso é o sistema de supervisão.

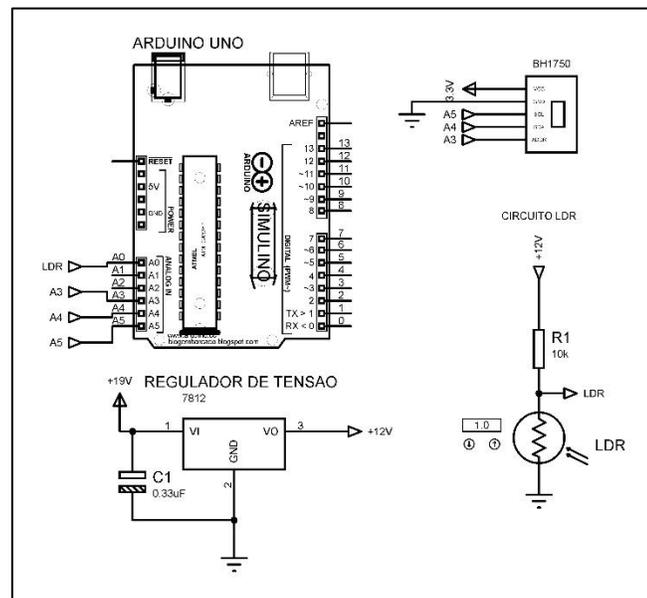


Figura 11: Circuito de medição

4.1 Materiais

Os critérios para escolha das ferramentas de desenvolvimento do sistema de medição foram a simplicidade, o baixo custo dos componentes e o conhecimento prévio obtivo após pesquisas. O custo total do projeto ficou em torno de R\$ 150,00, o que pode ser considerado baixo.

4.1.1 Sensor LDR

O sensor de iluminância escolhido foi o LDR (*Light Dependent Resistor*). Tal elemento funciona como uma resistência elétrica que varia inversamente o seu valor com a variação da iluminância quanto maior o valor da iluminância, menor é o valor de resistência do sensor e vice-versa. O LDR

é considerado uma fotocélula condutora, que é um dispositivo fotosensível que varia sua resistência elétrica quando submetido à luz. Resulta da fotocondutividade da luz que atinge um material semicondutor, que controla o fluxo de corrente que o percorre. Assim, quanto mais luz, maior é a corrente para uma dada tensão aplicada. O material fotocondutor mais comum é o sulfureto de cádmio usado em fotocélulas LDR.

No quesito aplicação, este sensor pode ser utilizado em controle de exposição de câmeras, medição de densidade de toner em máquinas de fotocópia, equipamentos de teste colorimétrico, densímetro, controle automático de iluminação, automatização de espelhos retrovisores e outras inúmeras aplicações derivadas destas (TECHNOLOGIES, 2008).

Na tabela 1 tem-se a especificação do LDR utilizado no projeto.

Tabela 1: Especificação do LDR

Modelo	GL5528
Diâmetro	5mm
Tensão Máxima	150Vcc
Potência Máxima	100mW
Temperatura de Operação	-30 °C a 70 °C
Espectro	510nm
Comprimento dos Terminais	32mm
Resistência no Escuro	10K Ω (0 Lux)
Resistência na Luz	\leq 10K Ω

Na figura 6 tem-se o módulo do sensor LDR utilizado no projeto, na configuração divisor de tensão.

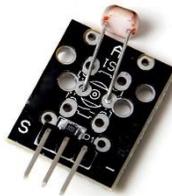


Figura 12: Módulo do sensor LDR

4.1.2 Sensor BH1750

O sensor BH1750 é um sensor de iluminância com interface de comunicação I2C, utilizado para medir iluminância. Sua faixa de medição, segundo *datasheet* do fornecedor, percorre de 1 a 65535 LUX. Para a utilização deste dispositivo é necessário um controlador lógico com comunicação I2C que, em conjunto com a biblioteca lógica do fabricante, permite realizar as medições. As especificações da fabricante, segundo o *datasheet*, estão resumidas na tabela 2.

Tabela 2: Especificação do BH1750

Modelo	Módulo GY-302
CI	BH1750FVI
Tensão Máxima	3 a 5 Vcc
Faixa de Medição	1 a 65535 Lux
Conversor A/D	16 bits
Dimensões	18,5 x 13,9mm
Resposta ao Espectro	Idêntico ao olho humano
Filtro Para Frequências	50 a 60Hz
Influência a Luz Infravermelha	Baixa

Na figura 7 tem-se o diagrama de bloco simplificado do BH1750:

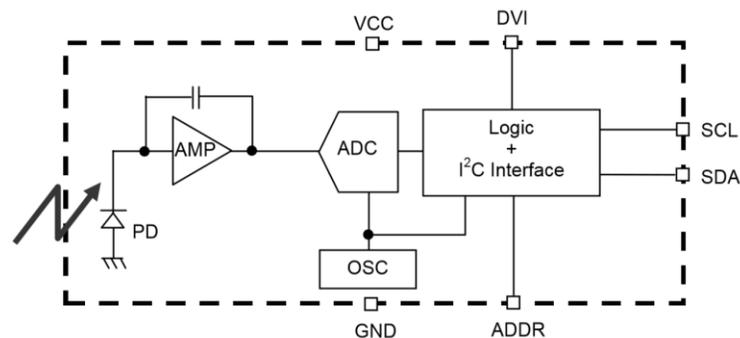


Figura 7: Diagrama de bloco simplificado do BH1750

Já na figura 8, tem-se o circuito integrado do BH1750:



Figura 8: Sensor BH1750

4.1.3 Regulador de tensão

Devido ao fato que o sistema de medição utilizar um elemento passivo, o qual, definido como “um dispositivo que necessita de uma polarização elétrica externa para poder medir uma grandeza elétrica passiva” (RIBEIRO, 2002, P. 101), foi necessário a utilização de um regulador de tensão visando uma alimentação constante e com oscilação desprezível. O dispositivo escolhido foi o regulador de tensão positiva LM7812, que fornece em sua saída uma tensão fixa de 12Vcc e com capacidade máxima nominal a corrente de 1A.

Na tabela 3 tem-se a especificação do *datasheet* do fornecedor.

Tabela 3: Especificação do LM7812

Modelo	LM7812
Corrente Máxima de Saída	1A
Tensão de Saída	12Vcc
Proteções	Sobre Carga e Curto Circuito
Tolerância de Tensão de Saída	± 2%
Dimensões	18,5 x 13,9mm
Temperatura de Operação	0 °C a ± 125°C
Encapsulamento	TO-220

Na figura 9 tem-se a ligação típica, e utilizada no projeto, do LM7812.

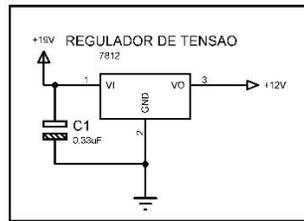


Figura 9: Ligação do LM7812

Segundo o *datasheet* do regulador de tensão LM7812 “é necessário a utilização de um capacitor eletrolítico se o regulador estiver localizado a uma distância apreciável da fonte de alimentação” (MOTOROLA, 1997).

4.1.4 Fonte de alimentação

Para a alimentação do circuito foi utilizada uma fonte de tensão contínua, que “pode ser definida como a tensão que descreve uma constante, ou seja, seu valor não varia ao longo do tempo. Notar, portanto, que uma tensão contínua não tem frequência” (LUQUETA, n.d.).

Escolheu-se uma fonte de notebook de 19Vcc. A escolha se deu pelo fato de que a tensão necessária para alimentar o regulador deve ser maior que 12Vcc; sendo assim, uma fonte de notebook se tornou uma ótima opção por atender os requisitos.

Na figura 10 tem-se a fonte utilizada.



Figura 10: Fonte de alimentação do circuito

4.1.5 Circuito L293D

O circuito L293D é um circuito especial que permite realizar a inversão da direção (polaridade) da corrente que flui através de uma carga. É muito utilizado, por exemplo, para controlar a direção de rotação de velocidade de um motor DC.

No caso do projeto desenvolvido não se deseja controlar nenhum tipo de motor, porém da mesma forma que é possível controlar a velocidade de um motor utilizando o L293D, também é possível controlar a iluminância emitida por LEDs. Para esta tarefa deve-se utilizar um sinal de comando PWM para controlar a tensão sobre a carga no L293D.

Optou-se pelo circuito L293D ao invés de um transistor pela simplicidade e robustez.

Na figura 11 tem-se o circuito L293D.

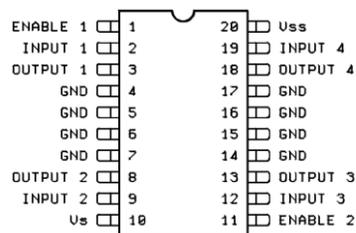


Figura 11: Pinagem CI L293D

4.1.6 Fita de LED

A fita de LED (*Light Emitting Diode*) foi utilizada para iluminação do ambiente de calibração. A escolha se deu pela facilidade de se controlar a sua iluminância e pelo fato de que o calor dissipado pela fita poder ser considerado desprezível, evitando interferências de temperatura. Outro fator importante é que o LED utiliza tensão contínua, sendo assim, não há nenhuma variação da iluminância em nenhuma frequência, diferentemente das lâmpadas de corrente alternada que oscilam a 60Hz. A oscilação causada pela corrente alternada poderia afetar as medições nos sensores acarretando em erros no processo de calibração.

