

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Alcindo Gandhi Barreto Almeida

Sistema de Identificação de Lâmpadas de Iluminação Pública

Juiz de Fora

2015

Alcindo Gandhi Barreto Almeida

Sistema de Identificação de Lâmpadas de Iluminação Pública

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração Sistemas Eletrônicos (Eletrônica de Potência), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Antônio Carvalho Braga

Juiz de Fora

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

ALMEIDA, Alcindo G. B.

Sistema de Identificação de Lâmpadas de Iluminação Pública / Alcindo
Gandhi Barreto Almeida. – 2015.

98 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Antônio Carvalho Braga

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade
de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

1. Iluminação pública. 2. Perdas comerciais. 3. Sensores radiométricos.
4. Reconhecimento de padrões. 5. Sistema de aquisição de dados. 6.
Calibração. I. BRAGA, Henrique A. C., orient. II. Título.

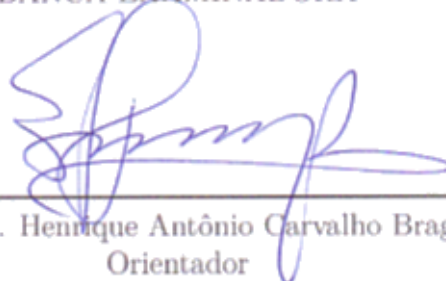
Alcindo Gandhi Barreto Almeida

Sistema de Identificação de Lâmpadas de Iluminação Pública

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração Sistemas Eletrônicos (Eletrônica de Potência), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 24 de abril de 2015.

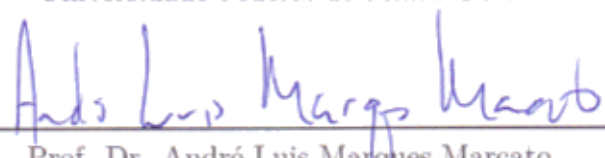
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Henrique Antônio Carvalho Braga
Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Diógenes Cecílio da Silva Jr.
Universidade Federal de Minas Gerais



Prof. Dr. André Luis Marques Marcato
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Estêvão Coelho Teixeira
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao Criador Supremo e aos amigos do plano espiritual, pelo apoio em todos os momentos.

Aos meus queridos pais, Alcindo e Margarida, pelo imenso amor e o incentivo ao longo da vida.

À minha amada Genuse, companheira de todas as horas, pelo carinho e a renúncia em todo esse tempo juntos.

À EDP/Escelsa, pela idealização deste projeto e pelo apoio financeiro.

Às equipes UFES e NIMO/UFJF, cujo resultado do trabalho resultou nesta dissertação.

Ao Departamento de Ciência da Computação da UFJF, além das equipes NRC/iNtegra, pela licença concedida ao final deste trabalho.

E, por fim, dois agradecimentos especiais: ao meu orientador, Prof. Henrique Braga, por toda a compreensão e paciência, além de sua orientação em minha vida acadêmica; e ao meu grande amigo Guilherme, pelo papel fundamental em todas as etapas deste projeto.

À todos os meus sinceros agradecimentos.

“Os três grandes fundamentos para se conseguir qualquer coisa são, primeiro, trabalho árduo; segundo, perseverança; terceiro, senso comum.”

(Thomas A. Edison)

RESUMO

A divergência entre o parque de iluminação pública em funcionamento e o cadastro informado pelos municípios às concessionárias de energia elétrica pode resultar numa das parcelas das chamadas perdas comerciais. O procedimento usual adotado para minimizar esse problema consiste no envio de uma equipe de técnicos a campo para a inspeção dos pontos de iluminação. Este trabalho propõe um sistema de identificação automático de lâmpadas de iluminação pública (IP), que permite às concessionárias de energia elétrica elaborar um mapa dos pontos de iluminação dos municípios, estimando o consumo e evitando perdas comerciais. Inicialmente, o trabalho aborda o cenário da iluminação pública no Brasil, incluindo as principais tecnologias usadas em IP e a transferência dos ativos de IP para os municípios. Em seguida, são descritos os principais conceitos radiométricos que caracterizam o sistema de IP. Posteriormente, é apresentada a placa de aquisição de dados construída. Essa placa contém um conjunto de nove sensores radiométricos, que medem a radiação eletromagnética proveniente das lâmpadas. Também são apresentados os projetos do *firmware* de controle da placa e o *software* de aquisição de dados. É desenvolvida uma metodologia de medição baseada em sensores de posicionamento para garantir a reprodutibilidade das medidas. Além de descrever todos esses itens, este trabalho apresenta uma estrutura de iluminação pública ajustável, que permitiu o estudo comparativo das técnicas empregadas, e uma metodologia de calibração das placas de aquisição de dados. Por fim, tem-se o sistema de classificação de dados radiométricos, que permite inferir qual lâmpada está sendo medida. É feita uma comparação de diversos tipos de classificadores. Os resultados experimentais obtidos demonstram o bom funcionamento do sistema em diversas condições de operação.

Palavras-chave: Iluminação pública. Perdas comerciais. Sensores radiométricos. Reconhecimento de padrões. Sistema de aquisição de dados. Calibração.

ABSTRACT

The misinformation between the actual public lighting equipment and those reported by municipalities to the electricity companies may result in a kind of loss mainly referred as commercial loss. The usual adopted procedure to minimize this problem is sending technician teams to the field to do a low effective inspection of the lighting points. This paper proposes an automatic identification system of street lighting lamps, which allows the electricity companies to draw up a map of the lighting points, estimating the consumption and avoiding commercial losses. Initially, the work addresses the scenario of public lighting in Brazil, including the main technologies used in street lighting and the transfer of the assets to municipalities. Then, the main radiometric concepts which characterize the street lighting systems are described. After data acquisition board built is presented. This board contains a set of 9 radiometric sensors which measure the electromagnetic radiation from the lamps. The projects of the firmware and the data acquisition software are also presented. A measurement methodology based on positioning sensors to ensure the reproducibility of the measurements is developed. In addition to describing all of these items, this paper presents an adjustable street lighting structure, which allowed the comparative study of the techniques employed, and a calibration method of data acquisition boards. Finally, the radiometric data classification system is shown, which allows us to infer which lamp is being measured. A comparison of various types of classifiers is made. The experimental results demonstrate the proper functioning of the system in various operating conditions.

Keywords: Public Lighting. Commercial Losses; Light Sensors; Pattern Recognition; Data Acquisition System; Calibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Propagação de uma onda eletromagnética [7]	19
Figura 2 – Espectro eletromagnético [8]	20
Figura 3 – Ondas correspondentes às variadas cores: vermelho para o maior e violeta para o menor comprimento de onda [10]	20
Figura 4 – Curvas de resposta do olho humano de um observador padrão [11]	22
Figura 5 – Ângulo sólido [15]	22
Figura 6 – Curva de intensidade luminosa vertical [16]	23
Figura 7 – Curva de intensidade luminosa horizontal [16]	23
Figura 8 – Eficácia Luminosa	24
Figura 9 – Exemplo de diagrama isolux da uma luminária de IP [19]	25
Figura 10 – Fonte luminosa puntiforme iluminando uma área elementar no plano P	25
Figura 11 – Componentes de um circuito de IP [20]	27
Figura 12 – Evolução das tecnologias de iluminação no parque nacional de IP [22]	29
Figura 13 – Exemplo de circuito de lâmpada de descarga de alta pressão (vapor de sódio) [25]	30
Figura 14 – Diagrama de uma lâmpada HPS tubular [27]	31
Figura 15 – Espectro de uma lâmpada HPS [28]	32
Figura 16 – Rua iluminada com lâmpadas HPS	32
Figura 17 – Diagrama de uma lâmpada HPMV [27]	33
Figura 18 – Espectro de uma lâmpada HPMV [29]	34
Figura 19 – Rua iluminada com lâmpadas HPMV	34
Figura 20 – Diagrama de uma lâmpada HPMH [27]	35
Figura 21 – Espectro de uma lâmpada HPMH [30]	35
Figura 22 – Rua iluminada com lâmpadas HPMH	36
Figura 23 – Cenário de aquisição de dados típico incluindo o case do dispositivo de medição, o veículo de transporte e o poste de IP	38
Figura 24 – Arquitetura do equipamento de medição	38
Figura 25 – Protótipo da placa de aquisição de dados	39
Figura 26 – Placa de aquisição de dados industrializada (fundo e topo)	40
Figura 27 – Visão geral do gabinete de aquisição de dados radiométricos	40
Figura 28 – Detalhamento do gabinete: (a) espaço para acomodação da placa; (b) espaço para acomodação da câmera	40
Figura 29 – Comparação das curvas espectrais das lâmpadas de sódio, mercúrio e multivapores metálicos [28] [29] [30]	42
Figura 30 – Comparação das curvas de resposta de um sensor radiométrico hipotético para as lâmpadas de sódio, mercúrio e multivapores metálicos. A resposta final do sensor é proporcional à área sob a curva de sensibilidade espectral (azul)	43

Figura 31 – Circuito de condicionamento para o sensor BP104FAS	44
Figura 32 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor BP104FAS	44
Figura 33 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH2430	45
Figura 34 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH2430	45
Figura 35 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH3400	46
Figura 36 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH3400	46
Figura 37 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH3410	47
Figura 38 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH3410	47
Figura 39 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH5711	48
Figura 40 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH5711	48
Figura 41 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TSL13S	49
Figura 42 – Circuito de condicionamento para o sensor TSL13S	49
Figura 43 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TSL261R	50
Figura 44 – Circuito de condicionamento para o sensor TSL261R	50
Figura 45 – Diagrama de funcionamento do sensor TSL2569T	51
Figura 46 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TSL2569T	51
Figura 47 – Diagrama de funcionamento do sensor TCS3414	52
Figura 48 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TCS3414	52
Figura 49 – Resumo do procedimento de cálculo da temperatura de cor correlata (CCT) [41]	53
Figura 50 – Diferença entre as curvas de resposta espectral do sensor TCS 3414 e as curvas relativas ao espaço de cores XYZ [41]	53
Figura 51 – Representação simplificada do processo de detecção da região isolux	55
Figura 52 – Diagrama de blocos do sensor ADXL345 [42]	56
Figura 53 – Diagrama de conexão recomendado – comunicação I ² C [43]	56
Figura 54 – Resposta do sensor em relação à orientação da gravidade [42]	57
Figura 55 – Camadas lógicas do projeto do firmware	58
Figura 56 – Fluxograma de funcionamento do firmware	59
Figura 57 – Diagrama de classes simplificado do software de aquisição de dados	60
Figura 58 – Tela do programa de aquisição de dados	61
Figura 59 – Fluxograma de funcionamento do software de aquisição	62
Figura 60 – Esquema da estrutura IP construída	63
Figura 61 – Fluxograma de funcionamento do software de aquisição	63
Figura 62 – Fluxograma de funcionamento do software de aquisição	64
Figura 63 – Calibração direta de um sistema de medição	67
Figura 64 – Exemplo de calibração direta de uma balança usando massas-padrão	67
Figura 65 – Calibração indireta de um sistema de medição	68
Figura 66 – Exemplo de calibração indireta de um velocímetro de um automóvel	68
Figura 67 – Iluminador de referência	70

Figura 68 – Fluxograma do <i>firmware</i> do iluminador de referência	72
Figura 69 – <i>Software</i> de supervisão do sistema de calibração - modo manual	72
Figura 70 – <i>Software</i> de supervisão do sistema de calibração - modo automático . .	73
Figura 71 – <i>Software</i> de supervisão do sistema de calibração - modo de monitoramento	73
Figura 72 – Fixação da placa de medição	74
Figura 73 – Leitura do sensor SFH 3410 para 20 configurações, considerando 57 leituras em momentos diferentes para as mesmas configurações	75
Figura 74 – Ajuste para o sensor SFH3410	76
Figura 75 – Validação campo para sensor TSL261R	77
Figura 76 – Gabinete utilizado para medição simultânea das placas	78
Figura 77 – Variação do erro médio do sensor com o número de postos por amostra, para 10.000 amostras	79
Figura 78 – Variação dos parâmetros de ajuste para o sensor TCS3414B para 10 conjuntos de 10.000 amostras distintas cada, totalizando 100.000 amostras.	79
Figura 79 – Ajuste do sensor TSL261R com os dados de campo	80
Figura 80 – Exemplo de classificação pelo método do vizinho mais próximo	83
Figura 81 – Arquitetura de uma rede neural MLP com duas camadas escondidas . .	84
Figura 82 – Sistema de classificação direta	85
Figura 83 – Sistema de classificação em cascata	85
Figura 84 – Resultados médios de classificação, com e sem as medidas de altura da luminária	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficácia luminosa típica de algumas fontes de luz [18]	24
Tabela 2 – Erro máximo e médio para cada sensor radiométrico após o ajuste de calibração	80
Tabela 3 – Descrição dos valores das instâncias de medidas usadas na avaliação . .	87
Tabela 4 – Resultados do classificador de tipo de lâmpada	87
Tabela 5 – Resultados do classificador de potência - HPS	88
Tabela 6 – Resultados do classificador de potência - HPMV	88
Tabela 7 – Resultados do classificador de potência - HPMH	89
Tabela 8 – Resultados do classificador único sem informação de altura	89
Tabela 9 – Resultados do classificador único com informação de altura	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIS	Ativo Imobilizado em Serviço
ANEEL	Agência Nacional Energia Elétrica
CCT	Correlated Color Temperature (Temperatura de Cor Correlata)
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Comissão Internacional de Iluminação)
CSV	Comma-separated Values (Valores Separados por Vírgula)
DSP	Digital Signal Processor (Processador Digital de Sinais)
GPS	Global Position System (Sistema de Posicionamento Global)
HID	High Intense Discharge (Descarga em Alta Pressão)
HPMH	High Pressure Metal Halide (Vapor de Metálico de Alta Pressão)
HPMV	High Pressure Mercury Vapor (Vapor de Mercúrio de Alta Pressão)
HPS	High Pressure Sodium (Vapor de Sódio de Alta Pressão)
IBL	Instance-Based Learning (Aprendizado baseado em instâncias)
IP	Iluminação Pública
IRC	Índice de Reprodutibilidade de Cor
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
k-NN	k-Nearest Neighbors (k-ésimo Vizinho Mais Próximo)
LED	Light Emissor Diode (Diodos Emissores de Luz)
LOO	Leave-one-out (deixar um fora - tipo de algoritmo de validação cruzada)
MLP	Multilayer Perceptron (Perceptron de Múltiplas Camadas)
MME	Ministério de Minas e Energia
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
NIMO	Núcleo de Iluminação Moderna
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento

PNEF	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROCEL RELUZ	Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RNA	Rede Neural Artificial
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMC	Sistema de Medição a Calibrar
SMP	Sistema de Medição Padrão
TCC	Temperatura de cor correlata
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
VVC	Valor Verdadeiro Convencional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização e Justificativa do Trabalho	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	ILUMINAÇÃO PÚBLICA	19
2.1	Conceitos e Grandezas de Iluminação	19
2.1.1	Radiação Eletromagnética	19
2.1.2	Luz	19
2.1.3	Radiometria e Fotometria	20
2.1.4	Potência Radiante	21
2.1.5	Intensidade Radiante	21
2.1.6	Eficácia Luminosa (η)	23
2.1.7	Iluminância (E)	24
2.2	Sistema de Iluminação Pública	25
2.3	Componentes de um Circuito de Iluminação Pública	26
2.4	Principais Tecnologias de Iluminação Pública	28
2.4.1	Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão	28
2.4.2	Vapor de Sódio de Alta Pressão	30
2.4.3	Vapor de Mercúrio de Alta Pressão	32
2.4.4	Multivapores Metálicos	34
2.5	Conclusões Parciais	36
3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	37
3.1	Sistema de Medição	37
3.2	Sensores Radiométricos	39
3.2.1	Escolha dos Sensores	41
3.2.2	Sensores Escolhidos	44
3.2.2.1	BP104FAS	44
3.2.2.2	SFH2430	45
3.2.2.3	SFH3400	46
3.2.2.4	SFH3410	47
3.2.2.5	SFH5711	48
3.2.2.6	TSL13S	49
3.2.2.7	TSL261R	50
3.2.2.8	TSL2569T	51