Na figura 12 tem-se uma fita de LED semelhante à utilizada no projeto.



Figura 12: Fita de LED semelhante à utilizada no projeto

A fita de LED utilizada pode ser alimentada com até 12Vcc. No projeto, a tensão sobre ela variou de 0Vcc a 12Vcc através do sinal de PWM.

4.1.7 Arduino

Optou-se por utilizar dois Arduinos, um funcionando como controlador responsável por processar o sinal vindo do circuito do sensor e retornando o valor para o sistema de supervisão, e outro como controlador do circuito de variação de iluminância do ambiente de calibração. Ambos os controladores são independentes entre si, desacoplados eletronicamente e logicamente, visto que um é para o projeto do sistema de medição propriamente dito e o segundo unicamente para a variação de iluminância do ambiente de calibração.

Nas figuras 13 e 14 tem-se respectivamente o Arduino do sistema de medição e o do sistema de variação de iluminância.



Figura 13: Arduino do sistema de medição

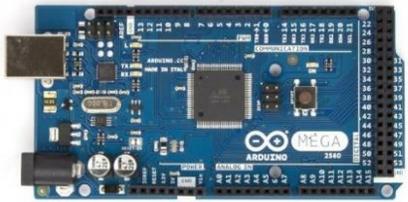


Figura 14: Arduino sistema de variação de iluminância

5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO

Para o desenvolvimento do projeto, primeiramente se pautou na aquisição do conhecimento teórico do processo de medição. Compreendido os diferentes métodos de medição e os prós e contras, propôs-se uma solução para o sistema.

5.1 Funcionamento do sistema

A grande maioria dos sistemas de medição, que operam pelo princípio da indicação, apresentam três módulos funcionais bem definidos. São eles: “o transdutor ou sensor, a unidade de tratamento do sinal e o dispositivo mostrador ou registrador” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008). No caso do sistema de medição desenvolvido tem-se o sensor, uma unidade de excitação do sensor passivo, uma unidade de tratamento de sinal, um dispositivo controlador e, por último, um dispositivo de supervisão dos valores mensurados. A figura 15 mostra, respectivamente, os cinco módulos que compõem o sistema.

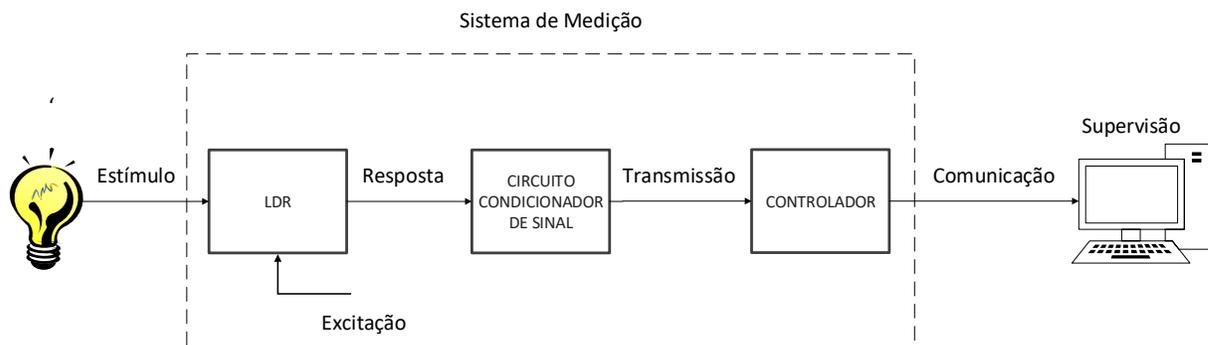


Figura 15: Módulos funcionais que compõem o sistema de medição desenvolvido

5.2 Processo de medição

O processo de medição de iluminância se caracteriza da seguinte forma: o sensor LDR é submetido a certa iluminância, o que faz com que sua resistência varie de forma inversa ao aumento da iluminância. Esta variação de resistência acarreta em uma variação de potencial através do resistor que se encontra em uma ligação do tipo divisor de tensão, como pode ser observado na figura 16.

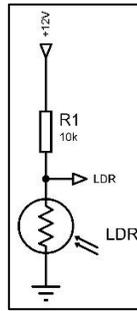


Figura 16: Esquema de ligação do LDR

Sendo assim, uma relação entre resistência e tensão é uma forma interessante de se medir esta variação de iluminância. Utilizando-se do resultado obtido pelo físico alemão Georg Simon Ohm, em 1826, que após vários experimentos que relacionavam tensão corrente e resistência elétrica em resistores formulou o que ficou conhecido como a Primeira Lei de Ohm: “A corrente que flui por um resistor é proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional ao valor de sua resistência” (AFONSO e FILONIO, 2011), pela equação 9 tem-se que:

$$V = R \times I \quad (9)$$

Onde V é a tensão em volts, R é a resistência elétrica em Ohms e I é a corrente elétrica em Amperes.

Logo, algebricamente, obtém-se que a tensão sob o LDR pode ser dada pela equação 10.

$$V_{ldr} = \frac{R_{ldr}}{R_{ldr} + R} \times V \quad (10)$$

Onde V_{ldr} é a tensão sob o LDR, R_{ldr} é a resistência do LDR que varia conforme a iluminância, V é a tensão sob o divisor de tensão que é $12V_{cc}$, e R é o valor de resistência fixa, que no caso do projeto foi escolhida como $10K\Omega$.

Assim, na situação de ausência de iluminância sobre o LDR, tem-se uma tensão de $6V_{cc}$ sobre o LDR e $6V_{cc}$ sobre o resistor de valor fixo. Na situação oposta, com o índice de iluminância na região de saturação do LDR, tem-se um valor ínfimo de resistividade no LDR e conseqüentemente um valor de tensão próximo a $0V$.

5.2.1 Interferências

As situações descritas no tópico anterior consideram uma situação ideal, na qual os princípios físicos teóricos representam fielmente a realidade, o que não é verdade. “As condições ambientais

em que as medições são efetuadas podem afetar o resultado da medição” (RIBEIRO, 2002). Alterações de temperatura, por exemplo, podem mudar fisicamente as características de um transdutor. No caso do LDR a temperatura pode variar o valor da resistência através da dilatação do material, ocasionando erros. Segundo o datasheet do componente, o LDR pode trabalhar em faixas de temperatura entre -63°C e 70°C , entretanto para cada faixa de temperatura de trabalho é recomendado fazer uma nova calibração ou compensação automática de temperatura caso se queira uma precisão elevada. No caso do projeto realizado, considerou-se a calibração válida para operação entre 25 a 30°C com certo nível de precisão.

Quando se trata de medição de iluminância existe um grande problema com interferências de fontes luminosas, fora do interesse de medição, o que pode ocasionar valores equivocados no processo de obtenção das medidas. Os circuitos eletrônicos também podem causar interferências como, por exemplo, queda de tensão em resistências de contato em placas de circuito impresso. Outro tipo de interferência comum é a eletromagnética que “é uma das principais causas de problemas relacionados ao desempenho e confiabilidade, comuns a todas as tecnologias eletrônicas.” (CALOY, 2012).

No processo de conversão de um sinal analógico para digital também há erros. Estes erros se encontram no processo de amostragem que pode ser definido como “o processo de medir valores instantâneos de um sinal analógico em intervalos regulares” (CHA 98). O intervalo entre as amostras é determinado por um pulso de *clock*, e a frequência deste *clock* é chamada Taxa de Amostragem. Interferências também são encontradas no processo de quantização, que é definido como “o processo de conversão das amostras contínuas em valores discretos” (UFRGS, 2002).

Na figura 17 tem-se a representação de um sinal analógico, o sinal sendo amostrado e o sinal quantizado, respectivamente.

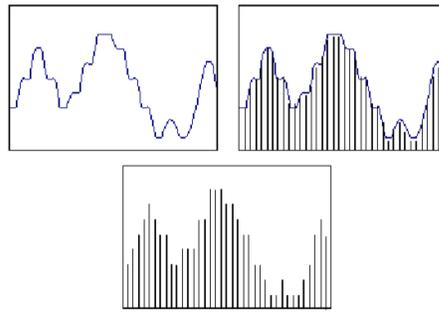


Figura 17: Sinal analógico sendo amostrado e quantizado

As interferências das quais o sistema de medição desenvolvido está sujeito encontram-se representadas esquematicamente na figura 18.