3.2.2.9	TCS3414	52
3.3	Posicionamento	54
3.4	Acelerômetro	55
3.5	Núcleo de Processamento e Comunicação	56
3.6	Firmware	57
3.6.1	Estrutura	57
3.6.2	Funcionamento	58
3.7	Software de Aquisição de Dados	59
3.7.1	Estrutura	60
3.7.2	Funcionamento	61
3.8	Estrutura IP	63
3.9	Conclusões Parciais	64
4	SISTEMA DE CALIBRAÇÃO E AJUSTE	65
4.1	Calibração	65
4.1.1	Calibração Direta	66
4.1.2	Calibração Indireta	67
4.1.3	Calibração <i>in loco</i>	68
4.2	Metodologia de Calibração	69
4.2.1	Iluminador de Referência	70
4.2.2	Firmware	71
4.2.3	Software de Calibração	71
4.3	Procedimento de Calibração	73
4.4	Resultados de Calibração	75
4.4.1	Calibração na Esfera	75
4.4.2	Validação na Estrutura IP	76
4.4.3	Calibração <i>in loco</i>	76
4.5	Conclusões Parciais	80
5	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO	82
5.1	Técnicas de Reconhecimento de Padrões	82
5.1.1	J48	82
5.1.2	IBK	83
5.1.3	MLP	83
5.2	Configuração do Sistema de Classificação	84
5.3	Metodologia de Treinamento e Validação	85
5.4	Resultados de Classificação	86
5.5	Conclusões Parciais	90
6	CONCLUSÃO	92

PRODUÇÃO CIENTÍFICA DO AUTOR 94

REFERÊNCIAS 95

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como tema o desenvolvimento de um equipamento de identificação automática de tipo de tecnologia e potência elétrica dos pontos de Iluminação Pública (IP). Esse equipamento é fruto do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) promovido pela concessionária de energia elétrica EDP Escelsa e realizado pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em conjunto com a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), por meio do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO).

Nesta introdução serão feitas a contextualização do trabalho realizado, a exposição das justificativas para o desenvolvimento desta dissertação, além de seus objetivos e a estruturação do documento.

1.1 Contextualização e Justificativa do Trabalho

Desde os princípios da civilização, o homem tem criado variados sistemas para prover suas mais diversas necessidades. Desde à agricultura primitiva da Antiguidade, passando pelos aquedutos da Grécia Antiga ou mesmo o transporte marítimo no início da Idade Moderna, esses sistemas influenciaram o modo de vida da humanidade em sua época.

Com o desenvolvimento da sociedade, novas necessidades foram surgindo, motivando o desenvolvimento de novas tecnologias e o aparecimento de sistemas cada vez mais complexos, que se desenvolveram de forma interdependente, exigindo um funcionamento coordenado e padronizado. Como exemplo, temos os sistemas de energia, comunicações e transporte, que de uma maneira ou de outra devem se integrar seu correto funcionamento.

É importante ressaltar que a integração desses serviços no cotidiano não só facilita a vida das pessoas, como as tornam dependentes desses mesmos serviços. Nas grandes metrópoles, esta característica assume proporções ainda mais notáveis, podendo ser percebida na situação caótica quando do eventual colapso de qualquer um dos sistemas.

Dentre os serviços, um que exerce importância vital é o sistema de Iluminação Pública (IP). Esse serviço proporciona a extensão do nosso dia, permitindo que o trabalho, o lazer e o comércio possam ser exercidas no período noturno. Essa possibilidade passou a constituir nossa forma de organização social, tornando assim um fator de cidadania e, por consequência, a iluminação passou a ser uma exigência a ser suprida pelo poder público [1].

No Brasil, até o início desta década, a responsabilidade pelo serviço de IP ficava a cargo das concessionárias de distribuição de energia elétrica do país. Em 4 de setembro de 2010, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa nº 414 [2], estabelecendo a transferência, sem ônus, do sistema de iluminação pública

registrado como Ativo Imobilizado em Serviço (AIS) aos municípios, decisão fundamentada no Art. 30 da Constituição Federal de 1988 [3]. Essa transferência deveria ocorrer em até 24 meses após a publicação da resolução, prazo que foi estendido para 31 de dezembro de 2014 pela resolução nº 587 da própria ANEEL [4].

Essa determinação da ANEEL trouxe grandes desafios para concessionárias e municípios. Considerando que os pontos de IP, como regra geral, não efetuam medição de energia e seu consumo é estimado baseado em um mapeamento dos pontos de IP e na potência declarada pelos fabricantes da luminária, conforme o art. 25 da resolução 414, como deverá ser feito o faturamento a partir da transferência dos ativos? Especificamente, como os municípios poderão aferir os mapas de IP recebidos das concessionárias e como estas poderão manter atualizados os mapas que possuem, já que elas não mais serão responsáveis pela manutenção do parque de IP? Considerando que em 2012 o Brasil possuía 14,7 milhões de pontos de iluminação, que consumiam aproximadamente 3% de toda energia produzida no país [5], verifica-se que esse é um problema de grande relevância, já que pode implicar em elevadas perdas comerciais.

A solução ideal para o problema seria a implantação de medidores de energia em cada ponto de IP. No entanto, com o elevado número de pontos existentes, o custo dessa solução se torna inviável, obrigando a se utilizar o mapeamento de pontos de IP.

Atualmente, o levantamento desse mapa é feito de forma manual, por meio de um técnico que vai de ponto em ponto registrando a potência e tecnologia de iluminação. Esse método, além de dispendioso, é extremamente demorado, estando sujeito a erros de registro pelo técnico.

Para resolver esse problema, a concessionária EDP Escelsa procurou auxílio da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) da Universidade Federal de Juiz de Fora, para o desenvolvimento de um equipamento de identificação automática de tipo de tecnologia e potência elétrica dos pontos de IP, diminuindo assim os custos de operação e o tempo gasto para o levantamento do parque de IP.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a construção de um equipamento de identificação automática de tipo e potência de lâmpadas de iluminação pública, baseado em sensores radiométricos, que captam a radiação provinda das luminárias e, por meio de um classificador computacional, é capaz de identificar os parâmetros dos pontos de IP.

Como objetivos específicos, destaca-se o desenvolvimento dos seguintes itens:

- Placa de aquisição de dados de medição;

- Software de coleta de dados;
- Metodologia de calibração da placa de aquisição;
- Classificador computacional para o processamento dos dados coletados.

1.3 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 apresentará o Sistema de Iluminação Pública brasileiro. Serão contemplados neste capítulo o histórico do sistema e uma descrição detalhada das principais tecnologias de iluminação utilizadas no presente.

No Capítulo 3 será mostrado o equipamento de medição construído. Serão descritos os sensores radiométricos, os circuitos de aplicação para esses sensores, a plataforma microcontrolada, incluído hardware e *firmware*, o *software* de aquisição de dados e a metodologia de medição e avaliação dos dados.

Como todo instrumento de medição, o sistema proposto deve ser reprodutível. Isso significa que, para um dado ponto de iluminação de referência, qualquer unidade fabricada desse sistema de medição deverá apresentar aproximadamente a mesma resposta. Para isso ser possível, é necessário realizar a calibração do sistema. Dadas as características ímpares do dispositivo, foi necessário desenvolver uma metodologia de calibração própria, a ser mostrado no Capítulo 4.

Já o Capítulo 5 tratará do sistema de classificação. Inicialmente, será mostrado o estudo feito em relação aos parâmetros mensuráveis que interferem no processo de medição. Posteriormente, serão discutidas a arquitetura do sistema de classificação, os tipos de classificadores usados e os resultados de classificação.

Por fim, tem-se no Capítulo 6 a conclusão do trabalho, que apresentará as principais contribuições, comentários finais e propostas de futuros desenvolvimentos.

2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Este capítulo tratará do sistema de IP brasileiro. De início, será feita uma breve descrição dos principais conceitos luminotécnicos existentes, que trarão as informações necessárias para a análise dos sistemas de IP. Em seguida, será apresentado o sistema de IP, sua classificação e importância para a vida dos cidadãos. Posteriormente, serão mostrados os componentes que constituem o circuito de IP. Por fim, serão discutidas as principais tecnologias de IP usadas na atualidade.

2.1 Conceitos e Grandezas de Iluminação

2.1.1 Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética é um tipo de propagação de energia em que ocorre a oscilação mútua de campos elétricos (E) e magnéticos (M) que se autossustentam, estando desacoplados das cargas elétricas que lhe deram origem. Por se autossustentarem, não precisam de meio material para se propagarem, podendo assim se propagar no vácuo [6]. Além disso, as oscilações desses campos são perpendiculares entre si e à direção de propagação (V), formando dessa maneira uma onda transversal (Figura 1).

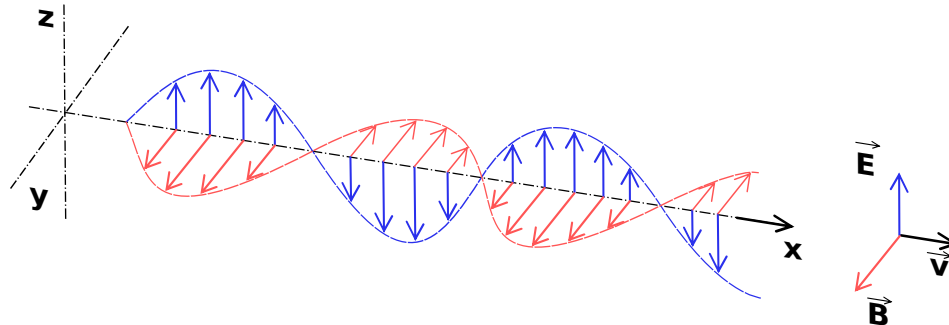


Figura 1 – Propagação de uma onda eletromagnética [7]

As ondas eletromagnéticas são caracterizadas por seu comprimento de onda. a faixa de valores possíveis de comprimentos de onda forma o espectro eletromagnético (Figura 2). Numa extremidade do espectro, de grande comprimento de onda (milhares de metros, baixa frequência) encontram-se as ondas de rádio, enquanto que, na outra ponta, estão os raios gama e raio X, com comprimentos de onda na ordem de 10^{-12} m (alta frequência).

2.1.2 Luz

Luz é o nome dado à radiação eletromagnética capaz de excitar o sistema visual humano, produzindo diretamente uma sensação visual. Apenas as ondas eletromagnéticas de uma pequena faixa do espectro é percebida pelo olho humano, faixa esta que vai de 380 a 790 nm [9] (Figura 2). Nosso sistema visual não somente percebe a radiação dentro

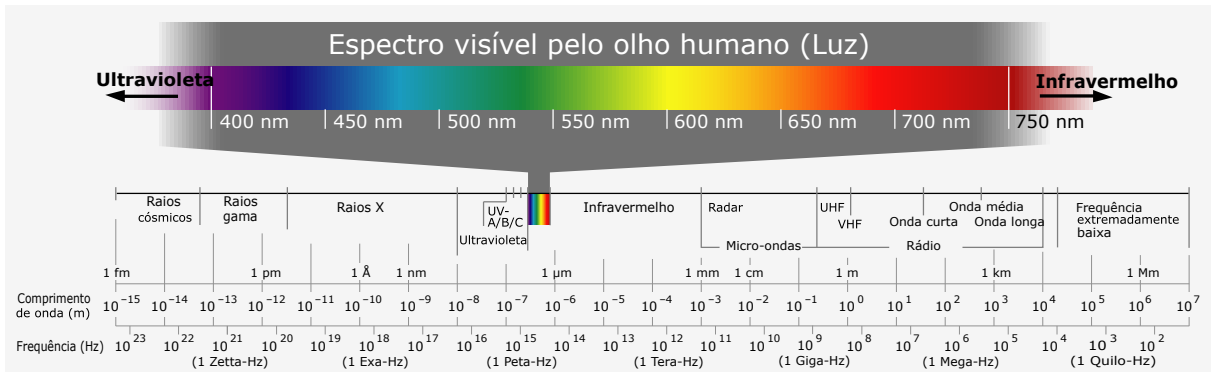


Figura 2 – Espectro eletromagnético [8]

desta faixa, mas também é capaz de discriminar diferentes comprimentos de onda para produzir a sensação de cor.

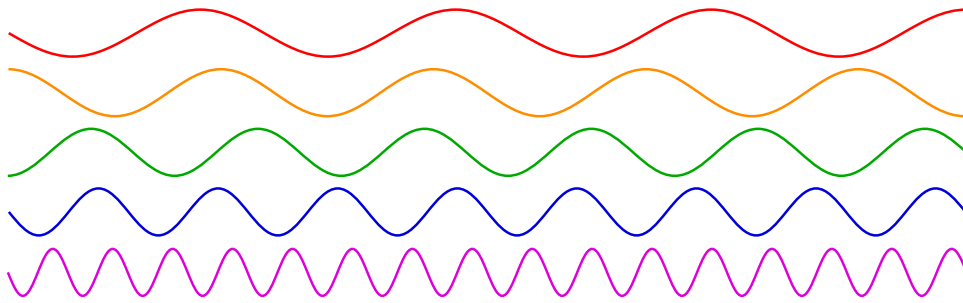


Figura 3 – Ondas correspondentes às variadas cores: vermelho para o maior e violeta para o menor comprimento de onda [10]

2.1.3 Radiometria e Fotometria

Radiometria é ciência que trata da medição da energia eletromagnética e a determinação de como essa energia é transferida de uma fonte até um detector através de um meio físico [11].

Tradicionalmente a radiometria assume que a propagação da radiação segue as leis da ótica geométrica [12]. Isso significa que se assume que a propagação da energia se dá ao longo da direção do raio e que os efeitos de interferência e difração são desprezados. Quando esses efeitos são significativos, a energia flui por outras direções que não a do raio geométrico. Nesse caso, é necessário fazer uma correção nos resultados obtidos por meio da ótica geométrica. Isso é equivalente a dizer que a energia flui por meio de um campo de radiação incoerente [11]. Essa consideração é largamente aplicada, já que a maioria das fontes de radiação possui grande grau de incoerência. Num tratamento rigoroso, o grau de incoerência deve ser determinado por meio das equações de *Maxwell* [13], mas trabalhar com esse nível de complexidade não é necessário para a maioria das aplicações.

A radiometria é dividida de acordo com as regiões do espectro. Assim, as radiometrias infravermelhas, ultravioletas e de micro-ondas são considerados campos distintos, assim como a radiometria da região espectral visível [11]. Contudo, todas podem usar as mesmas técnicas experimentais de medição. As grandezas normalmente são expressas em unidades derivadas de energia e as propriedades físicas da radiação eletromagnética são caracterizadas por grandezas radiométricas [14].