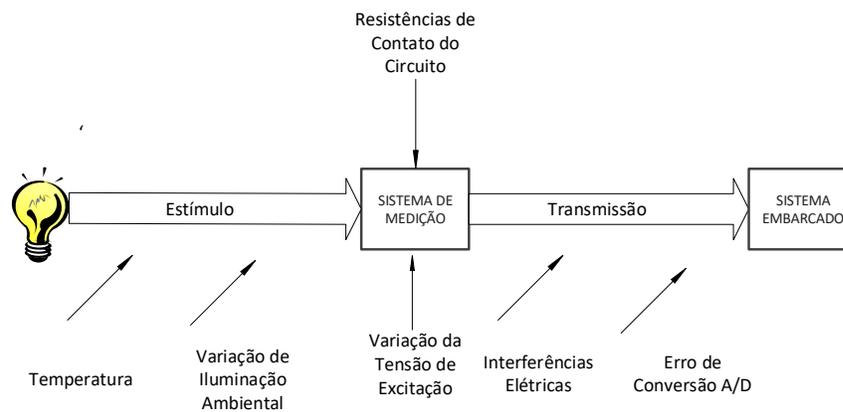


Figura 18: Interferências sujeitas sistema de medição desenvolvido

5.3 Ambiente de calibração

Pode se definir a calibração como,

A operação que estabelece, sob condições específicas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação. (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008).

É imprescindível que o ambiente no qual irá se realizar o procedimento de calibração seja, o máximo possível, livre de interferências. Sendo assim foi desenvolvido um ambiente de calibração que pudesse minimizar esses efeitos.

Na calibração de um equipamento de medição de iluminância o controle do ambiente de calibração é essencial, pois a variável física a ser mensurada se encontra no ambiente comum e essa, de certo modo, varia de forma desconhecida. Para que se pudesse realizar a atividade de calibração, desenvolveu-se um ambiente totalmente fechado em formato retangular de dimensões 41,00cm x 24,50cm x 30,50cm. Na figura 19 tem-se o ambiente desenvolvido.



Figura 19: Ambiente de calibração desenvolvido

Tal ambiente possui isolamento contra iluminância externa. A isolação permite manter a influência das variáveis externas estáveis de forma a garantir uma minimização das interferências.

Para a variação da iluminância, utilizou-se uma Fita de LED branca, acionada através de um controlador. O controlador varia a iluminância da Fita através de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulso). Este método permitiu variar a iluminância de 0 a 100%, ou seja, permitiu variar a tensão sob a fita de LED entre 0 a 12Vcc.

As paredes, da parte interna, do ambiente foram revestidas uniformemente com papel branco pois, “um corpo branco reflete grande parte da radiação recebida. Devido ao seu elevado poder refletor, a temperatura aumenta de uma forma muito vagarosa, não sofrendo grandes oscilações num espaço de tempo considerável, sob a influência de uma radiação incidente moderada. ” (FILHO, 2011) assim, garante-se a mínima absorção da iluminância pelo ambiente e evita-se a elevação da temperatura interna durante a calibração.

5.4 Instrumentação

Pode se definir a instrumentação como “[...] a ciência que aplica e desenvolve técnicas para adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas em equipamentos nos processos industriais. ” (BRANDÃO, 2016, P.01).

No presente trabalho, desenvolveu-se um instrumento de medição de iluminância.

5.4.1 Circuito eletrônico do LDR

Para a utilização do sensor LDR foi necessário a utilização de um circuito divisor de tensão para o sinal de entrada no sistema embarcado. Outro ponto a se destacar é o fato de que o LDR é um sensor passivo, ou seja, necessita de uma polarização elétrica externa para poder medir uma grandeza elétrica passiva. Na figura 13 tem-se o circuito do LDR.

O valor da alimentação, para o circuito do divisor de tensão, foi escolhido como 12Vcc. A escolha deste valor se deve ao fato de que é o mais próximo encontrado comercialmente para reguladores de tensão. O ideal seria a escolha de uma tensão de alimentação de 10Vcc pois como o LDR, em sua situação de máxima resistência, possui o valor de $10K\Omega$ e o resistor fixo possui um valor de $10K\Omega$, o valor máximo de tensão possível sob LDR seria então 5Vcc. No caso, utilizando uma alimentação de 12Vcc, o valor máximo sobre o LDR será é 6Vcc.

Como dito anteriormente, não é possível realizar leituras de tensões acima de 5Vcc nas entradas analógicas do Arduino UNO. Sendo assim, limitou-se através do *firmware*, no Arduino, o valor de tensão no conversor A/D a um valor menor que 5Vcc.

Nota se que apesar de ocorrer a aplicação de uma tensão de 6Vcc sob a entrada do Arduino isso não apresentou demais problemas visto que Arduino possui tolerância a esse nível de tensão. A limitação ficaria na conversão A/D que só é possível até 5Vcc, porém, como dito acima, essa condição foi atenuada através do *firmware*.

5.4.2 Circuito do sistema de variação de iluminância

Para a realização do processo de calibração foi necessário a construção e um ambiente isolado de interferências luminosas e com algum controle artificial para a iluminância. A solução encontrada como já dito anteriormente foi a utilização de Fitas de LED.

A fita de LED nada mais é que um conjunto de LEDs ligados em paralelo. Optou-se por sua utilização devido ao fato de ser uma fonte luminosa que não varia em uma dada frequência, pois utiliza-se de tensão contínua em sua alimentação, o que evita oscilações que poderiam acarretar em erros de medição pelo sistema e também pelo fato de que a dissipação de calor por esse dispositivo

é mínima. Outros tipos de fontes luminosas, como as alimentadas por corrente alternada, poderiam interferir no processo de calibração.

Durante a realização da calibração foi necessário definir diferentes níveis, em porcentagem, de iluminância e mantê-la constante durante um período de tempo. Para que se pudesse controlar o nível de iluminância emanada pelos LEDs, utilizou-se de um circuito no qual se pudesse controlar a tensão média sobre os LEDs, variando assim a sua iluminância. O método escolhido foi a utilização de PWM. O PWM pode ser conceituado como um sinal no qual, quando se varia a sua frequência ocorre a variação do chamado ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) da onda, isso possibilita variar o valor médio de tensão e a potência entregue à carga. O valor do ciclo de trabalho é dado matematicamente pela equação 11.

$$DutyCycle = \frac{T_{on}}{T_{pwm}} \times 100\% \quad (11)$$

Onde T_{on} é o tempo no qual a onda está em nível alto e T_{pwm} é o período do sinal de PWM.

A tensão média entregue à carga pode ser dada matematicamente pela equação 12.

$$V_{med} = V_{dd} \times \frac{T_{on}}{T_{pwm}} \quad (12)$$

Onde V_{med} é o valor da tensão média entregue à carga e V_{dd} é a tensão de pico da onda quadrada.

A figura 20 ilustra diferentes sinais de PWM gerados por uma saída de um Arduino.

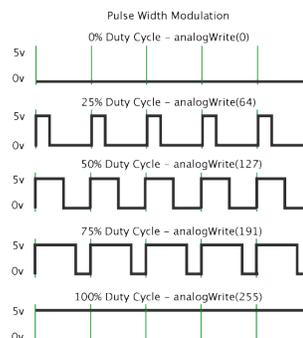


Figura 20: Exemplo de sinais PWM com diferentes *Duty Cycle*

A tensão média do sinal é diretamente proporcional ao *Duty Cycle*.

Para que se pudesse gerar o PWM, utilizou-se de um circuito integrado comumente utilizado para controle de velocidade de motores CC, de baixa potência, conhecido como Ponte H. Esse circuito também pode ser utilizado para controle e outros tipos de cargas como LEDs. O circuito integrado escolhido foi o L293D, que permite desacoplar a alimentação do circuito integrado da alimentação da carga. Utilizou-se uma alimentação de 5Vcc para o circuito integrado e uma de 12Vcc para a Fita de LED, visto que esta é a sua tensão de alimentação nominal. A figura 4 ilustra o circuito desenvolvido.

5.5 Processo calibração

O processo de calibração do sistema de medição desenvolvido foi realizado nas seguintes etapas:

1. Ligou-se um voltímetro, em paralelo, à saída do circuito do LDR, conforme a figura 21.



Figura 21: Medição da tensão sob o LDR

2. Variou-se a iluminância do ambiente em diferentes níveis, conforme é perceptível na figura 22.

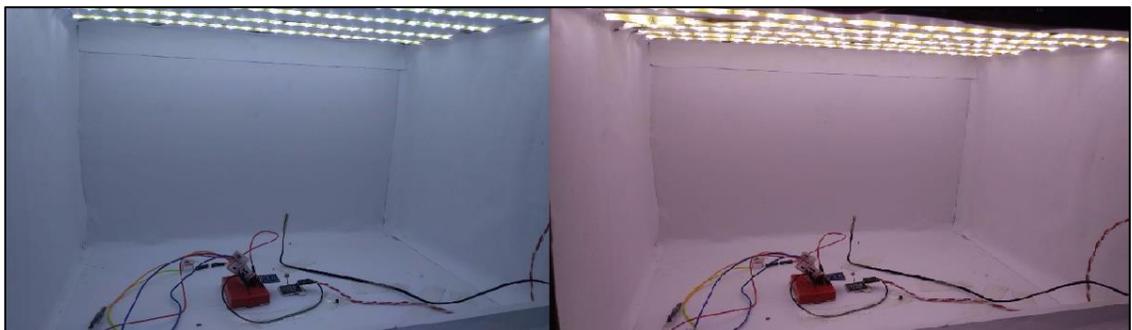


Figura 22: Ambiente com 20% e 100% de iluminância, respectivamente

3. Registrou-se os valores medidos pelo multímetro e pelo equipamento de referência, que no caso era o sensor de medição de iluminância, BH1750. Os dados foram obtidos à temperatura de 27,5 °C. Na tabela 4 tem-se os valores obtidos.