Já a fotometria é a ciência que estuda a medição da luz em termos da percepção do olho humano. Essa resposta é modelada por uma curva de sensibilidade espectral. Assim, as grandezas fotométricas são derivadas diretamente das grandezas radiométricas ponderadas pela curva de sensibilidade espectral [11]. Matematicamente, essa ponderação é determinada pela equação 2.1, em que F é a grandeza fotométrica de interesse, k_n uma constante de proporcionalidade do sistema visual utilizado, $V_n(\lambda)$ é a curva de sensibilidade do olho humano e $R(\lambda)$ é a distribuição espectral da grandeza radiométrica original.

$$F = k_n \int_0^{\infty} V_n(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

A sensibilidade do olho humano varia de acordo com a condição de iluminação. Por isso, a CIE (Commission Internationale de l'Éclairage - Comissão Internacional de Iluminação) padronizou duas curvas de resposta do olho humano. A primeira curva é chamada de curva fotópica, que está associada à visão sob condição de grande iluminação, como à luz do dia, com níveis de luminância superiores a 3 cd/m^2 . A outra é chamada de curva escotópica, relacionada à visão sob baixo nível de luminosidade, em que o nível de luminância é inferior a $0,003 \text{ cd/m}^2$. Ambas as curvas são ilustradas na Figura 4. As grandezas fotométricas são obtidas usando a curva de sensibilidade fotópica. Em condições intermediárias de iluminação, ocorre a chamada visão mesópica, cuja curva de sensibilidade não é bem definida, sendo intermediária às curvas fotópica e escotópica.

2.1.4 Potência Radiante

A potência radiante (Φ) é a potência total emitida por uma fonte de radiação. Sua unidade no SI (Sistema Internacional de Unidades) é o *watt* (W). A grandeza fotométrica equivalente é o fluxo luminoso, medido em lumens (lm). O lúmen é definido pelo SI como o fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz monocromática com comprimento de onda λ de 555 nm e potência radiante de $(1/683) \text{ W}$ [14].

2.1.5 Intensidade Radiante

A intensidade radiométrica é uma medida da propagação da energia radiante em uma determinada direção. Ela pode ser definida como a relação limite entre a potência

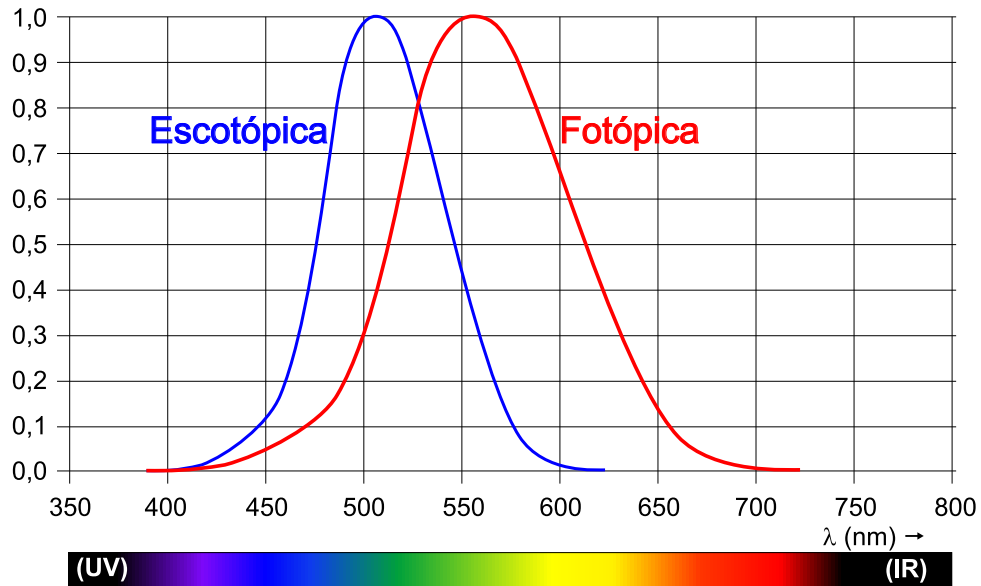


Figura 4 – Curvas de resposta do olho humano de um observador padrão [11]

radiante e um ângulo sólido S em uma determinada direção, quando este tende a zero. Na Figura 5 é ilustrado o ângulo sólido. Matematicamente, tem-se:

$$I = \frac{d\phi}{dS} \quad (2.2)$$

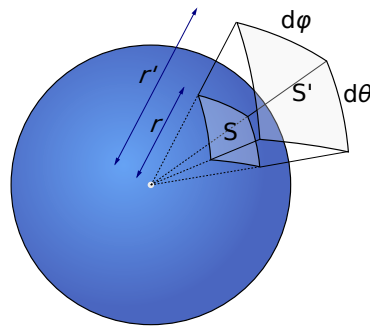


Figura 5 – Ângulo sólido [15]

A grandeza fotométrica correspondente é a Intensidade Luminosa, cuja unidade no SI é a candela (cd), que é definida como a intensidade de uma fonte luminosa monocromática com λ de 555 nm que emite uma potência de (1/683) W através de um ângulo sólido de 1 esfero-radiano (sr).

A distribuição de luz por uma fonte pode ser representada por uma superfície definida pela distribuição espacial dos valores de intensidade luminosa. Essa superfície, por ser espacial, não pode ser representada diretamente no plano. Para isso, é necessário efetuar a projeção dessa superfície em um plano de interesse. A interseção entre a superfície fotométrica e um plano que passa pelo seu centro é denominada curva fotométrica. Assim, pode-se obter curvas vertical 6 e horizontal 7 de uma fonte luminosa.

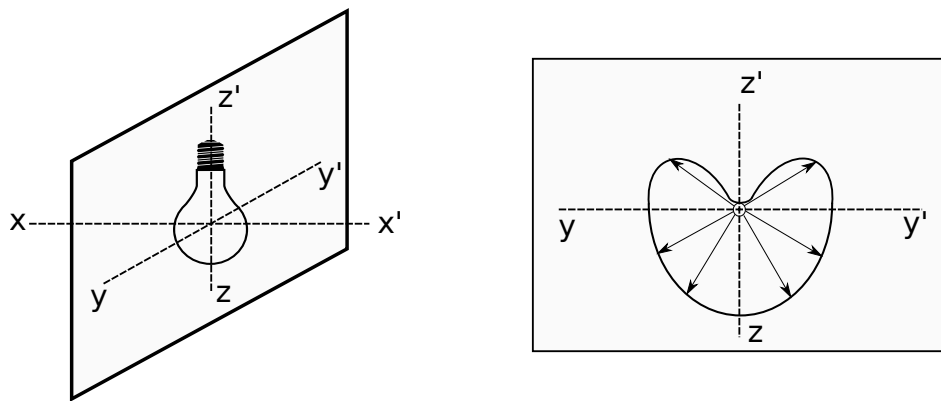


Figura 6 – Curva de intensidade luminosa vertical [16]

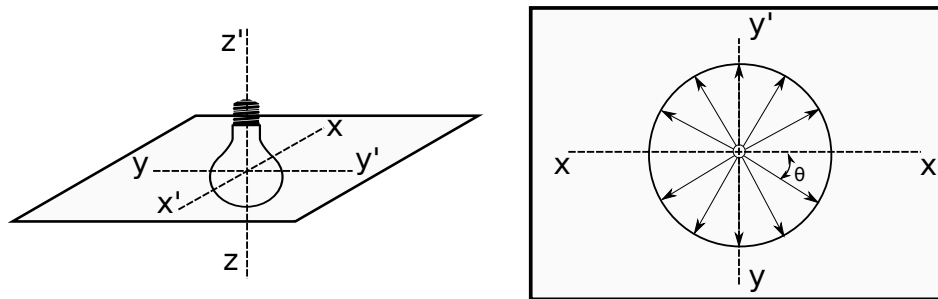


Figura 7 – Curva de intensidade luminosa horizontal [16]

2.1.6 Eficácia Luminosa (η)

Em termos gerais, uma fonte luminosa é um elemento que converte uma determinada fonte de energia em luz. Em uma vela, essa conversão tem como origem a energia química liberada por meio da combustão da cera que a compõe. Já numa lâmpada elétrica, a conversão se dá por meio da energia elétrica.

No entanto, esse processo de conversão não é perfeito. No caso de uma lâmpada, parte da energia elétrica consumida é convertida em calor, uma segunda parte gera radiação não visível e só uma parte menor é que efetivamente se converte em energia luminosa. Esse processo é ilustrado na Figura 8.

Nesse contexto, a eficácia luminosa (η) de uma determinada fonte de luz é definida como a relação entre o fluxo luminoso total Φ emitido pela fonte de luz e a potência P por ela absorvida [17], conforme mostrado na equação 2.3:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (2.3)$$

Essa relação é normalmente expressa em [lm/W]. Na tabela 1 compara a eficácia luminosa de algumas tecnologias de iluminação.

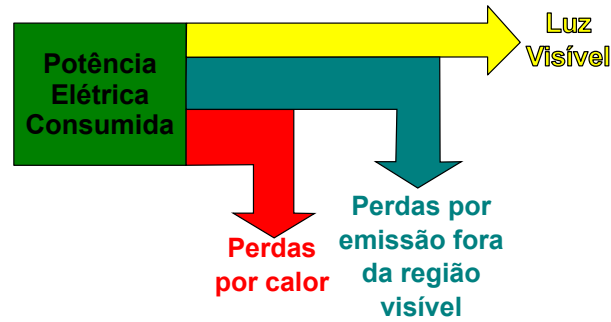


Figura 8 – Eficácia Luminosa

Tabela 1 – Eficácia luminosa típica de algumas fontes de luz [18]

Fonte	Eficácia luminosa
Vapor de Mercúrio em alta pressão (125 W)	38,0 lm/W
LED branco de alto brilho e baixa potência (20 mA)	46,2 lm/W
Multivapores Metálicos (70 W)	60,9 lm/W
Vapor de Sódio em alta pressão (70 W)	77,0 lm/W
LED branco de alto brilho e alta potência (350 mA)	85,9 lm/W

2.1.7 Iluminância (E)

A iluminância ou iluminamento (E) é definida como a densidade superficial de fluxo luminoso recebido. Em outras palavras, é o fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada, sendo expresso matematicamente pela equação 2.4.

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (2.4)$$

Um dos diagramas de grande importância em luminotécnica é o *diagrama isolux*, que mostra o conjunto de pontos que apresentam a mesma iluminância. A Figura 9 apresenta um exemplo desse tipo de diagrama de uma luminária IP típica. A origem do gráfico corresponde ao ponto de localização da fonte luminosa. Analisando a Figura, verifica-se que a região central não só apresenta os maiores valores de iluminância, como também apresenta esses valores aproximadamente constantes, indicando que essa é uma boa região para se efetuar medidas reprodutíveis.

Outra equação importante é a *Lei de Lambert* [16], que permite calcular a iluminância de uma fonte luminosa puntiforme em qualquer ponto a partir da intensidade da fonte. Expressa pela equação, ela é derivada diretamente das equações de Maxwell. Verifica-se que a iluminância varia não só com a posição no plano, como também com o quadrado da altura da luminária, indicando que esse é um importante parâmetro de

influência no processo de medição.

$$E_H = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (2.5)$$

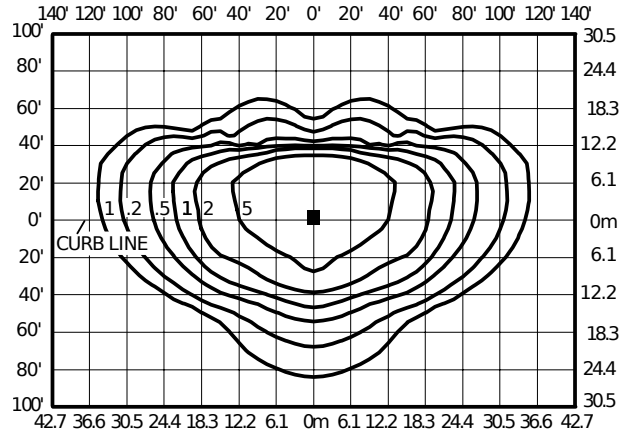


Figura 9 – Exemplo de diagrama isolux da uma luminária de IP [19]

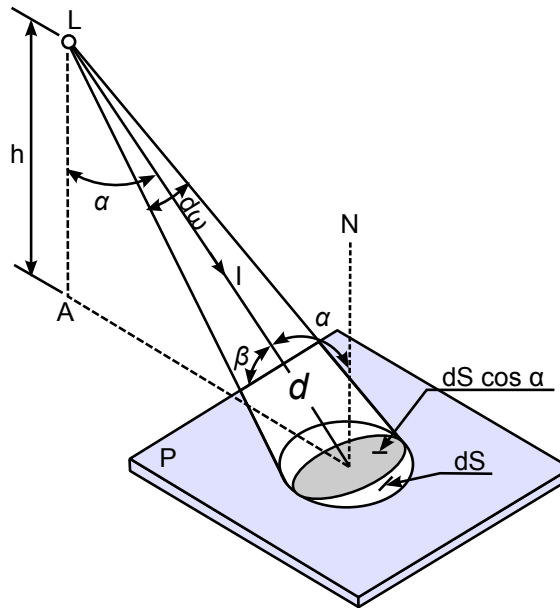


Figura 10 – Fonte luminosa puntiforme iluminando uma área elementar no plano P

2.2 Sistema de Iluminação Pública

A Iluminação Pública é o nome do serviço responsável pela iluminação do espaço público. Segundo a resolução 414/2010 da ANEEL [2], ela tem por objetivo “prover de luz, no período noturno ou nos escurecimentos diurnos ocasionais, os logradouros públicos, inclusive aqueles que necessitem de iluminação permanente no período diurno”. É um caso particular da iluminação externa e pode ser classificada como [5]:

- rodoviária: aplicada à iluminação de vias intermunicipais (estradas).
- urbana: aplicada à iluminação de vias urbanas.
- monumental: aplicada à iluminação de monumentos, fachadas de prédios ou obras civis consideradas como sendo de arte.

Trata-se de um serviço essencial à qualidade de vida noturna da população que reside nos centros urbanos e visa possibilitar às pessoas desfrutar dos espaços e vias públicas com segurança e tranquilidade.

Nesse sentido, a IP desempenha papel importante na vida das cidades, destacando-se como principais [20]:

- *Inibição do crime*: a IP melhora a visibilidade, o sentido de orientação e, consequentemente, a segurança, não somente pela possibilidade de melhor identificar potenciais perigos, como por inibir ações criminosas.
- *Promoção do jovem saudável*: com áreas bem iluminadas, pode-se fomentar a prática de atividades saudáveis nas áreas do esporte, lazer e da cultura, que afastam o jovem do crime e qualifica a sua presença nas ruas. Os municípios podem promover ações esportivas, recreativas, culturais, oficinas para estímulo a talentos, educativas de diversas modalidades em áreas livres, bem iluminadas e atrativas.
- *Redução de acidentes de trânsito*: a IP também contribui para reduzir as possibilidades de acidentes de trânsito com pedestres, como choques com obstáculos na altura do solo – meios-fios, buracos, irregularidades. Da mesma forma, com ruas mais bem iluminadas, reduz-se o efeito do ofuscamento dos faróis de veículos sobre outros motoristas, evitando acidentes.
- *Atração de turistas*: a IP também promove a sociabilidade, permitindo que as pessoas se vejam e se encontrem; realça certos objetos e valoriza monumentos e sítios históricos, tornando a cidade mais atraente para os turistas.
- *Aumento da autoestima dos moradores*: viver em uma cidade amigável, onde se pode circular com segurança e ter vida noturna agradável, com a presença de amigos e visitantes, eleva a autoestima dos cidadãos residentes nela e melhora a visibilidade da administração municipal.

2.3 Componentes de um Circuito de Iluminação Pública

O sistema de IP é composto pelas luminárias, lâmpadas, relés fotoelétricos, reatores, braços de sustentação da luminária, eletrodutos, caixas de passagem e condutores

exclusivos para iluminação pública. Também fazem parte os postes e circuitos utilizados exclusivamente para atender ao circuito de IP, com ou sem transformadores. A Figura 11 ilustra os diversos componentes do sistema.