4. Plotou-se o gráfico relacionando iluminância com tensão. Na figura 23 tem-se o gráfico obtido.

Tabela 4: Medições obtidas na calibração

TENSÃO (V)	ILUMINÂNCIA (LUX)	TENSÃO (V)	ILUMINÂNCIA (LUX)
4,17	100	0,91	1004
3,10	178	0,88	1030
2,63	244	0,85	1057
2,64	244	0,78	1110
2,43	278	0,76	1160
2,26	316	0,72	1176
2,03	373	0,67	1240
1,92	414	0,64	1271
1,82	445	0,62	1300
1,72	484	0,60	1320
1,67	514	0,59	1341
1,59	542	0,56	1370
1,52	575	0,54	1400
1,46	613	0,51	1440
1,38	651	0,49	1465
1,33	682	0,46	1498
1,27	725	0,45	1530
1,21	755	0,43	1545
1,14	804	0,41	1574
1,09	843	0,39	1603
1,05	875	0,37	1638
1,01	906	0,35	1659
0,96	950		

5. Obteve-se, a partir do gráfico, a equação 12, que descreve a relação entre iluminância e tensão.

$$I = -54,58V^3 + 523,83V^2 - 1740,10V + 2196,00 \quad (13)$$

Onde I é a iluminância medida pelo LDR e V é a tensão sob os terminais do LDR.

6. Programou-se um algoritmo lógico para a leitura do sensor LDR de forma que fosse possível exibir, através do computador, o valor mensurado pelo sensor, utilizando a equação 13.
7. Após os procedimentos acima iniciou-se a etapa de determinação e correção do erro sistemático.

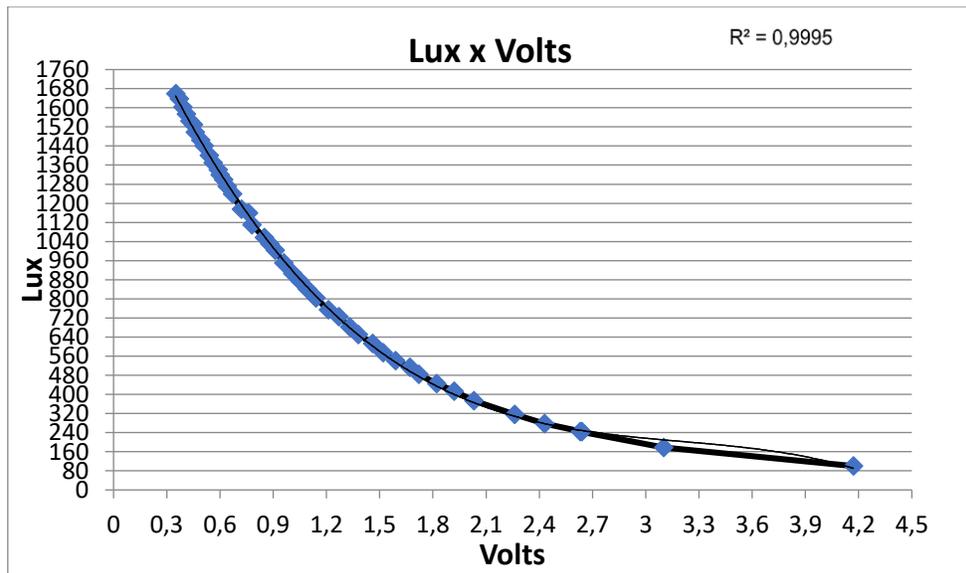


Figura 23: Gráfico obtido com a calibração

5.6 Firmwares

A programação dos *firmwares* foi feita na linguagem de programação C. A linguagem C é a comumente utilizada para a programação de Arduino e possui uma ampla comunidade de desenvolvedores e suporte.

5.6.1 Firmware do sistema de medição

Para que fosse possível tratar e exibir os valores coletados pelo sensor, foi utilizado o Arduino UNO. Este sistema embarcado permitiu, através de uma programação estruturada, obter as leituras do LDR e realizar os cálculos para resultado de medição final. Na figura 24 tem-se um fluxograma lógico do *firmware* implementado.

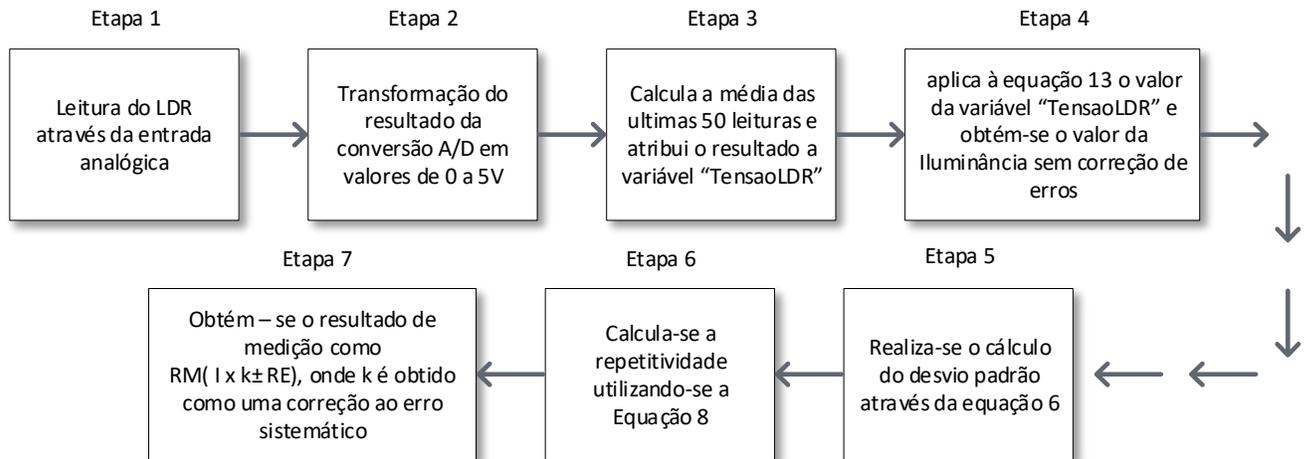


Figura 24 Fluxograma do firmware do sistema de medição

Etapa 1: Nessa etapa temos a conversão analógica digital do LDR. O Arduino UNO possui um conversor analógico de 10 bits, sendo assim retornará, após a conversão A/D, um valor entre 0 a 1023.

Etapa 2: Nessa etapa transforma-se o valor de retorno do conversor A/D em um valor de tensão entre 0 a 5Vcc. Para tal utiliza-se a equação 14.

$$T = D \times \frac{5}{1023} \quad (14)$$

Onde, T é tensão obtida através da leitura do sensor, D é o resultado da conversão analógico para digital.

Etapa 3: Calcula-se a média dos 50 últimos valores obtidos na equação 14.

Etapa 4: Aplica-se o valor obtido na etapa 3 à equação 13 para obter o valor da iluminância, porém sem correção do erro sistemático.

Etapa 5: Nessa etapa é calculado o desvio padrão para 51 amostras e a repetitividade.

Etapa 6: Calcula-se a repetitividade através da equação 8.

Etapa 7: Obteve-se o resultado de medição como dado pela equação 15.

$$RM = (I \times k \pm RE) \quad (15)$$

Onde RM é o resultado de medição com a correção ao erro sistemático, I é obtido pela equação 13 na etapa 4 e RE é a repetitividade calculada pela equação 8 na etapa 6.

k é uma constante obtida experimentalmente para a correção do erro sistemático e foi obtida através de uma função de programação desenvolvida para esse fim. Essa função foi executada uma única vez para a obtenção do melhor valor para k . Na figura 25 tem-se o fluxograma lógico dessa função.

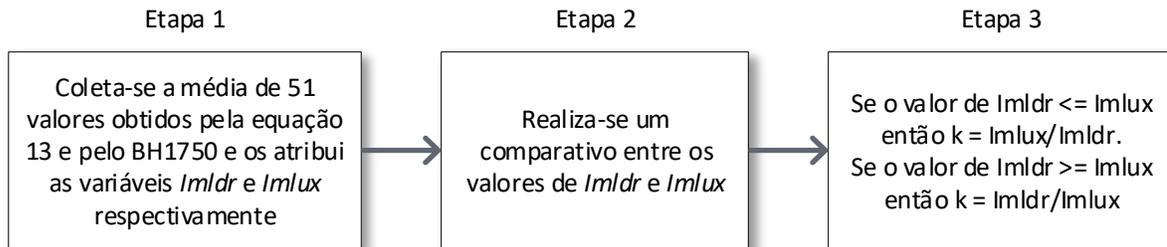


Figura 25 Fluxograma da lógica da obtenção da constante k para correção do erro sistemático

Obteve-se assim $k = 1,01$ ou seja a tendência de correção é positiva. A tendência foi estimada pois a utilização da equação 3 se tornou inviável devido ao fato de que o valor verdadeiro convencional (VVC) não foi possível de se determinar.