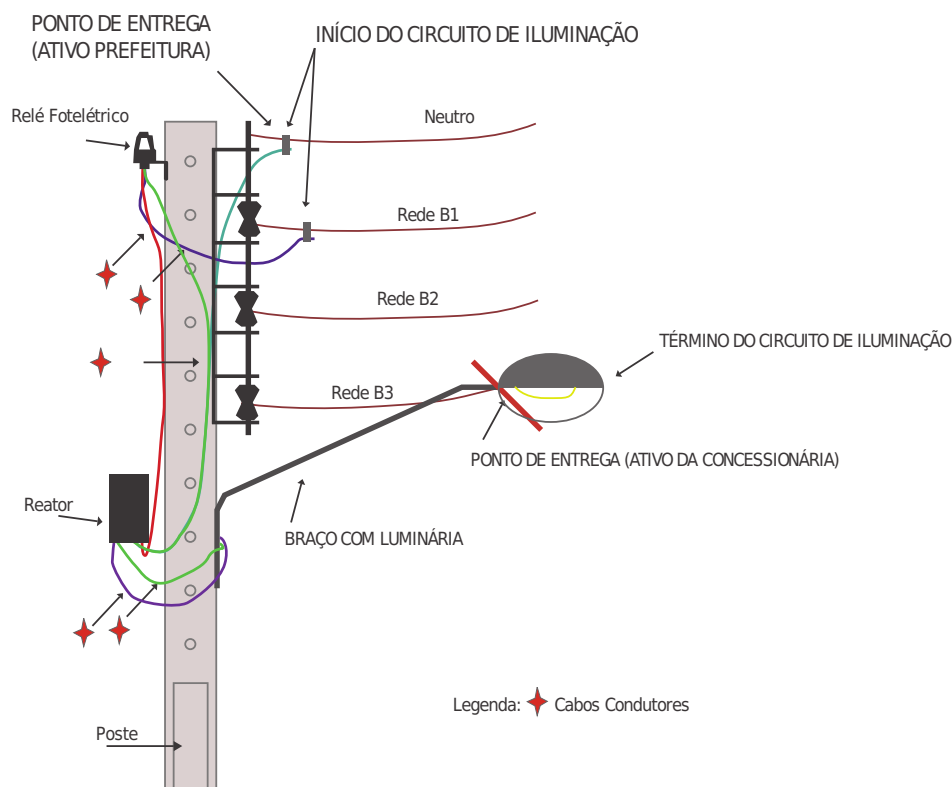


Figura 11 – Componentes de um circuito de IP [20]

A seguir, uma descrição dos principais elementos da rede de IP [21]:

- (a) *Lâmpada*: dispositivo elétrico que tem por objetivo converter energia elétrica em luz. No sistema de IP brasileiro, são usadas principalmente as lâmpadas de descarga de alta pressão, em especial as que utilizam vapor de sódio.
- (b) *Relé Fotoelétrico*: O relé fotoelétrico monitora a luminosidade do local e faz o acionamento da IP. Possuem dois tipos quanto a natureza de operação: normalmente abertos (NA), que mantêm abertos seus contatos elétricos na ausência de luz, e normalmente fechados (NF), que mantêm fechados os contatos nessas condições;
- (c) *Reator*: As lâmpadas de descarga têm a característica de ter a sua impedância reduzida com a elevação da corrente, exigindo a instalação de um limitador dessa corrente no circuito para evitar a destruição da lâmpada. Este papel é desempenhado pelo reator que, além disso, mantém a lâmpada operando dentro dos limites adequados estabelecidos. Ele pode ser instalado internamente em um compartimento da luminária ou externo próximo ao relé.

- (d) *Luminária*: elemento responsável por prover meios para distribuir o fluxo luminoso proveniente da lâmpada e manter as condições ambientais adequadas para operação dos componentes. Uma luminária pública possui: um conjunto ótico composto de um refletor, um difusor e um dispositivo para fixação do soquete e posicionamento da lâmpada; o alojamento do equipamento (reator), quando previsto a instalação interna deste; um sistema de fixação da luminária no poste ou suporte e; um invólucro, destinado a dar o grau de proteção exigido.
- (e) *Rede de Distribuição da Concessionária*: rede de distribuição de energia elétrica responsável por alimentar as diferentes regiões da cidade. Em sua maioria, opera com tensão primária de entrada entre fases de 13,8 kV ou 34,5 kV e tensão secundária de saída entre fases de 220 V ou 380 v.
- (f) *Poste*: coluna, normalmente feita de concreto, responsável por sustentar os condutores da rede de distribuição e a luminária do sistema de IP.
- (g) *Braço*: elemento de fixação da luminária ao poste. Deve ser dimensionado para que, além da carga normal a que está submetido, suporte as cargas de vento, vibrações e, dentro de certos limites, impactos provenientes de colisões com veículos nos postes ou mesmo atos de vandalismo.

2.4 Principais Tecnologias de Iluminação Pública

Na Figura 12 são mostradas, de acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF) do Ministério de Minas e Energia (MME) [22], as principais tecnologias de iluminação usadas no parque brasileiro de IP.

Observa-se na Figura 12 um aumento gradativo da participação das lâmpadas de vapor de sódio acompanhada da redução correspondente das lâmpadas de vapor de mercúrio. Esse fato se deve ao início do programa PROCEL RELUZ [23], que financiou essa troca de tecnologia visando a redução do consumo de energia do sistema.

De todo modo, verifica-se que vapor de sódio e vapor de mercúrio são as tecnologias dominantes na IP no Brasil. Outra tecnologia relevante é a das lâmpadas de multivapores metálicos. Embora tenha uma pequena participação global, ela domina um nicho importante que é a de iluminação de praças e monumentos [24].

Tem-se a seguir uma descrição das principais características de cada uma dessas tecnologias: [17]

2.4.1 Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão

Uma característica comum das três principais tecnologias usadas nos pontos de IP do país é serem lâmpadas de descarga em alta pressão (HID, do inglês High Intensity

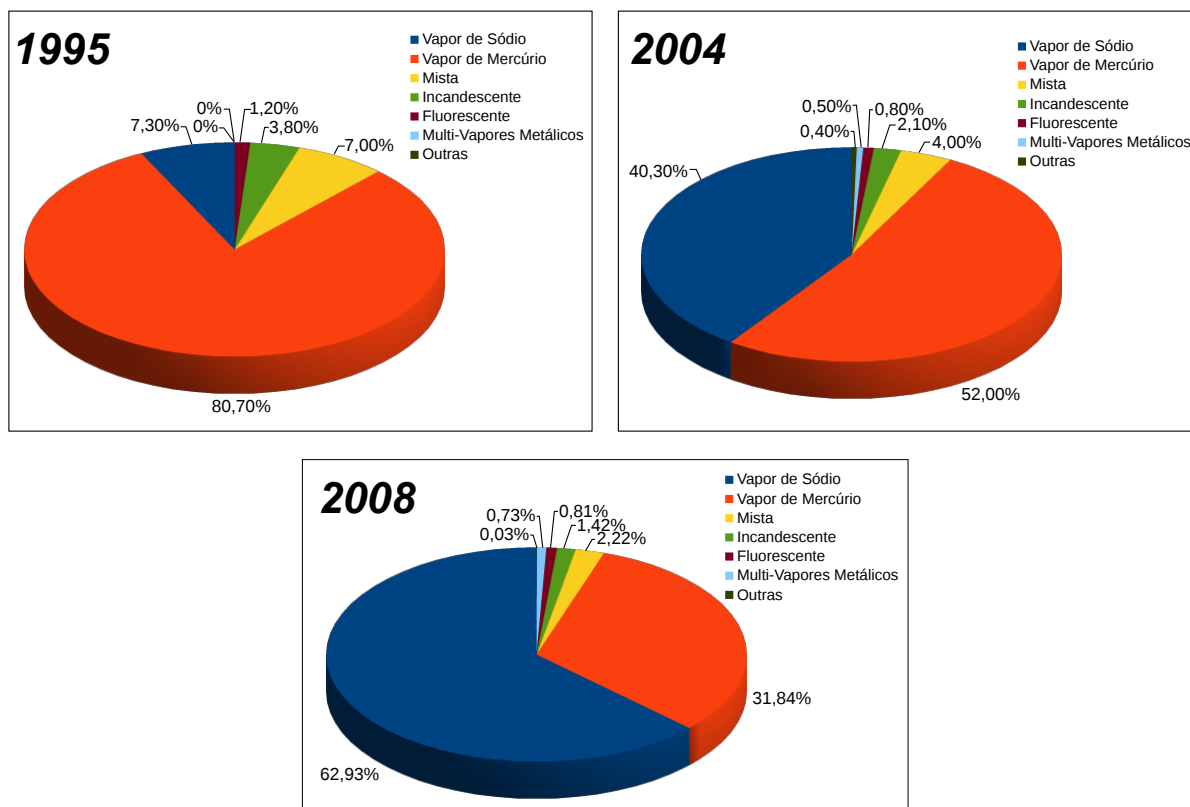


Figura 12 – Evolução das tecnologias de iluminação no parque nacional de IP [22]

Discharge). Nesse tipo de lâmpada, o fluxo luminoso é produzido pela passagem de corrente elétrica através de uma mistura de gases composta de gases inertes e vapores metálicos. Essa massa gasosa é confinada em um invólucro translúcido, o tubo de descarga. Geralmente, o tubo de descarga contém em suas extremidades os eletrodos, que são responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação (Figura 13). Esse método de emissão luminosa permite maior eficiência do que incandescência, pois na descarga são atingidas maiores temperaturas, reduzindo a perda de energia por radiação infravermelha [18].

O composto metálico responsável pela radiação se encontra em estado sólido ou líquido na temperatura ambiente. O gás inerte deve ser isolante elétrico. Quando é aplicado ao gás um campo elétrico suficientemente grande, ocorre o rompimento de sua rigidez dielétrica, propiciando o aparecimento de uma descarga elétrica, processo esse denominado ignição. O calor gerado pelo arco elétrico criado através do gás de preenchimento vaporiza o composto metálico até o ponto de formação de plasma, criando condições favoráveis à circulação de corrente pela lâmpada. A radiação eletromagnética gerada pode ou não ser visível. Nos casos em que esta não é visível, utilizam-se substâncias especiais no revestimento interno do tubo de descarga que convertem esta radiação em luz visível [26].

De acordo com a pressão interna do tubo durante sua operação, as lâmpadas de descarga são classificadas como lâmpadas de descarga em baixa ou alta pressão. As

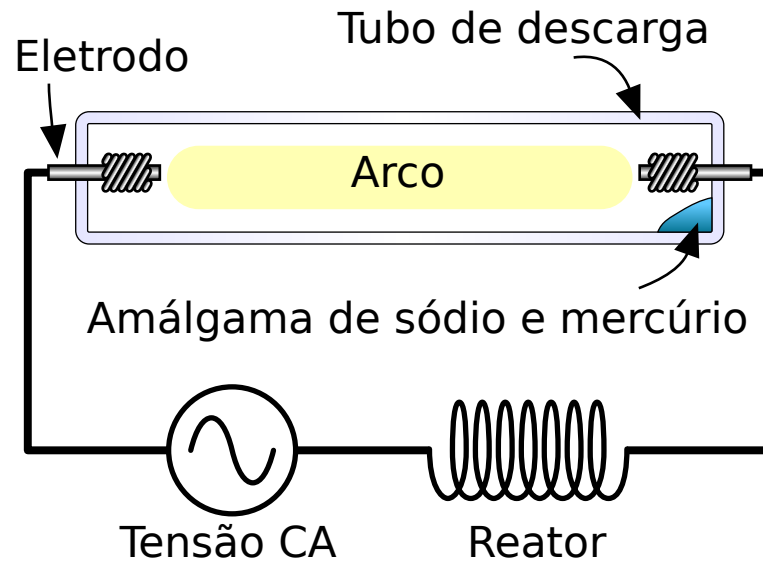


Figura 13 – Exemplo de circuito de lâmpada de descarga de alta pressão (vapor de sódio) [25]

lâmpadas de descarga em baixa pressão possuem tubos de descarga com dimensões bem maiores do que aqueles tubos utilizados nas lâmpadas de descarga em alta pressão. Isto ocorre porque a baixa pressão no interior do tubo faz com que a densidade de corrente também seja menor. Portanto, tubos maiores são necessários para maior irradiação do fluxo luminoso [17].

A descarga em alta pressão permite que os átomos se excitem em níveis superiores, propiciando melhor qualidade da cor emitida. Devido à alta pressão, a temperatura do arco de descarga é muito elevada (se comparada com a temperatura atingida nas descargas em baixa pressão), o que reduz o rendimento da lâmpada, uma vez que parte da potência entregue é irradiada na forma de calor. Esta alta temperatura exige que seja empregada uma ampola externa ao tubo para que a temperatura seja mantida e também para prover proteção ao tubo de descarga [18].

Serão descritas agora as características luminosas das principais tecnologias de lâmpadas de IP.

2.4.2 Vapor de Sódio de Alta Pressão

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (HPS, do inglês High Pressure Sodium) são lâmpadas de descarga em meio gasoso que utiliza um plasma de vapor de sódio para a emissão de luz. Além do sódio, há também a presença de mercúrio em baixa concentração. Na Figura 14 é mostrado o diagrama de uma lâmpada HPS tubular típica.

As lâmpadas HPS são a principal tecnologia utilizada no parque de IP brasileiro. No entanto, essa é uma tecnologia que já atingiu o seu ápice, tendo iniciado sua substituição pela iluminação usando diodos emissores de luz (LED, do inglês Light Emitter Diode).

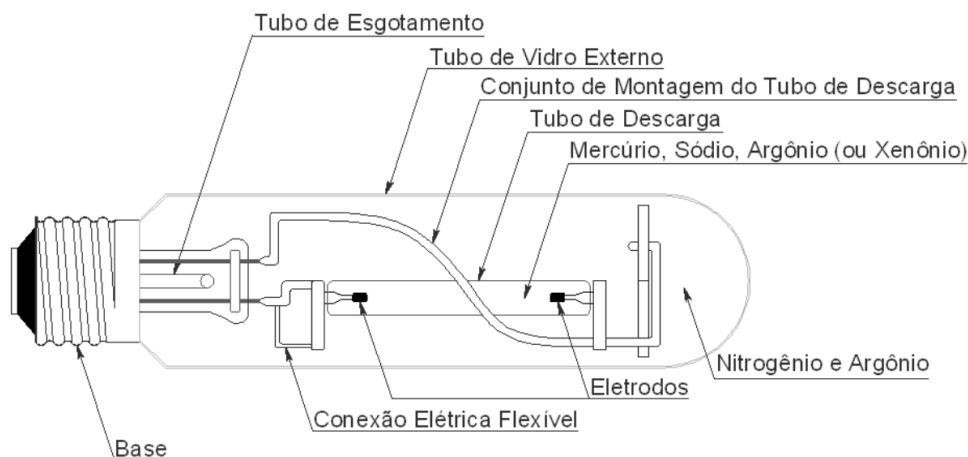


Figura 14 – Diagrama de uma lâmpada HPS tubular [27]

Algumas características destas lâmpadas são mostradas a seguir [17]:

- Eficácia luminosa: 70 a 150 lm/W;
- Vida útil: 16000 a 32000 horas;
- Índice de reprodução de cores (IRC): 20% a 60%;
- Temperatura de cor correlata (TCC): 1900 K a 2200 K.

A energia luminosa irradiada pelas lâmpadas HPS cobre grande parte do espectro visível. A largura de banda da emissão é substancialmente alargada tanto pela ressonância induzida pela alta pressão de vapor no interior da lâmpada quanto pelas emissões do mercúrio. Outros efeitos que contribuem para o alargamento espectral são a auto-reversão, devida à absorção de fótons na região externa mais fria do tubo, e o efeito da força de van der Waals dos átomos de mercúrio no arco, este último afetando essencialmente a região vermelha do espectro emitido [26].

Na Figura 15 é mostrado o diagrama espectral de uma típica lâmpada HPS. Verifica-se que a maior parte da sua radiação visível (cerca de 40%) é emitida na faixa conhecida como linha D do sódio (comprimento de onda de aproximadamente 589 nm). Pode-se observar a distribuição em raias, típica das lâmpadas de descarga. Um pico próximo aos 830 nm, fora da faixa visível, também pode ser observado. Esta raia de emissão na região do infravermelho se deve a alta temperatura de trabalho dessas lâmpadas [18].

Por fim, a Figura 16 apresenta um exemplo de rua iluminada com uma lâmpada HPS.

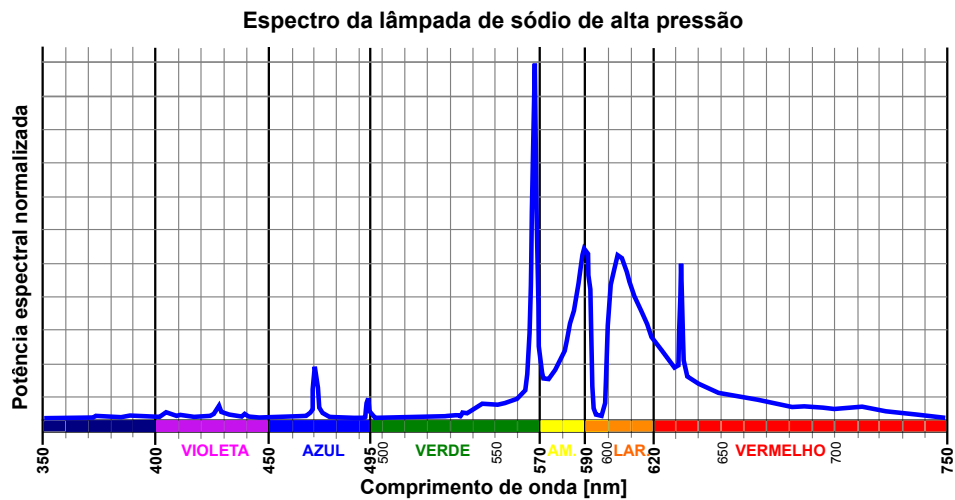


Figura 15 – Espectro de uma lâmpada HPS [28]



Figura 16 – Rua iluminada com lâmpadas HPS

2.4.3 Vapor de Mercúrio de Alta Pressão

As lâmpadas de vapor de mercúrio (HPMV, do inglês High Pressure Mercury Vapor) são lâmpadas de descarga em meio gasoso que utiliza um plasma de vapor de mercúrio para a emissão de luz. Na Figura 17 é mostrado o diagrama de uma lâmpada HPMV tubular típica.

Essa tecnologia já está em desuso, devido a sua baixa eficácia luminosa frente a outras tecnologias de iluminação, sobretudo a HPS. No entanto, por ser a antiga tecnologia dominante e ainda não se concluiu o seu processo de substituição, ela ainda ocupa uma posição relevante dentro do parque de IP nacional.

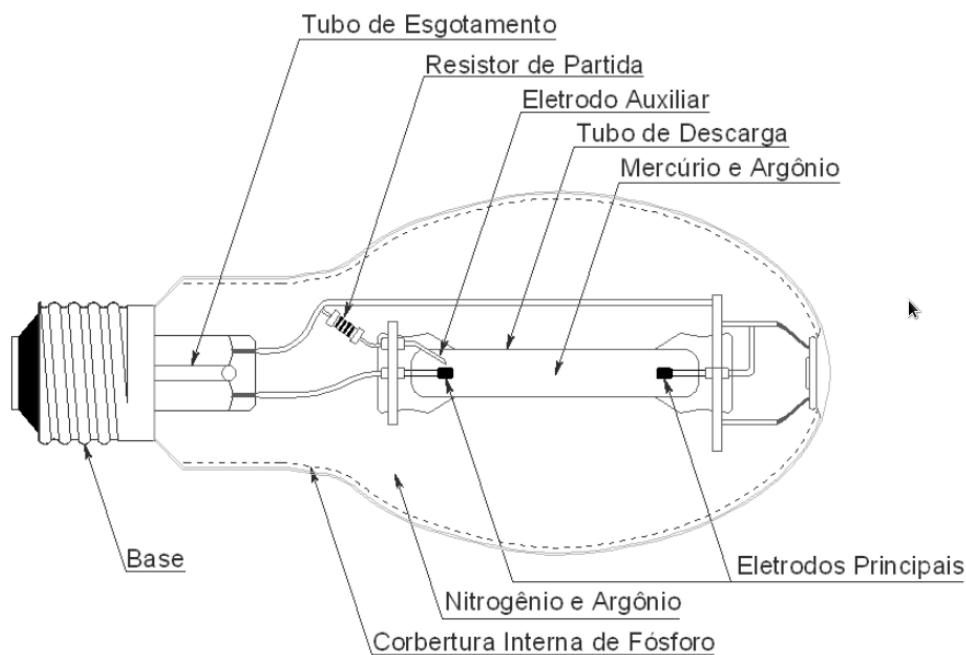


Figura 17 – Diagrama de uma lâmpada HPMV [27]

Algumas características destas lâmpadas são mostradas a seguir [17]:

- Eficácia luminosa: 44 a 55 lm/W;
- Vida útil: 9000 a 20000 horas;
- IRC: 16% a 52%;
- TCC: 3600K a 6000 K;

A energia luminosa irradiada pelas lâmpadas HPMV também cobre grande parte do espectro visível. Originalmente, a radiação provinda do mercúrio é concentrada na região do violeta, apresentando baixíssima intensidade na região do vermelho. Com o objetivo de melhorar o índice de reprodutibilidade de cor (IRC), o bulbo da lâmpada é revestido com uma camada de fósforo, que converte em luz vermelha parte da radiação ultra-violeta emitida, espalhando assim o espectro [26].

Na Figura 18 é mostrado o diagrama espectral de uma típica lâmpada HPMV. Verifica-se as raias características do mercúrio, correspondentes ao violeta e verde. Além disso, observa-se um pequeno espalhamento na região do vermelho, proveniente da conversão do ultra-violeta realizada pela camada de fósforo do bulbo.

Como exemplo, é mostrada na Figura 19 uma rua com iluminação por HPMV.

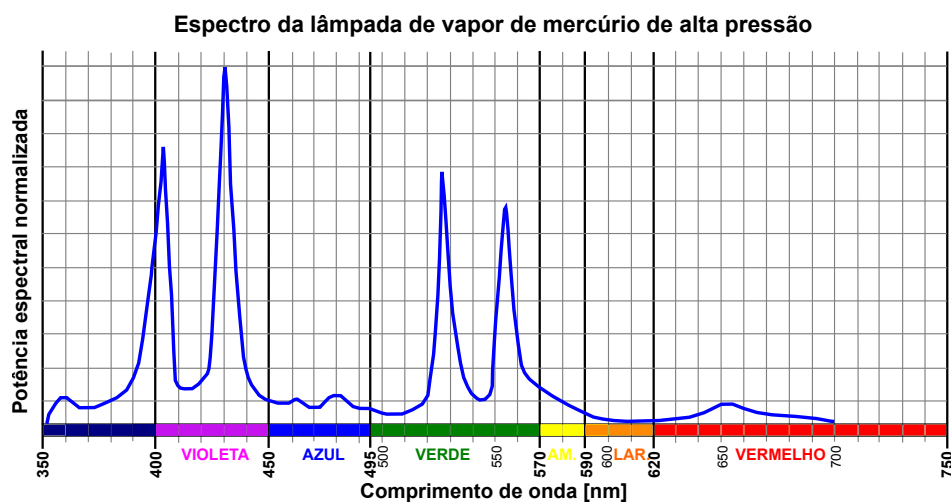


Figura 18 – Espectro de uma lâmpada HPMV [29]



Figura 19 – Rua iluminada com lâmpadas HPMV

2.4.4 Multivapores Metálicos

As lâmpadas de multivapores metálicos (HPMH, do inglês High Pressure Metal Halide) são lâmpadas de descarga em meio gasoso que utilizam plasma de uma mistura metálica para a emissão de luz. Ela é semelhante à lâmpada de mercúrio, mas contendo uma mistura de haletos metálicos à base de bromo e iodo, com o objetivo de aumentar a eficácia luminosa e melhorar a distribuição espectral. Na Figura 20 é mostrado o diagrama de uma lâmpada HPMH tubular.

Devido às suas ótimas propriedades de cor, as melhores dentre as HID, essas lâmpadas possuem uma larga gama de utilização. No que se refere à IP, elas são utilizadas especialmente em locais que exigem uma melhor reprodutibilidade de cor, como monumentos, praças, prédios públicos e certas vias de valor turístico [24].

Algumas características das lâmpadas HPMH são mostradas a seguir [17]:

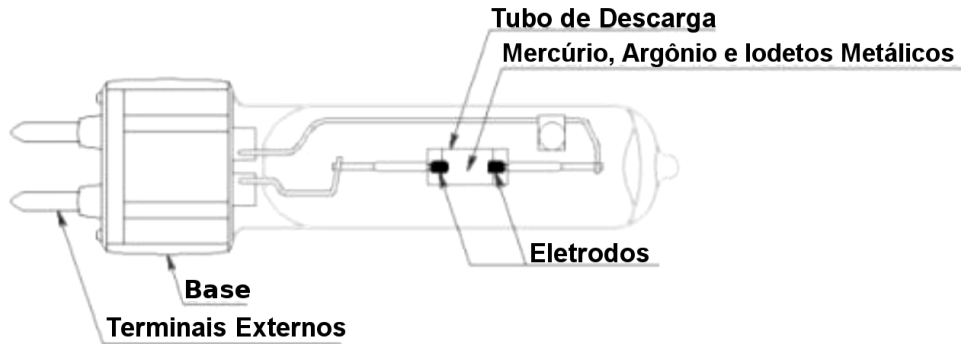


Figura 20 – Diagrama de uma lâmpada HPMH [27]

- Eficácia luminosa: 70 a 110 lm/W;
- Vida útil: até 24000 horas;
- IRC: 70% a 95%;
- TCC: 3600K a 5600 K;

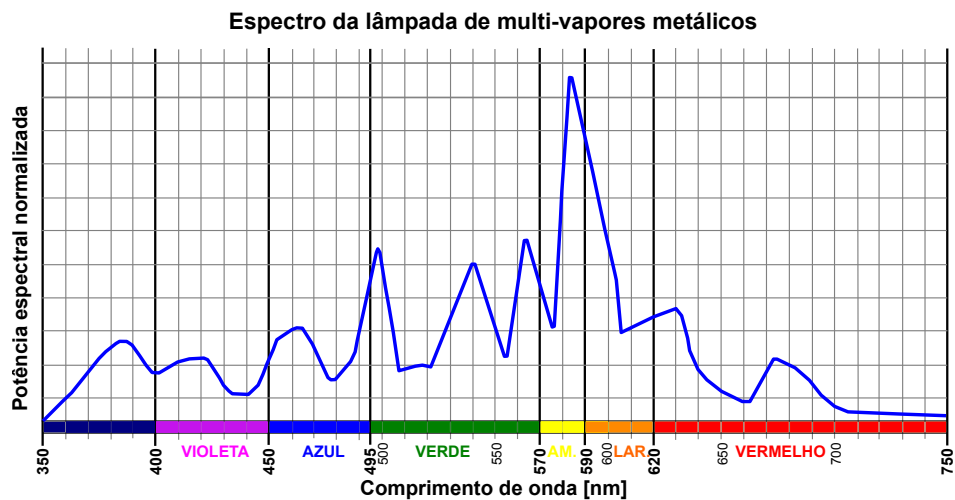


Figura 21 – Espectro de uma lâmpada HPMH [30]

A Figura 21 mostra o espectro de uma lâmpada HPMH. Verifica-se, em comparação com as demais tecnologias aqui discutidas, que a energia luminosa irradiada pelas lâmpadas HPMH é a que apresenta a distribuição espectral mais uniforme, o que justifica o IRC de até 95%. Os diversos picos existentes são provenientes de cada um dos metais que compõe a lâmpada. Assim, diferentes modelos de lâmpadas HPMH podem apresentar distribuição espectral razoavelmente distintas dependendo das concentrações metálicas em sua composição.

Por fim, é mostrada na Figura 22 uma rua com iluminação por HPMH.



Figura 22 – Rua iluminada com lâmpadas HPMH

2.5 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi feito um estudo sobre o sistema de IP no Brasil. O objetivo desse estudo foi determinar as principais características do sistema de IP de modo que se possa classificar os diferentes tipos de lâmpadas adotadas na iluminação.

Começou-se introduzindo conceitos de radiometria e luminotécnica necessários para o entendimento do sistema.

Na sequência, foi apresentado o sistema de IP como um todo: seu objetivo e sua importância para a sociedade.

Em seguida, foi feito um breve relato do histórico do sistema de IP no Brasil, mostrando a evolução do sistema até o momento presente.

Posteriormente, foram apresentados os componentes que integram o sistema de IP e, por fim, foram discutidas as principais tecnologias utilizadas para iluminação.

Dentre essas tecnologias, verificou-se que há o predomínio em termos de aplicação de 3 tecnologias específicas: HPS, HPMV e HPMH. Além disso, verificou-se que existe uma diferença significativa quanto ao espectro luminoso dessa 3 tecnologias. Essas duas informações irão nortear o projeto do hardware de identificação de tipo e potência de lâmpadas, que será descrito no capítulo 3.

3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste capítulo será apresentado o sistema de aquisição de dados radiométricos para a identificação das lâmpadas de IP proposto neste trabalho. Essa apresentação se inicia com os sensores radiométricos: o porquê da escolha desse tipo de sensor, como escolher um sensor desse tipo para essa aplicação e quais sensores foram escolhidos. Além disso, será falado sobre o sistema de posicionamento para efetuar a medição na região ótima.

Em seguida, serão apresentados o *hardware* do sistema de aquisição, com destaque para o microcontrolador adotado e o projeto do *firmware*, e o *software* de aquisição de dados desenvolvidos.

Finalizando o capítulo, será apresentada a estrutura de IP construída para avaliação do sistema proposto.

3.1 Sistema de Medição

O sistema de medição pode ser descrito como um equipamento eletrônico que pode ser instalado sobre um veículo e é capaz de adquirir informação luminosa do ambiente (Figura 23). A placa eletrônica de medição é acomodada em um gabinete especialmente projetado para esse fim, oferecendo proteção contra esforços mecânicos, umidade, poeira e, principalmente, evitando a influência de fontes luminosas vizinhas ao ponto de iluminação sob medição.

Na Figura 24 é apresentada a arquitetura do *hardware* do sistema. O *hardware* é composto por um conjunto de sensores eletrônicos capazes de reunir diferentes informações sobre o equipamento de medição. São utilizados sensores radiométricos de baixo custo, analógicos e digitais, com diferentes respostas espectrais. Além desses sensores, são utilizados sensores de posicionamento (sensores luminosos que informam ao operador se o dispositivo está corretamente embaixo da luminária), um acelerômetro (que calcula a inclinação do terreno) e um sistema de posicionamento global (GPS), que permite a localização geográfica do ponto de iluminação. Uma câmera digital completa o sistema. Essa câmera atualmente provê informação adicional para posicionamento e também é acomodada dentro do gabinete.