O código completo do *firmware* do sistema de medição de iluminância se encontra no Apêndice A

5.6.2 Firmware do sistema de variação de iluminância

Foi desenvolvido um *firmware* para o Arduino do sistema de variação de iluminância que possibilitasse a comunicação com o sistema de supervisão desenvolvido e pudesse atuar gerando em sua saída um sinal PWM. Na figura 26 tem-se um fluxograma lógico do *firmware* implementado

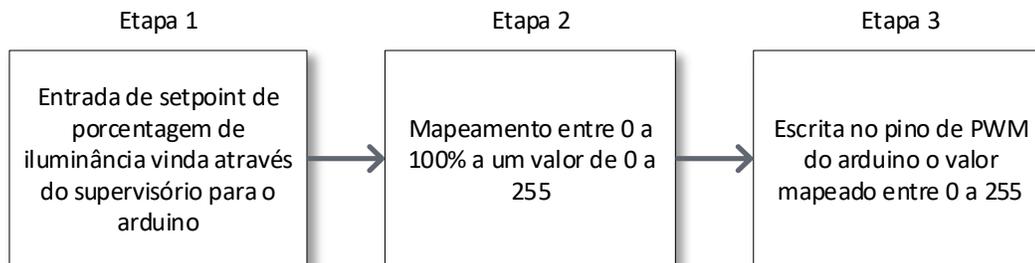


Figura 26: Fluxograma do firmware do sistema de variação de iluminância

Etapa 1: Nessa etapa a aplicação desenvolvida para computador, envia através da comunicação USB, um caráter que quando recebido pelo Arduino irá equivaler a algum comando. Na lógica implementada esse comando se refere a algum valor de porcentagem.

Etapa 2: Com o valor de porcentagem recebido pelo Arduino, o *firmware* realiza uma regra de três simples entre os valores de 0 a 100% com os valores de 0 a 255. O valor de 255 é a resolução máxima do PWM do Arduino.

Etapa 3: O Arduino escreve no pino de saída do PWM a conversão do valor digital, determinado na etapa 2, em analógico.

O código completo do firmware do sistema de variação de iluminância se encontra no Apêndice B

5.7 Aplicações gráficas desenvolvidas

Foi desenvolvido dois sistemas, um de supervisão e um para a variação de iluminância. O sistema de supervisão tem por finalidade receber e exibir os valores medidos pelo LDR e BH1750. Já o segundo sistema é responsável por enviar comandos para o Arduino do sistema de variação de iluminância com a finalidade de varia-la.

Ambas as aplicações foram desenvolvidas na linguagem C# através da ferramenta Visual Studio.

5.7.1 Aplicação de supervisão

Na tela do aplicativo de supervisão tem-se quatro botões, uma caixa de seleção e uma caixa de texto. Para iniciar a comunicação com o Arduino deve-se primeiro plugá-lo na porta usb e em seguida selecionar a porta de comunicação serial COM referente a esse Arduino. Após a seleção da porta deve-se clicar no botão conectar para estabelecer a conexão. Para a obtenção somente da leitura do LDR, deve-se clicar no botão “LDR”. Para a obtenção somente da leitura do BH1750 deve-se clicar no botão “BH1750” e para obtenção de ambas deve-se clicar no botão “LDR E BH1750.” Nota-se que o BH1750 foi mantido acoplado no circuito e exibido no supervisório para efeitos de comparação das medidas entre os sensores. Na figura 27 tem-se a aplicação desenvolvida. Tem-se ao lado esquerdo as medições obtidas através do LDR e à direita os valores obtidos pelo BH1750.



Figura 27 Aplicação de supervisão das medidas dos sensores

O código de programação da aplicação de supervisão se encontra no Apêndice C.

5.7.2 Aplicação de variação de iluminância

Esse sistema é responsável por receber do usuário a porcentagem de iluminância desejada dentro do ambiente de calibração. Nessa aplicação tem-se o botão conectar e uma caixa de seleção e ambos têm a mesma funcionalidade que na aplicação de supervisão. Os demais botões são utilizados para definir a porcentagem de iluminância que pode ser variada de 10 em 10 por cento através dos botões predefinidos ou variada de 1 em 1 por cento através dos botões de incremento e decremento. O valor da porcentagem de iluminância momentânea é exibido através da caixa de texto. Na figura 28 tem-se a aplicação de variação de iluminância desenvolvida.

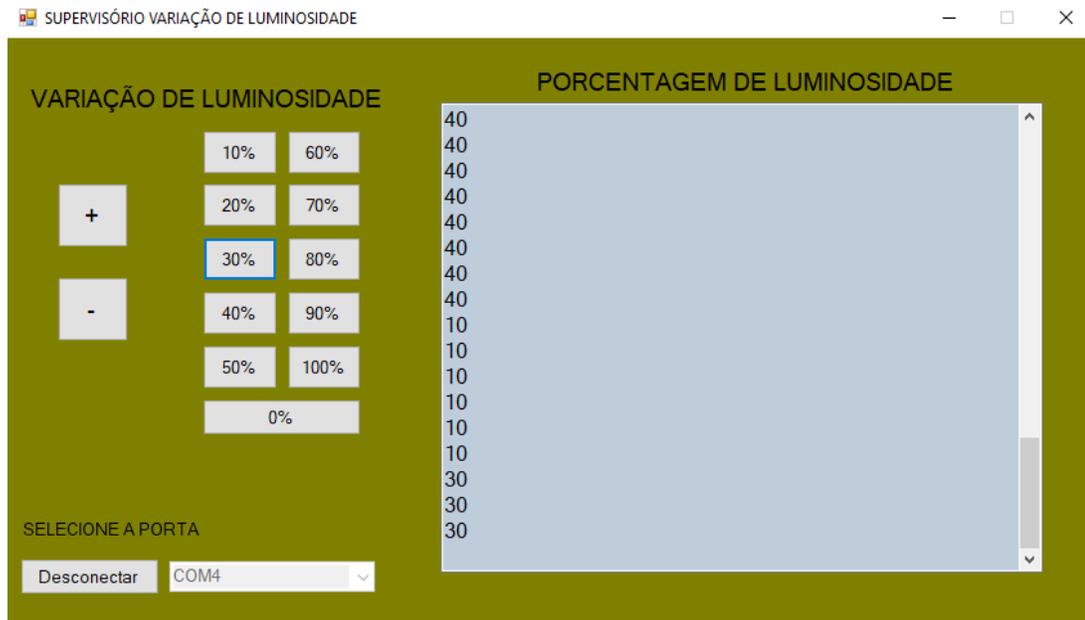


Figura 28 Aplicação de variação de iluminância

O código de programação da aplicação de variação de iluminância se encontra no Apêndice D.

5.8 Resultados obtidos

Para a obtenção dos resultados descritos a seguir, as etapas citadas no capítulo 5 foram realizadas em conjunto com os conceitos teóricos abordados nos capítulos 2 e 3.

5.8.1 Calibração

Após a calibração obteve-se a equação 13, que relaciona o valor de tensão com o valor de iluminância, por meio do Excel. A equação que melhor traduziu o comportamento da curva foi uma polinomial de 3º grau, com um coeficiente de determinação (R) igual a 0,9995. Vale ressaltar que quanto mais próximo de 1 for este valor, melhor o modelo matemático representa a curva como pode ser observado na figura 23.

5.8.2 Correção de erro sistemático

A correção do erro sistemático envolveu a determinação de média, desvio-padrão, coeficiente *t* de Student, repetitividade, tendência e correção. Visando aplicar os conceitos teóricos da Metrologia e Instrumentação e que dizem que para uma amostra maior que 50 o coeficiente *t* de Student pode ser considerado 2, todos os cálculos para correção de erros foram feitos com 53 valores de amostras.

Para a determinação da correção do erro sistemático, foi proposto uma alternativa para o cálculo da tendência de correção, visto que essa não pode ser calculada matematicamente pela equação 3 devido a impossibilidade de se determinar o valor verdadeiro convencional (VCC). Como o intuito do projeto era desenvolver um sistema de medição independente, obter-se o VCC do sensor-padrão não seria o ideal. Sendo assim foi utilizado um método empírico para a determinação de uma constante k que, quando multiplicada pelo valor médio das indicações, retorna o valor já compensado em termos da diferença para o valor verdadeiro.

Como explicado na etapa 7 da seção 5.6.1, a determinação de k foi realizada experimentalmente. Estipulou-se que, caso o valor do sensor LDR tendesse a ser menor que o valor do BH1750 k deveria compensar este valor para mais, e por isso k seria determinado pela equação 16.

$$k = \frac{I_{mlux}}{I_{mldr}} \quad (16)$$

Onde I_{mlux} é a iluminância mensurada pelo BH1750 e I_{mldr} a do LDR.