Todos os sensores são gerenciados por um processador digital de sinais (DSP), que coleta as informações e as envia por meio de uma conexão *bluetooth* a um dispositivo de aquisição dentro do veículo, como um notebook ou tablet.

Inicialmente, foram feitos protótipos artesanais na placa de medição, usada nos estudos iniciais deste projeto. Posteriormente, foi industrializado um pequeno lote de 6 unidades dessa placa. Ambas as placas podem ser vistas nas Figuras 25 e 26.

O gabinete construído é mostrado nas Figuras 27 e 28. Neste primeiro protótipo, o

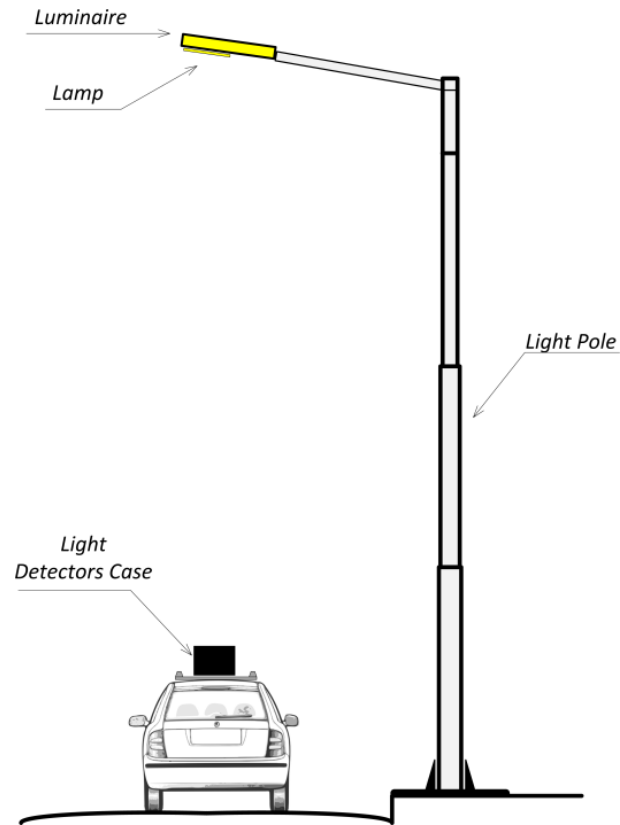


Figura 23 – Cenário de aquisição de dados típico incluindo o case do dispositivo de medição, o veículo de transporte e o poste de IP

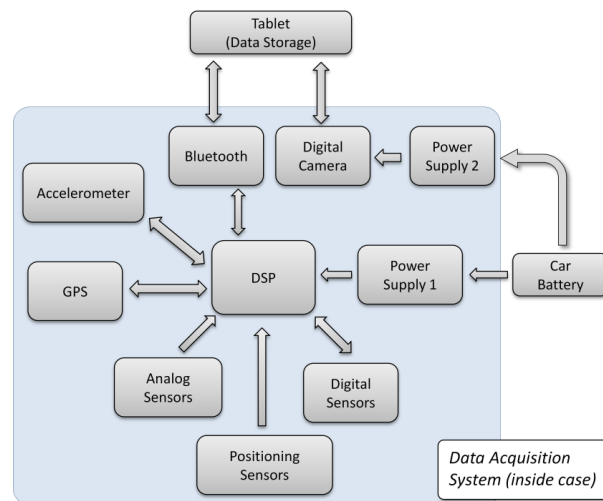


Figura 24 – Arquitetura do equipamento de medição

material utilizado foi o aço-carbono, que atribuiu robustez ao sistema, ao custo de um peso relativamente alto: 18 kg. Tem-se a seguir uma lista com as principais especificações do equipamento.

- Gabinete construído em chapa de aço com na cor preta.

- Tampo em vidro, fixado por flanges isoladas para evitar penetração de água.
- Dois compartimentos internos.
- Suporte para fixação de câmera fotográfica.
- Suporte para fixação de antena GPS.
- Suporte para fixação de placas.
- Grade para ajuste de posicionamento de placas.
- Grau de proteção IP-63.
- Conector lateral à prova d'água.
- Painel frontal para LEDs de sinalização.

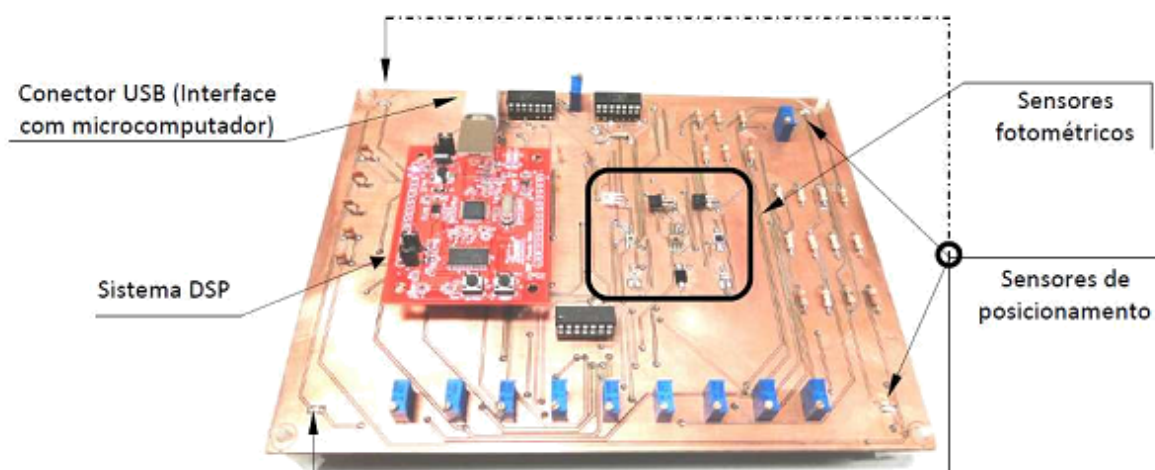


Figura 25 – Protótipo da placa de aquisição de dados

3.2 Sensores Radiométricos

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) [31], sensor é o “elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida”. Neste contexto, os sensores radiométricos são os elementos que sofrem influência das ondas eletromagnéticas, fornecendo uma resposta proporcional ao fenômeno de interesse.

No capítulo 2, foi visto que um dos fatores que diferenciam cada uma das tecnologias de iluminação é a luz emitida por cada tipo de lâmpada. Essa diferença nada mais é do que um retrato da diversidade entre os espectros eletromagnéticos característicos de cada

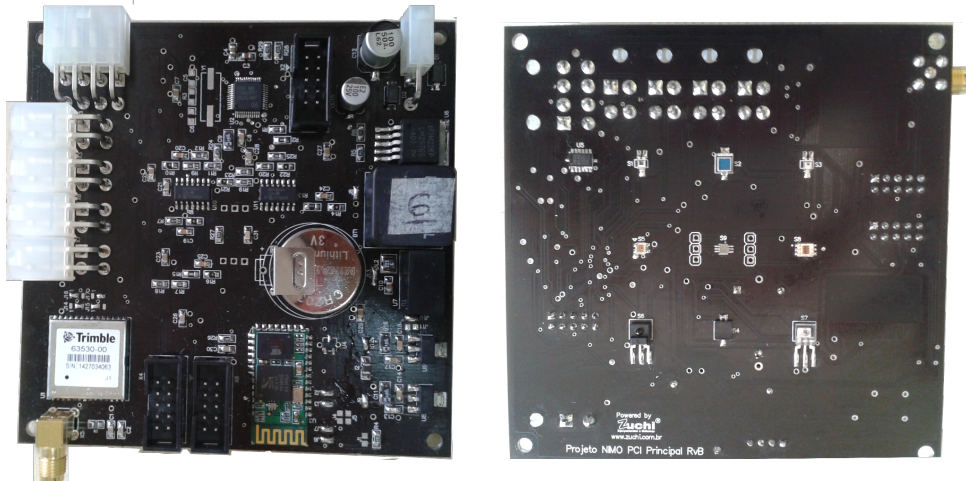


Figura 26 – Placa de aquisição de dados industrializada (fundo e topo)



Figura 27 – Visão geral do gabinete de aquisição de dados radiométricos

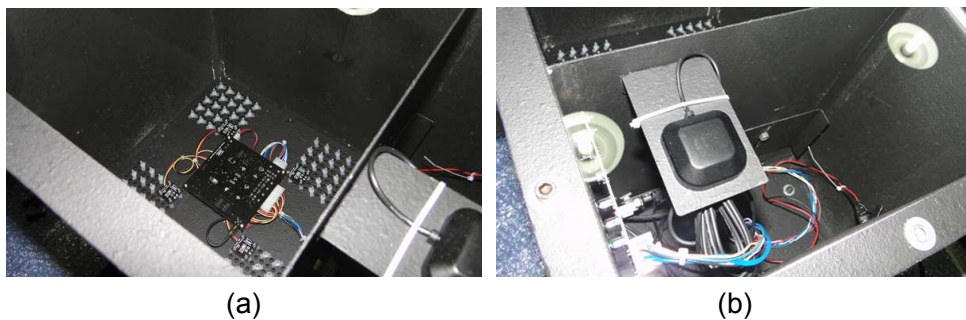


Figura 28 – Detalhamento do gabinete: (a) espaço para acomodação da placa; (b) espaço para acomodação da câmera

tipo lâmpada. Com isso, uma forma de se classificar a tecnologia de um tipo de lâmpada é por meio do seu espectro.

Além disso, sabe-se pela Lei de Lambert que a iluminância é diretamente proporcional à intensidade luminosa da fonte, que está fortemente associada à potência elétrica consumida pela lâmpada. Assim, para lâmpadas de um mesmo tipo e alturas semelhantes, pode-se afirmar que a iluminância (ou a irradiância, num caso mais geral) é um parâmetro

que permite inferir a potência consumida.

Esses dois fatos indicam que, com um processamento adequado, a resposta dos sensores radiométricos possui informação que permite a classificação do tipo e potência das lâmpadas de IP. Para garantir que essa informação seja suficiente para se efetuar a classificação desejada, uma escolha criteriosa dos sensores deve ser feita.

3.2.1 Escolha dos Sensores

Como todo dispositivo real, os sensores radiométricos não são capazes de medir de forma igualitária a radiação eletromagnética para todos os comprimentos de onda existentes. A resposta do sensor para cada comprimento de onda forma a denominada *curva de sensibilidade do sensor*. Assim, a resposta do sensor será determinada pela integral do produto entre essas duas curvas. No entanto, essa limitação dos sensores é benéfica para esta aplicação, pois assim o sensor acaba agindo como um filtro, priorizando a radiação de determinadas faixas do espectro.

Como já visto, o espectro radiante da lâmpada é determinado pela potência da mesma (que determinará a amplitude da curva espectral) e pelo tipo de tecnologia empregada (que vai influenciar na forma da curva).

Na Figura 29, pode-se observar uma comparação das curvas espectrais referentes às lâmpadas HPS, HPMV e HPMH. Essa Figura contém as curvas das Figuras 15, 18 e 21 reunidas para facilitar a comparação. Pode-se perceber, por exemplo, que as lâmpadas de mercúrio apresentam um pico de resposta espectral na região do violeta que as diferenciam em relação às demais tecnologias aqui em estudo. Já as lâmpadas de sódio praticamente não emitem nessa faixa do espectro. Imaginando a utilização de um hipotético sensor radiométrico que é capaz de medir radiações com comprimentos de onda na faixa do violeta, será possível distinguir facilmente as três tecnologias empregadas: HPMV, para os maiores valores de medida, HPMH, para níveis intermediários, e HPS, para os valores próximos de zero. A Figura 30 ilustra esse exemplo.

Concluindo, na escolha dos sensores radiométricos deve-se obter um conjunto de curvas de sensibilidade que abrangem regiões distintas do espectro, aumentando a quantidade de informação existente para efetuar-se as classificações de tipo e potência.

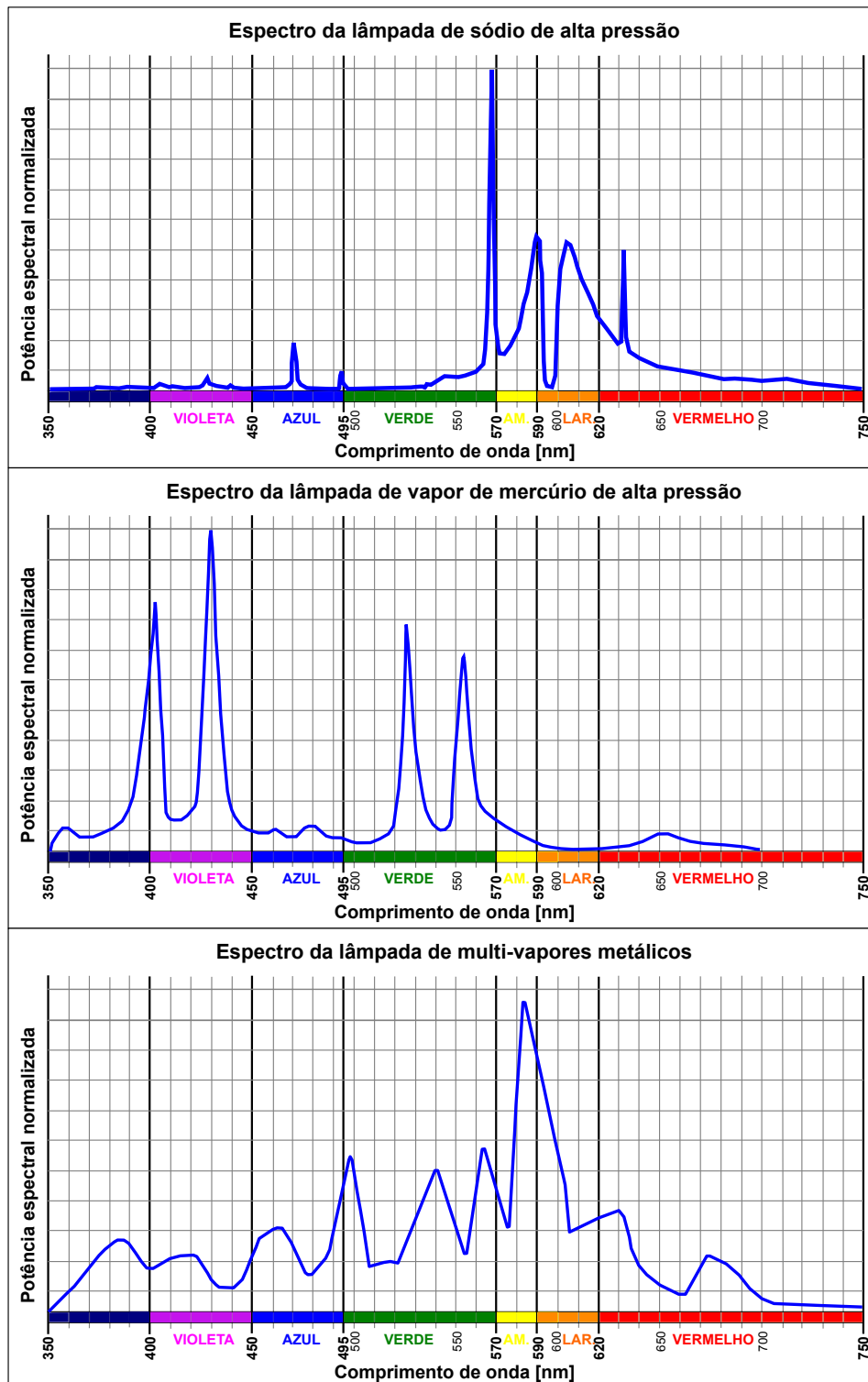


Figura 29 – Comparação das curvas espectrais das lâmpadas de sódio, mercúrio e multivapores metálicos [28] [29] [30]