Caso o valor do sensor LDR tendesse a ser maior que o valor do BH1750 k deveria compensar este valor para menos e por isso k seria determinado pela equação 17

$$k = \frac{I_{mldr}}{I_{mlux}} \quad (17)$$

Onde I_{mlux} é a iluminância mensurada pelo BH1750 e I_{mldr} a do LDR.

Pelos experimentos verificou-se, com facilidade, que o valor do LDR indicava sempre menos que o valor do BH1750, devendo, então, ser compensado positivamente. O valor da divisão manteve-se aproximadamente constante, para diversos valores de iluminância, permitindo a determinação de $k = 1.01$.

Com relação à faixa de medição, obteve-se um sistema capaz de medir valores de iluminância entre 0 a 1300 LUX.

5.8.3 Construção física

Como já dito anteriormente, a construção do ambiente de calibração foi necessária. Na figura 29 tem-se o interior desse ambiente.

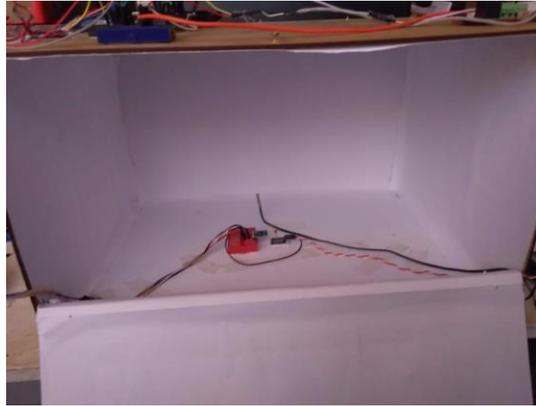


Figura 29 Interior do ambiente de calibração

No interior do ambiente tem-se o sensor BH1750, o LDR com seu devido circuito e um sensor PT100 para a medição da temperatura interna durante a calibração.

Na figura 30 pode se visualizar os sensores.

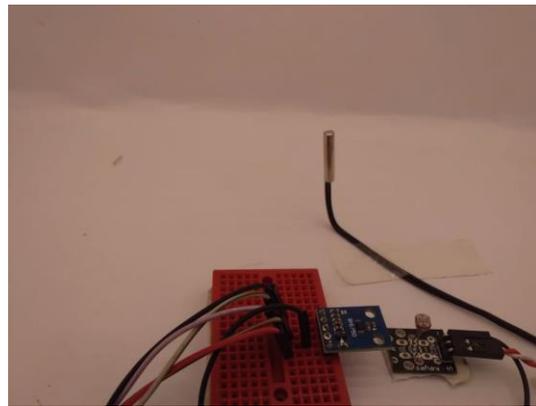


Figura 30 Sensores no interior do ambiente de calibração

O sensor de azul é o BH1750, o sensor na placa preta é o LDR e a sonda é o PT100.

Na figura 31 tem-se a medição da temperatura durante o procedimento de calibração.

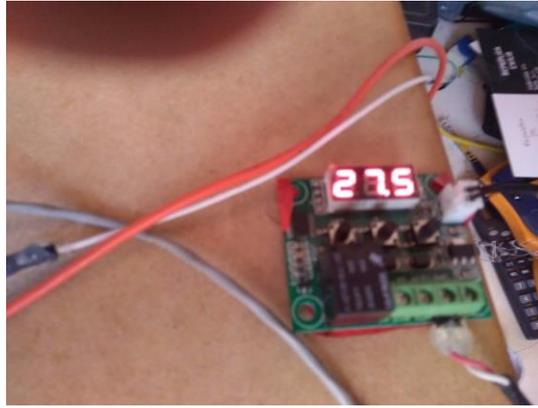


Figura 31 Medição da temperatura durante a calibração

Na figura 32 pode-se visualizar o sistema de iluminação, que é composto por fitas de LED.



Figura 32 Fitas de LED do ambiente de calibração

6 CONCLUSÃO

O sistema de medição de iluminância desenvolvido com o LDR apresentou um comportamento satisfatório, abrangendo uma faixa de medição considerável, entre 0 a 1300 LUX, e registrando valores muito próximos aos obtidos pelo sensor tido como luxímetro padrão. Essa faixa de medição abrange um bom leque de aplicações que vão desde a sua utilização para monitoramento e controle de níveis de iluminância ambiental em aplicações de demótica, bem como para a sua utilização como simples instrumento de medição. A grandeza iluminância apresentou um alto grau de dificuldade para a sua medição devido ao fato de que existem muitas variáveis de interferência durante esse procedimento. Para atenuar esse problema foi desenvolvido um ambiente isolado de interferências para que fosse possível realizar a calibração. Após a calibração foi realizado a etapa de correção do erro sistemático, que possibilitou a obtenção de um resultado de medição dentro do esperado e com um índice de reprodução, em relação ao luxímetro padrão, muito alto. Durante uma análise de medição para dezesseis valores de iluminância, à temperatura igual a de calibração, obteve-se uma discrepância média de 0,5% entre os valores obtidos pelo LDR e pelo luxímetro padrão. Nota-se então, o alto grau de reprodutibilidade dos valores do luxímetro padrão. Vale notar que o trabalho não contemplou a análise, quantitativa, do grau de impacto da influência da temperatura no sistema de medição. Apesar do trabalho não ter contemplado essa análise, houve um estudo qualitativo da existência dessa influência, que se deve às características do elemento sensor LDR. Sendo assim, para uma avaliação mais criteriosa, deve-se utilizar o sistema de medição dentro da faixa estabelecida como de pouca influência da temperatura que é de 25 a 30 °C. Como principal sugestão de trabalho futuro tem-se a implementação de um sistema de compensação automática para atenuar influência da temperatura do ambiente no resultado de medição. Para tal pode-se utilizar um outro elemento sensor, acoplado a unidade de processamento, para mensurar o valor de temperatura ambiente e utilizá-lo para ajustar a curva de calibração. Pode-se concluir, que dentro dos objetivos gerais e específicos, o trabalho entregou o resultado esperado com um custo médio de R\$ 150,00.

REFERÊNCIAS

- NBR5413, **Iluminância de interiores**, ABNT, 1992. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM802/NBR5413.pdf>> Acesso em: 14/08/2018.
- OSRAM (2000). **Manual luminotécnico prático**. Disponível em: <<http://osram.com.br>>, Acesso em 20/12/2018.
- IQA. **Análise de sistemas de medição – MSA, Manual de referência Instituto da Qualidade Automotiva**, 2. ed., São Paulo: IQA., 2004.
- ALBERTAZZI, A. e SOUSA, A. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**, Manole, (2008).
- TECHNOLOGIES, S. (2008). **Light dependent resistor - ldr**. Disponível em: <<http://kennarar.vma.is/thor/v2011/vgr402/ldr.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2018.
- ROHM (2010). **Datasheet BH1750**, In. Disponível em: <<https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet-bh1750fvi.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2018.
- RIBEIRO, M. A. (2002). **Instrumentação, 9a edn, Tek Treinamento & Consultoria Ltda**, Salvador.
- MOTOROLA (1997). **7812: Three terminal positive fixed voltage regulators**. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/4475/MOTOROLA/7812.html>>. Acesso em: 03 mai. 2018.
- LUQUETA, G. R. (n.d.). **Curso básico de eletrônica analógica**, p. 8. Disponível em: <http://gerson.luqueta.com.br/index_arquivos/eletronica.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2018
- TEXTAS INSTRUMENTS (2016), **Datasheet L293D**, In. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>>. Acesso em 01 ago. 2018
- AFONSO, A. P. e FILONIO, E. (2011). **Habilitação técnica em eletrônica, 1: 47**. Disponível em: <<http://ele.ro.g12.br/arquivos/materiais/eletronica1.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2018.
- CALOY, M. H. (2012). **A compatibilidade eletromagnética em equipamentos eletrônicos**.

UFRGS (2002). **Noções básicas sobre áudio**. Disponível em: <[http://penta3.ufrgs.br/RNP/cap3/3.2%20 Audio/](http://penta3.ufrgs.br/RNP/cap3/3.2%20Audio/)>. Acesso em: 04 mai. 2018

FILHO, M. C. M. (2011). **Absorção de luz por corpos escuros**, Congresso Interno de Iniciação Científica p. 8. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xixcongresso/paineis/103467.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2018.

BRANDÃO. (2016). **Definição de instrumentação**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1815226/mod_resource/content/0/SEL0432_2016_Instrumentação.pdf>. Acesso em: 25 set. 2018.

BEGA, E. A. (2003). **Instrumentação Industrial, 3a edn, Interciência**, Rio de Janeiro.

MALVINO, A. P. (1995). **Eletrônica**, 1: 161

NETO, J. M. e CAVALCANTI, T. C. (2009). **Desenvolvimento de uma plataforma de experimentos para auxílio didático da disciplina instrumentação eletrônica do curso de engenharia elétrica**, COBENGE. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/10/artigos/456.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2018.

NUNES, J. V., COSTA, J. V., SENA, L. L. e JUNIOR, H. M. (2017). **Luxímetro**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Disponível em: <<https://goo.gl/DWeRCo>>. Acesso em: 04 mai. 2018.

PEDROSO, L. S., MACÊDO, J. A., ARAÚJO, M. S. e VOELZKE, M. R. (2016). **Construção de um luxímetro de baixo custo**, Revista Brasileira de Ensino de Física 38(2).

SILVEIRA, B. D., MACHADO, D. R., BEZERRA, E. C., OTÁVIO, J. M., FARIAS, J. N., MACHADO, C. P. e BLANDO, E. and OGLIARI, L. N. (2015). **Desenvolvimento de um protótipo de luxímetro utilizando como elemento sensor um resistor dependente de luz (ldr)**, MOSTRA CIENTÍFICA DO CESUCA (9).

WIKI, (2015). **Sinal PWM**. Disponível em: <<https://goo.gl/TP6GEJ>>. Acesso em: 05 nov.2018.

APÊNDICE A

```

#include <BH1750FVI.h> // BIBLIOTECA DO BH1750
#include <Wire.h> // BIBLIOTECA DE COMUNICAÇÃO I2C
uint16_t Light_Intensity=0;
BH1750FVI LightSensor;
// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
float ten_ldr, ten_ldr_ver, int_lum, soma, SomaLux = 0 , Imedia = 0;
float aux1 = 0 , u=0, auxu=0, re=0;
int conv_ad=0 ;
float ResMed = 0, c=0, td=0, SomaLdr = 0, SomaLux = 0;
float Imldr = 0, ImLux = 0, k1=0, k2=0;
char a; // VARIÁVEL QUE RECEBE O CARACTER VINDO DO SUPERVISÓRIO
float k= 1.01; // DEFINE O VALOR PARA A CONSTANTE DE CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // CONFIGURAÇÕES PARA A INICIALIZAÇÃO DO BH1750
  LightSensor.begin();
  LightSensor.SetAddress(Device_Address_H); //Address 0x5C
  LightSensor.SetMode(Continuous_H_resolution_Mode);
  Serial.println("Running...");
}
// FUNÇÃO DE LEITURA DO BH1750
void bh1750 (){
  Light_Intensity = LightSensor.GetLightIntensity(); // OBTÉM O VALOR DA MEDIÇÃO DO BH1750 E ATRIBUI
  À VARIÁVEL
}
// FUNÇÃO QUE RETORNA A LEITURA DO LDR
void ldr (){
for ( int i=0; i<=50 ;i++){ // LAÇO DE REPETIÇÃO PARA CÁLCULO DA MÉDIA DE 50 VALORES
  conv_ad = analogRead(A0); // OBTÉM A LEITURA DO PINO ANALÓGICO LIGADO AO LDR
  ten_ldr = 0.004887586*conv_ad; // TRANSFORMA O VALOR DIGITAL EM UM VALOR DE TENSÃO
  soma = soma + ten_ldr ; // SOMATÓRIO DAS ÚLTIMAS 51 MEDIÇÕES
}
}

```

```

}
if(ten_ldr<=4.8){ // CONDIÇÃO PARA ACEITAR SOMENTE LEITURAS MENORES QUE 4.8V
ten_ldr_ver= soma/51; // OBTÉM A MÉDIA DOS 51 VALORES DA MEDIÇÃO
soma=0; // ZERA A VARIÁVEL AUXILIAR
// APLICAÇÃO DO VALOR DE TENSÃO NA EQUAÇÃO OBTIDA NA CALIBRAÇÃO, RETORNANDO O
VALOR À VARIÁVEL "int_lum"
int_lum = -54.58 * pow(ten_ldr_ver,3) + 523.83 * pow(ten_ldr_ver,2) - 1740.10 * ten_ldr_ver + 2196.00;
}
//CONSIDERA TODOS OS VALORES DE TENSÃO ACIMA DE 4.8V COMO SENDO GRAU DE
ILUMINAÇÃO ZERO
//ESSA É A TRATATIVA PARA IGNORAR AS LEITURAS DE TENSÃO ACIMA DE 5V NA ENTRADA
ANALÓGICA PARA LDR
else{
int_lum = 0; // CASO A TENSÃO SEJA ACIMA DE 4.8V CONSIDERAR A INTENSIDADE LUMINOSA
COMO ZERO
}
}
// FUNÇÃO RESPONSÁVEL POR EXIBIR O RESULTADO FINAL DE MEDIÇÃO
void RM(){
// O LAÇO ABAIXO É UTILIZADO PARA OBTER A MÉDIA DE 53 MEDIÇÕES PARA O CÁLCULO DA
INCERTEZA PADRÃO
for ( int i=0; i<= 52 ; i++){
ldr(); // CHAMADA DA FUNÇÃO DO LDR PARA OBTENÇÃO DA LEITURA MOMENTÂNEA DO LDR
SomaIllum = SomaIllum + int_lum; // SOMA OS 53 ULTIMOS VALORES MEDIDOS PELO LDR
}
Imedia = SomaIllum /53; // CALCULA A MÉDIA DOS 53 VALORES
// CÁLCULO DA INCERTEZA PADRÃO
aux1 = SomaIllum - 53*Imedia;
auxu= aux1/52;
u = pow(auxu,0.5); // INCERTEZA PADRÃO
re = 2* u; CÁLCULO DA REPETITIVIDADE
ResMed = Imedia * k; // APLICACÃO DA CONSTANTE "k" PARA A CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO
SomaIllum=0; // ZERA A VARIÁVEL AUXILIAR

```

```

a=Serial.read();
if (a = 'L'){ // SE O CHARACTER RECEBIDO FOR "L" ESCREVER SÓ A MEDIÇÃO DO LDR
Serial.print("RM: ( ");
Serial.print (ResMed);
Serial.print(" +/- ");
Serial.print(re);
Serial.print(" ) [lux] ");
}
if (a = 'B'){ // SE O CHARACTER RECEBIDO FOR "B" ESCREVER SÓ A MEDIÇÃO DO BH1750
Serial.print("LUXIMETRO: ");
Serial.println( Light_Intensity);
}
if (a = 'A'){ // SE O CHARACTER RECEBIDO FOR "A" ESCREVER A MEDIÇÃO DO BH1750 E LDR
Serial.print("RM: ( ");
Serial.print (ResMed);
Serial.print(" +/- ");
Serial.print(re);
Serial.print(" ) [lux] ");
Serial.print(" ||| ");
bh1750(); // OBTÉM A MEDIÇÃO DO BH1750
Serial.print("LUXIMETRO: ");
Serial.println( Light_Intensity);
}
}
// FUNÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE "k". ESSA FUNÇÃO FOI UTILIZADA UMA UNICA VEZ
void Deter_K(){
// CALCULA A MÉDIA DE 51 VALORES DAS ULTIMAS MEDIÇÕES DO LDR E BH1750
for (int i = 0 ; i<=50 ; i++){
bh1750();
ldr();
SomaLdr = SomaLdr + int_lum;
}
}

```

```

SomaLux = SomaLux + Light_Intensity;
}
Imldr = SomaLdr / 51;
ImLux = SomaLux / 51;
// VERIFICA SE O VALOR OBTIDO PELO LDR É MENOR OU IGUAL AO VALOR OBTIDO PELO BH1750
if (Imldr <= ImLux ){
    k1 = ImLux / Imldr ; // SE A CONDIÇÃO FOR VERDADEIRA "k" É DEFINIDO COMO EQUACIONADO
    Serial.print(" Situação de ldr<lux: "); // CASO A CONDIÇÃO O FOR VERDADEIRA A MENSAGEM É
    IMPRESSA
    Serial.print(k1); // O VALOR OBTIDO PELA CONSTANTE É IMPRESSO
}
// VERIFICA SE O VALOR OBTIDO PELO LDR É MAIOR OU IGUAL AO VALOR OBTIDO PELO BH1750
if (Imldr > ImLux ){
    k2 = Imldr / ImLux ;//SE A CONDICAÇÃO FOR VERDADEIRA "k" É DEFINIDO COMO EQUACIONADO
    Serial.print(" Situação de ldr > lux: ");// CASO A CONDIÇÃO FOR VERDADEIRA A MENSAGEM É
    IMPRESSA
    Serial.print(k2);//O VALOR OBTIDO PELA CONSTANTE É IMPRESSO
}
// IMPRIME AS MEDIÇÕES DO LDR E BH1750
Serial.print (" | media medição ldr: ");
Serial.print(Imldr);
Serial.print (" | media medição do lux: ");
Serial.println(ImLux);
// ZERA AS VARIÁVEIS AUXILIARES
SomaLdr = 0;
SomaLux = 0 ;
}
void loop() {
    RM(); // CHAMADA DA FUNÇÃO O RESPONSÁVEL POR OBTER O RESULTADO DE MEDIÇÃO DO LDR E
    BH1750
    delay(500); // DELAY PARA O ENVIO DAS INFORMAÇÕES NA SERIAL
    //Deter_K(); // FUNÇÃO UTILIZADA UMA ÚNICA VEZ PARA DETERMINAR "k"
}