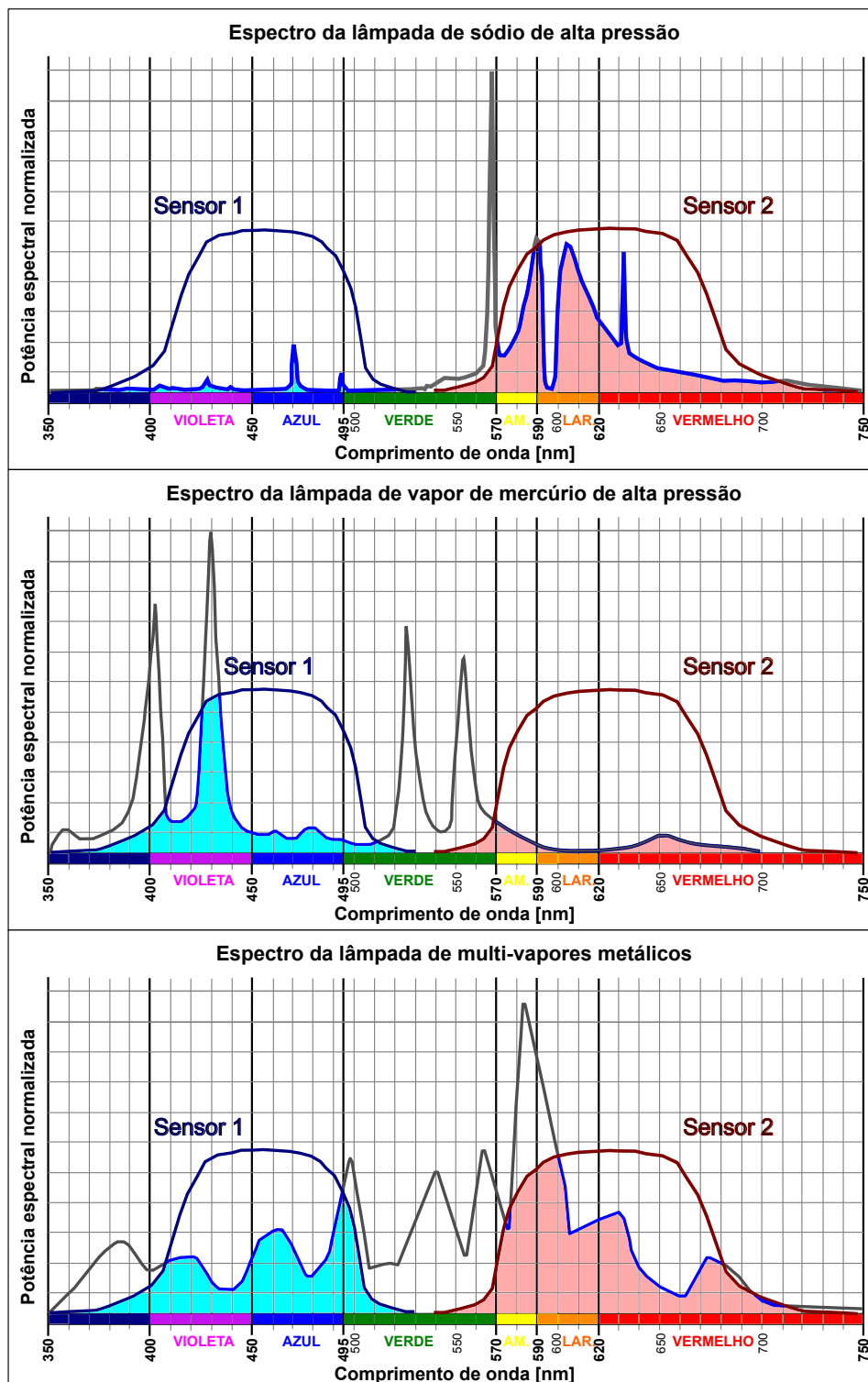


Figura 30 – Comparação das curvas de resposta de um sensor radiométrico hipotético para as lâmpadas de sódio, mercúrio e multivapores metálicos. A resposta final do sensor é proporcional à área sob a curva de sensibilidade espectral (azul)

3.2.2 Sensores Escolhidos

Nesta seção serão descritos cada um dos sensores escolhidos, apresentando suas curvas de resposta e, quando for o caso, os seus circuitos de condicionamento. As informações desta seção são provenientes dos *datasheets* de cada um dos sensores.

3.2.2.1 BP104FAS

O sensor analógico BP104FAS [32] é um fotodiodo fabricado pela OSRAM Opto Semiconductors GmbH. Suas aplicações originais são como fofointerruptor e como sensor de IR para controle remoto de dispositivos como televisores e aparelhos de som.

Este fotodiodo está operando no modo fotovoltaico [33]. Nesse modo, o diodo trabalha não polarizado, fluindo por ele uma corrente reversa proporcional ao fluxo luminoso incidente. Esse modo apresenta como características alta linearidade e baixo ruído térmico, sendo adequando para aplicações de alta precisão. A corrente gerada é convertida em tensão por um amplificador de transimpedância, conforme mostrado na Figura 31. Já na Figura 32, é mostrada sua curva de sensibilidade espectral, onde se observa que sua resposta é concentrada na região IR, acima dos 750 nm.

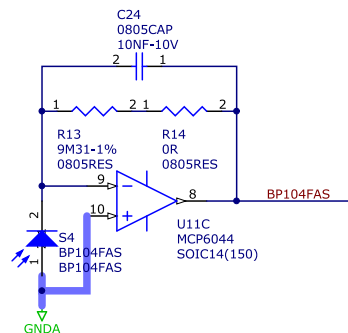


Figura 31 – Circuito de condicionamento para o sensor BP104FAS

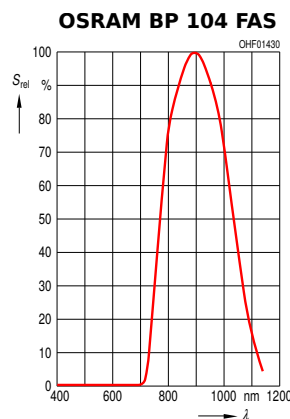


Figura 32 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor BP104FAS

3.2.2.2 SFH2430

O sensor analógico SFH2430 [34] também é um fotodiodo fabricado pela OSRAM. Ele apresenta alta linearidade e sua sensibilidade espectral é caracterizada pela semelhança com a resposta do olho humano (V_λ) e por sua pouca variação com a temperatura. Ele é aplicado sobretudo como sensor de luz ambiente usado em telefones celulares, sensores de chuva e ar condicionado.

Na Figura 33, é mostrada sua curva de sensibilidade espectral, enquanto que a Figura 34 apresenta o circuito de condicionamento do sinal, de funcionamento idêntico ao circuito do sensor BP104FAS.

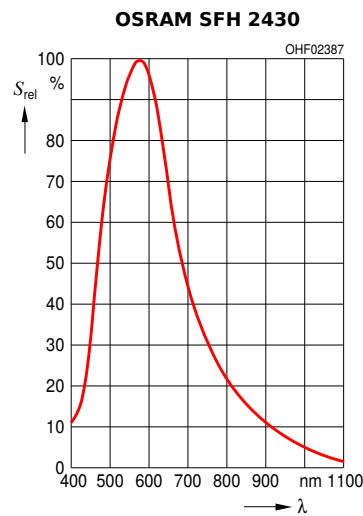


Figura 33 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH2430

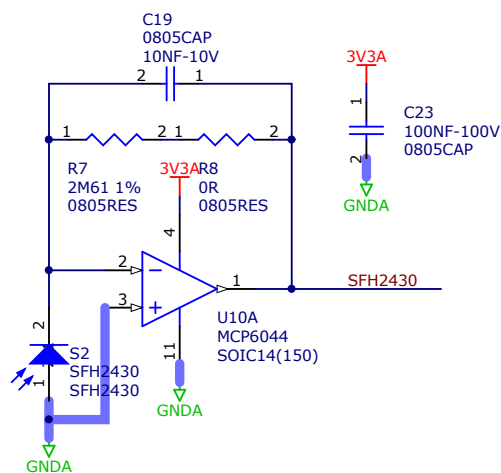


Figura 34 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH2430

3.2.2.3 SFH3400

O sensor SFH3400 [35] é um fototransistor fabricado pela OSRAM. Ele possui alta linearidade e sensibilidade em uma faixa larga do espectro, sobretudo na região do IR. Suas principais aplicações são em fotointerruptores, em controle e acionamento de circuitos e em detecção de luz ambiente.

O fototransistor apresenta como característica o fluxo de corrente pelo emissor proporcional à luz incidente [33]. O circuito de condicionamento do sinal do sensor (Figura 35) aplica o fototransistor na configuração de coletor comum, em que a corrente do emissor flui para o terra através de um resistor, gerando sobre este uma tensão de saída, que é amplificada por um amplificador na configuração não inversora.

Por fim, na Figura 36, é mostrada sua curva de sensibilidade espectral do SFH3400.

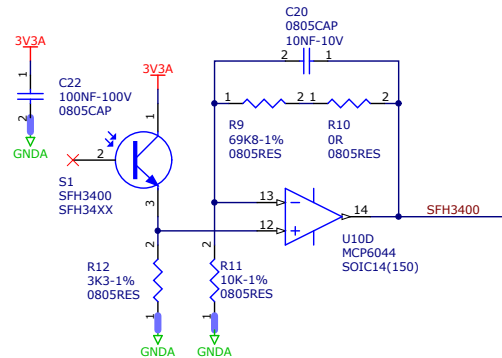


Figura 35 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH3400

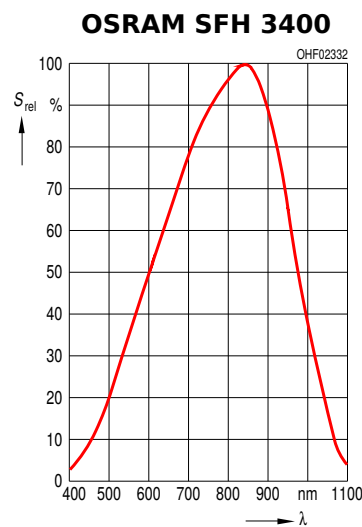


Figura 36 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH3400

3.2.2.4 SFH3410

O SFH3410 é mais um fototransistor da OSRAM. As principais aplicações do SFH3410 [36] são em controle e acionamento de circuitos, medidor de exposição de luz artificial e natural, para dimerização de telas LCD e para detecção de luz ambiente.

Na Figura 37 é mostrada sua curva de sensibilidade espectral, enquanto que a Figura 38 apresenta o circuito de condicionamento do sinal com funcionamento idêntico ao do sensor anterior.

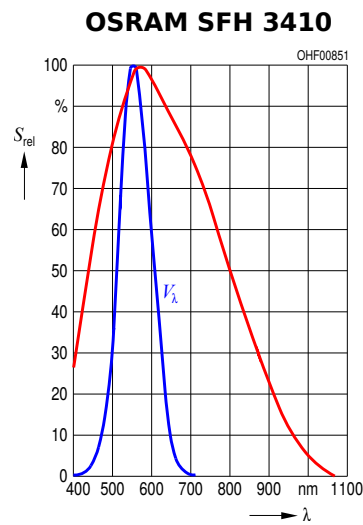


Figura 37 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH3410

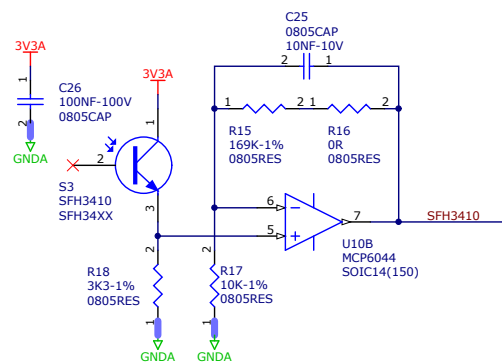


Figura 38 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH3410

3.2.2.5 SFH5711

O SFH5711 da OSRAM é um sensor analógico de luz ambiente com saída logarítmica em corrente. Ele possui sensibilidade espectral igual à do olho humano (V_λ), que pouco varia com a temperatura. Além disso, apresenta alta exatidão em uma ampla faixa de iluminância. É usado em aplicação automotivas, como sensor de luz solar para controle de lâmpadas, controle da iluminação de telas LCD e em dispositivos móveis.

Na Figura 39 é mostrada a curva de sensibilidade espectral do SFH5711, enquanto que a Figura 40 apresenta o circuito de condicionamento do sinal, em que a corrente de saída do sensor flui para o terra por meio de um resistor, gerando uma tensão que é amplificada por um amplificador na configuração não inversora.

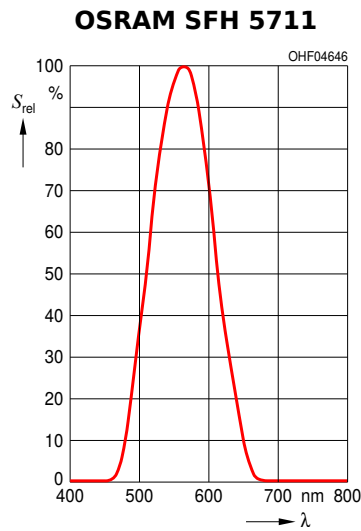


Figura 39 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor SFH5711

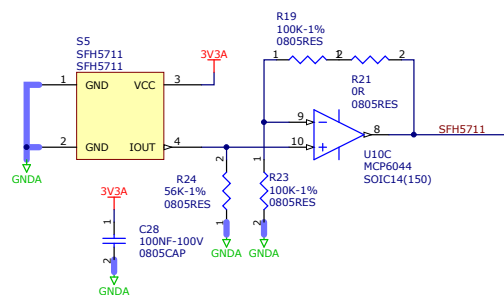


Figura 40 – Circuito de condicionamento para o sensor SFH5711

3.2.2.6 TSL13S

O TSL13S [37] é um sensor de luz analógico com saída em tensão fabricado pela AMS, antiga TAOS. Este sensor é formado por um fotodiodo e um amplificador de transimpedância, tudo integrado em um único circuito.

Na Figura 41 é mostrada sua curva de sensibilidade espectral, enquanto que a Figura 42 apresenta o circuito de condicionamento de sinal, que consiste simplesmente em um *buffer*.

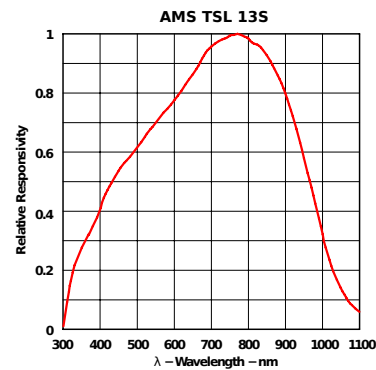


Figura 41 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TSL13S

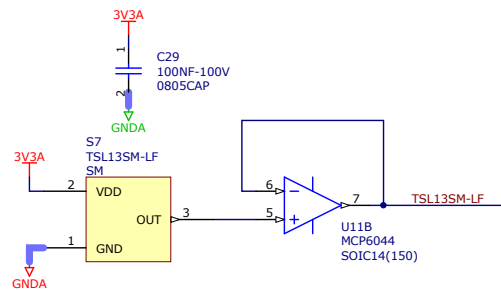


Figura 42 – Circuito de condicionamento para o sensor TSL13S

3.2.2.7 TSL261R

O sensor de infravermelho analógico TSL261R [38], também fabricado pela AMS, possui estrutura interna semelhante ao TSL13S, igualmente com saída em tensão, mas com sensibilidade espectral deslocada para o infravermelho

Na Figura 43, é mostrada sua curva de sensibilidade espectral, enquanto que a Figura 44 apresenta o circuito de condicionamento do sinal, formado por um amplificador não inversor.