```

APÊNDICE B

```

// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
int percentual=0;
int pwm=0;
char a;
int pct = 0 ;
// DEFINE O PINO DO PWM COMO PINO 9
int pwmpin = 9;
void setup(){
  pinMode(pwmpin, OUTPUT); // CONFIGURA O PINO "pwmpin" COMO SAÍDA
  Serial.begin(9600);
}
// FUNÇÃO RESPONSÁVEL POR ENVIAR O SINAL PWM NO PINO 9 DO ARDUINO
void pwms(){
  pwm = map(pct , 0, 100,0,255); // MAPEIA O VALOR DE 0 A 100% DA VALOR REBEBIDO DO
SUPERVISÓRIO NA VARIÁVEL "pct" PARA UM VALOR DE PWM ENTRE 0 A 255
  analogWrite(pwmpin,pwm); // ESCRIVE NO PIN 9 O VALOR DE PWM
}
// FUNÇÃO RESPONSÁVEL POR RECEBER OS COMANDOS DO SUPERVISÓRIO
void inc(){
  if(Serial.available()){ // VERIFICA SE A PORTA SERIAL ESTA DISPONÍVEL
    if (Serial.available() && Serial.read()!=' '){ // SE ESTIVER DISPONÍVEL E O VALOR NELA É
DIFERENTE DE NULO
      a=Serial.read(); // ATRIBUI A VARIÁVEL A O VALOR DISPONÍVEL NA SERIAL
    }
}
// PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO PARA OS COMANDOS VINDO DA COMUNICAÇÃO SERIAL
if (a=='+'){ // SE A FOR IGUAL AO CARCTER "+"
  pct=pct+1; // INCREMENTA A VARIÁVEL "pct" DE UMA UNIDADE
}
if (a=='-'){ // DECREMENTA A VARIÁVEL "pct" DE UMA UNIDADE
  pct=pct-1;
}

```

```
if (a=='c'){ // SE O CARACTER RECEBIDO FOR "c" ENTÃO ATRIBUI-SE À VARIÁVEL "pct" O VALOR 0
    pct = 0;
}

if (a=='1'){ // OS DEMAIS COMANDOS "if" FAZEM O MESMO PROCEDIMENTO DO ANTERIOR
DIFERENCIADO NO VALOR DE "pct"
    pct = 10;
}if (a=='2'){
    pct = 20;
}if (a=='3'){
    pct = 30;
}if (a=='4'){
    pct = 40;
}if (a=='5'){
    pct = 50;
}if (a=='6'){
    pct = 60;
}if (a=='7'){
    pct = 70;
}if (a=='8'){
    pct = 80;
}if (a=='9'){
    pct = 90;
}if (a=='h'){
    pct = 100;
}
}

void loop(){
    inc(); // CHAMADA DA FUNÇÃO RESPONSÁVEL POR RECEBER OS COMANDOS DO SUPERVISÓRIO
    Serial.println(pct); // IMPRIME O VALOR DEFINIDO PELO SUPERVISÓRIO NA SERIAL
    pwms(); // ESCREVE NO PINO PWM O VALOR RECEBIDO ATRAVÉS DO SUPERVISÓRIO
}
```

APÊNDICE C

```
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports; // necessário para ter acesso as portas
namespace interfaceArduino
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        string RxString;
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            timerCOM.Enabled = true;
        }
        string aux = "";
        string aux2 = "";
        private void atualizaListaCOMs()
        {
            int i;
            bool quantDiferente; //flag para sinalizar que a quantidade de portas mudou
            i = 0;
            quantDiferente = false;
            //se a quantidade de portas mudou
            if (comboBox1.Items.Count == SerialPort.GetPortNames().Length)
            {
```

```
foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        if (comboBox1.Items[i++].Equals(s) == false)
            {
                quantDiferente = true;
            } }
else
    {
        quantDiferente = true;
    }
//Se não foi detectado diferença
if (quantDiferente == false)
    {
        return;          //retorna
    }
//limpa comboBox
comboBox1.Items.Clear();
//adiciona todas as COM disponíveis na lista
foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        comboBox1.Items.Add(s);
    }
//seleciona a primeira posição da lista
comboBox1.SelectedIndex = 0;
}
private void timerCOM_Tick(object sender, EventArgs e)
    {
        atualizaListaCOMs();
    }
private void btConectar_Click(object sender, EventArgs e)
    {
```

```
if (serialPort1.IsOpen == false)
{
    try
    {
        serialPort1.PortName = comboBox1.Items[comboBox1.SelectedIndex].ToString();
        serialPort1.Open();
    }
    catch
    {
        return;
    }
    if (serialPort1.IsOpen)
    {
        btConectar.Text = "Desconectar";
        comboBox1.Enabled = false;
    }
}
else
{
    try
    {
        serialPort1.Close();
        comboBox1.Enabled = true;
        btConectar.Text = "Conectar";
    }
    catch
    {
        return;
    }
} }
```

```
private void Form1_FormClosed(object sender, FormClosedEventArgs e)
{
    if(serialPort1.IsOpen == true) // se porta aberta
        serialPort1.Close();      //fecha a porta
}

/* private void btEnviar_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if(serialPort1.IsOpen == true)    //porta está aberta
        serialPort1.Write(textBoxEnviar.Text); //envia o texto presente no textbox Enviar
}*/

private void serialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    RxString = serialPort1.ReadExisting();      //le o dado disponível na serial
    this.Invoke(new EventHandler(trataDadoRecebido)); //chama outra thread para escrever o dado no text box
}

private void trataDadoRecebido(object sender, EventArgs e)
{
    textBoxReceber.AppendText(RxString);
}

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux = "L";
        serialPort1.Write(aux);
    }
}
```

```
private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux = "B";
        serialPort1.Write(aux);
    }
}
private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux = "A";
        serialPort1.Write(aux);
    }
}
}
```

APÊNDICE D

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports; // necessário para ter acesso as portas
namespace interfaceArduino
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        string RxString;
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            timerCOM.Enabled = true;
        }
        string aux = "";
        string aux2 = "";
        private void atualizaListaCOMs()
        {
            int i;
            bool quantDiferente; //flag para sinalizar que a quantidade de portas mudou
            i = 0;
            quantDiferente = false;
            //se a quantidade de portas mudou
            if (comboBox1.Items.Count == SerialPort.GetPortNames().Length)
            {
```

```
foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        if (comboBox1.Items[i++].Equals(s) == false)
            {
                quantDiferente = true;
            } } }
else
    {
        quantDiferente = true;
    }
//Se não foi detectado diferença
if (quantDiferente == false)
    {
        return;          //retorna
    }
//limpa comboBox
comboBox1.Items.Clear();
//adiciona todas as COM disponíveis na lista
foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        comboBox1.Items.Add(s);
    }
//seleciona a primeira posição da lista
comboBox1.SelectedIndex = 0;
}
private void timerCOM_Tick(object sender, EventArgs e)
    {
        atualizaListaCOMs();
    }
private void btConectar_Click(object sender, EventArgs e)
    {
```

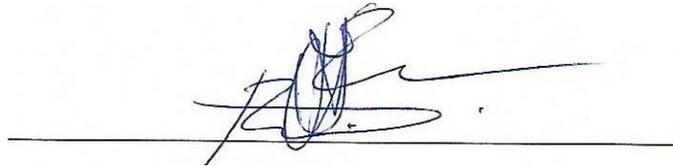
```
if (serialPort1.IsOpen == false)
{
    try
    {
        serialPort1.PortName = comboBox1.Items[comboBox1.SelectedIndex].ToString();
        serialPort1.Open();
    }
    catch
    {
        return;
    }
    if (serialPort1.IsOpen)
    {
        btConectar.Text = "Desconectar";
        comboBox1.Enabled = false;
    }
}
else
{
    try
    {
        serialPort1.Close();
        comboBox1.Enabled = true;
        btConectar.Text = "Conectar";
    }
    catch
    {
        return;
    }
}}
```

```
private void Form1_FormClosed(object sender, FormClosedEventArgs e)
{
    if(serialPort1.IsOpen == true) // se porta aberta
        serialPort1.Close();      //fecha a porta
}
/* private void btEnviar_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if(serialPort1.IsOpen == true)    //porta está aberta
        serialPort1.Write(textBoxEnviar.Text); //envia o texto presente no textbox Enviar
}*/
private void serialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    RxString = serialPort1.ReadExisting();      //le o dado disponível na serial
    this.Invoke(new EventHandler(trataDadoRecebido)); //chama outra thread para escrever o dado no text box
}
private void trataDadoRecebido(object sender, EventArgs e)
{
    textBoxReceber.AppendText(RxString);
}
private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "+";
        serialPort1.Write(aux2);
    }
}
private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
```

```
        aux2 = "-";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button6_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "p";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button7_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "c";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button9_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "1";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button17_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "9";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
```

```
private void button10_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "2";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button11_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "3";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button12_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "4";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
private void button13_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true)
    {
        aux2 = "5";
        serialPort1.Write(aux2);
    } }
```

Certifico que o aluno **Gustavo Henrique Braga Peixoto**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "**Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Iluminância**", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right, positioned above a solid horizontal line.

Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Orientador

Ouro Preto, 13 de junho de 2019