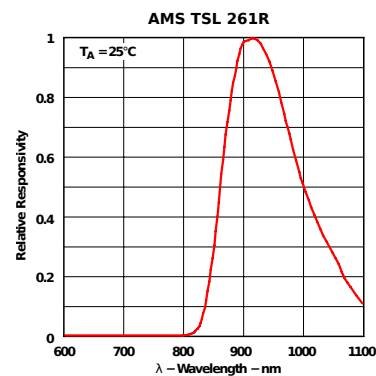


Figura 43 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TSL261R

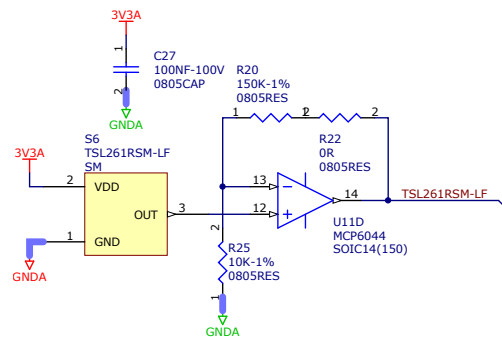


Figura 44 – Circuito de condicionamento para o sensor TSL261R

3.2.2.8 TSL2569T

O AMS TSL2569T [39] é um sensor luminoso digital de alta sensibilidade com interface de comunicação I^2C . Ele é composto de dois canais de medição. O primeiro canal apresenta um fotodiodo sensível a uma larga faixa do espectro (luz + IR), enquanto que o segundo canal possui um fotodiodo sensível apenas ao IR. Assim, este sensor apresenta uma resposta próxima à fotópica, com uma resolução de dados de 16 bits.

As saídas digitais do sensor, obtidas pela conversão da corrente de saída dos fotodiodos, é proporcional à irradiância incidente nos fotodiodos. Com isso, por meio de uma fórmula empírica é possível estimar a iluminância do ambiente.

A principal aplicação deste sensor é no controle de luminosidade de telas LCD. Na Figura 45, é mostrado o diagrama de funcionamento do sensor, enquanto que a Figura 46 apresenta sua curva de sensibilidade espectral.

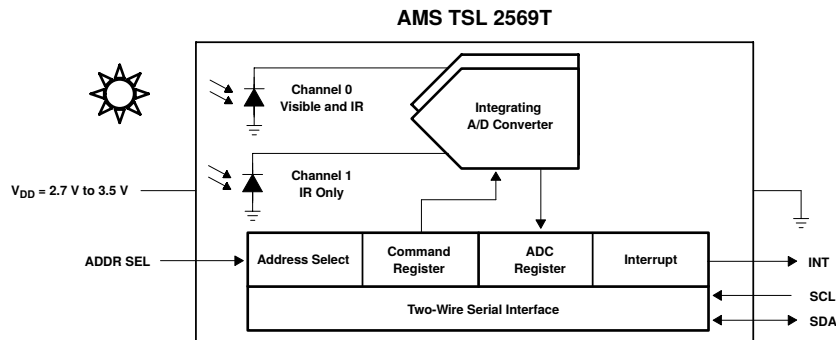


Figura 45 – Diagrama de funcionamento do sensor TSL2569T

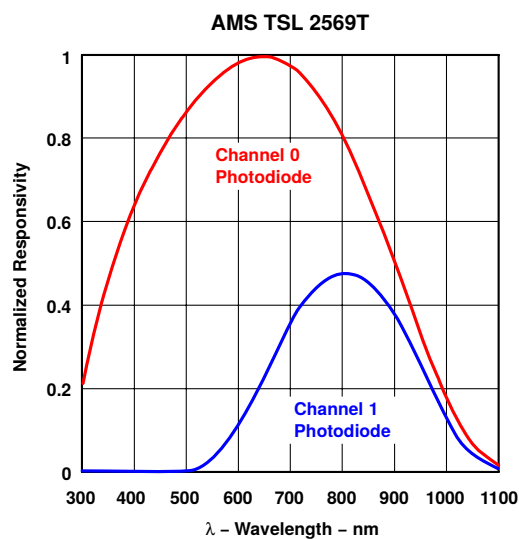


Figura 46 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TSL2569T

3.2.2.9 TCS3414

O sensor AMS TCS3414 [40] é o que apresenta maiores recursos dentre os escolhidos para este projeto. Ele possui 4 canais digitais: 3 canais para cada uma das cores primárias (vermelho, verde e azul), além de um quarto canal sem filtro, captando toda a faixa do espectro visível. Ele possui 16 bits de resolução e interface de comunicação I²C, tornando-o ideal para a utilização com microcontrolador. Com essas informações, ele permite não só estimar a iluminância, como também as coordenadas cromáticas e a temperatura de cor.

Este sensor é aplicado principalmente em televisores digitais, notebooks, equipamentos móveis, instrumentação médica e no controle de processos industriais. Na Figura 47, é mostrado o diagrama de funcionamento do sensor, enquanto que a Figura 48 apresenta sua curva de sensibilidade espectral.

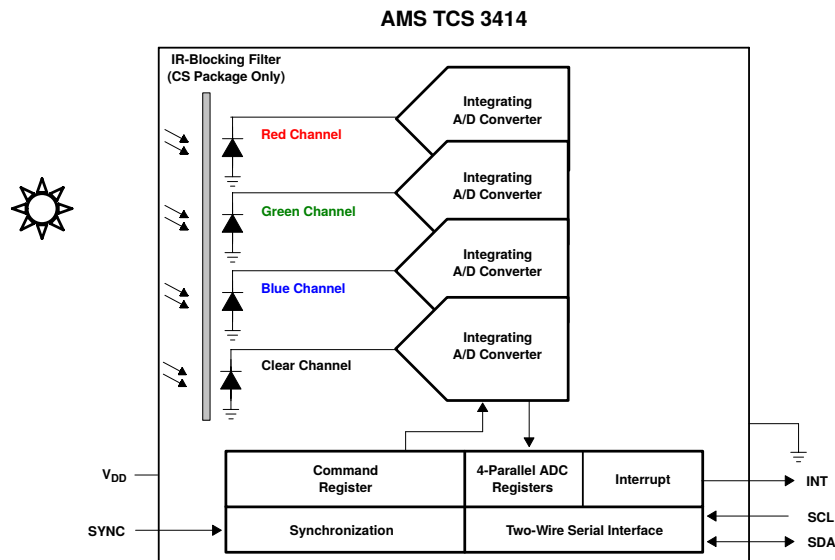


Figura 47 – Diagrama de funcionamento do sensor TCS3414

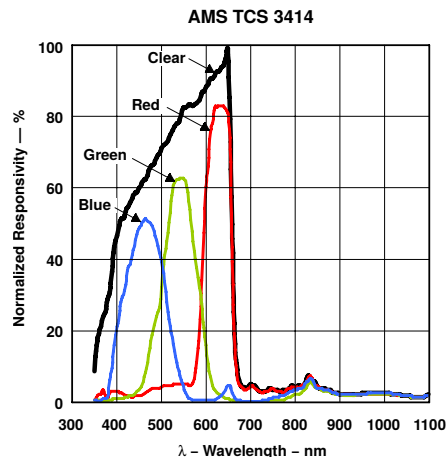


Figura 48 – Curva de sensibilidade espectral relativa do sensor TCS3414

Por meio dos três canais de cores deste sensor é possível calcular a iluminância, as coordenadas cromáticas e a temperatura de cor correlata (CCT - Correlated Color Temperature) [41]. Para isso, é necessário antes a conversão dos dados *RGB* para o espaço de cores *XYZ* definido pela CIE. A Figura 49 apresenta um resumo desse processo.

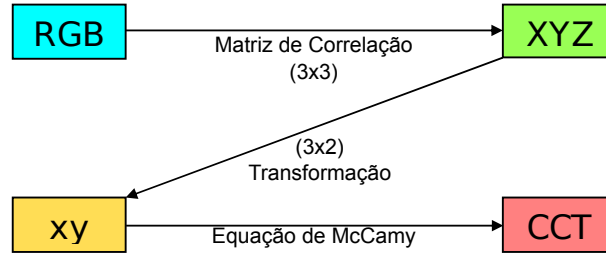


Figura 49 – Resumo do procedimento de cálculo da temperatura de cor correlata (CCT) [41]

Como visto, o primeiro passo é o cálculo das componentes *XYZ*. Isso é necessário para considerar a discrepância entre a resposta espectral do sensor TCS 3414 e as curvas definidas pela CIE. A Figura 50 ilustra essa diferença. A correlação entre os diferentes espaços de cores é mostrada na equação 3.1. A componente *Y* representa a informação de iluminância, em *lux* (lx).

$$\text{Iluminância} \longrightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,14282 & 1,54924 & -0,95641 \\ -0,32466 & 1,57837 & -0,73191 \\ -0,68202 & 0,77073 & 0,56332 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

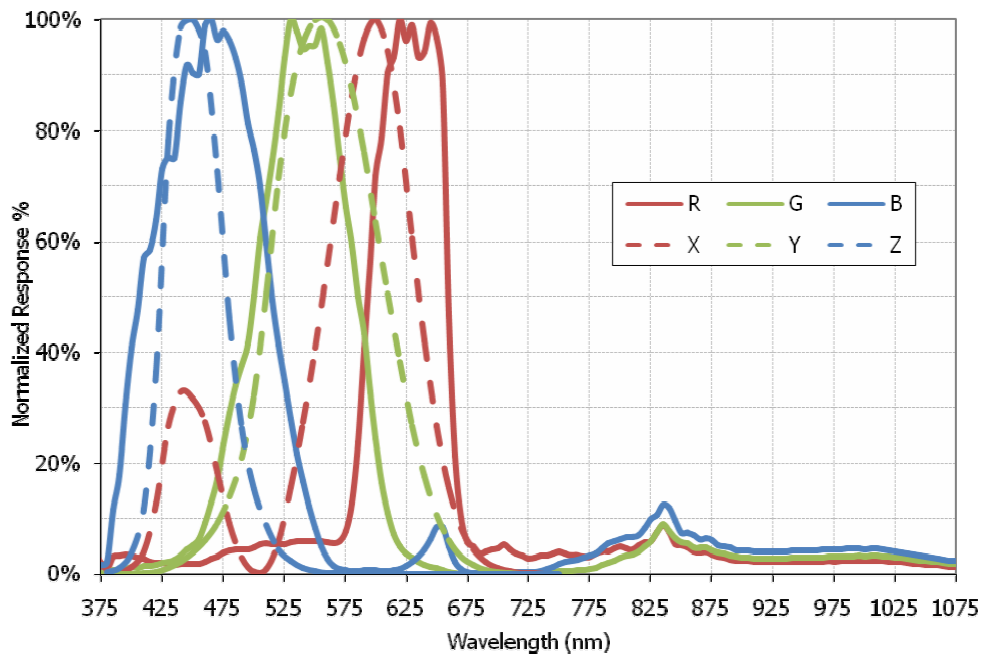


Figura 50 – Diferença entre as curvas de resposta espectral do sensor TCS 3414 e as curvas relativas ao espaço de cores XYZ [41]

Uma vez obtidas as componentes XYZ , pode-se calcular as coordenadas cromáticas xy por meio das equações 3.2 e 3.3.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.2)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.3)$$

A partir dessas coordenadas, obtêm-se a temperatura de cor aplicado a equação de McCamy (eq. 3.4).

$$\text{CCT} = 449n^3 + 3525n^2 + 6823,3n + 5520,33 \quad (3.4)$$

onde

$$n = (x - 0,3320)/(0,1858 - y)$$

3.3 Posicionamento

Os sensores de posicionamento são responsáveis por identificar a posição relativa entre a placa e a fonte de luz. Possuem o objetivo de orientar a correta alocação da placa de sensores em respeito à fonte de luz sob teste, evitando sombreamentos ou afastamento da região isolux principal (região cujo fluxo luminoso é aproximadamente constante). Eles são baseados no componente OP500DA, sendo alocados nas extremidades da placa de circuito.

O princípio de detecção se baseia na exposição dos elementos à radiação luminosa na dependência do posicionamento relativo do gabinete em relação à fonte de luz. A Figura 51 ilustra esta situação.

De acordo com a Figura 51, para que os sensores sejam devidamente excitados, o recipiente contendo a placa de aquisição de dados não deve se afastar muito da linha perpendicular (normal) à luminária, sob risco de afastamento da região isolux principal. Os sensores são, ainda, ajustados para uma determinada sensibilidade, de modo a orientar o posicionamento em condições adequadas para registro dos dados. Uma análise trigonométrica simplificada pode mostrar que a distância máxima do centro da luminária não deve ser superior a $H/20$, sendo H a altura de montagem da lâmpada. Porém, com o recurso de se modificar a sensibilidade dos elementos, é possível reduzir ou ampliar a distância mínima de acordo com as necessidades do equipamento.

$$I_X = \arctan\left(\frac{a_X}{a_Z}\right) \quad (3.5)$$

$$I_Y = \arctan\left(\frac{a_Y}{a_Z}\right) \quad (3.6)$$

$$I_Z = \arctan\left(\frac{\sqrt{a_X^2 + a_Y^2}}{a_Z}\right) \quad (3.7)$$

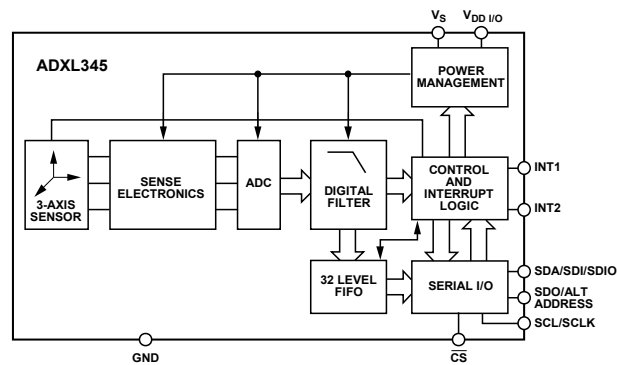


Figura 52 – Diagrama de blocos do sensor ADXL345 [42]

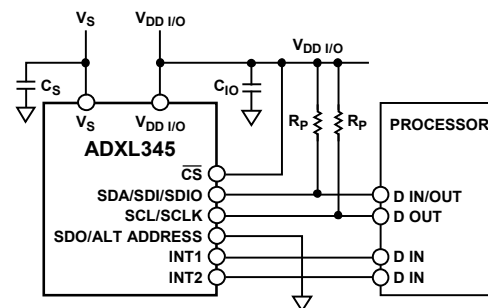


Figura 53 – Diagrama de conexão recomendado – comunicação I²C [43]

3.5 Núcleo de Processamento e Comunicação

O núcleo de processamento é responsável por controlar todos os outros módulos do sistema de aquisição de dados radiométricos. Através dele são realizadas as leituras dos diversos sensores, pré-processamento de alguns dados, comunicação com o computador, leitura dos dados do acelerômetro e roteamento dos pacotes provenientes do GPS.

O principal componente deste submódulo é o microcontrolador da família C2000® da Texas Instruments, o Piccolo TMS320F28027 [44]. Este dispositivo é o responsável por se comunicar com os outros componentes do protótipo.

A comunicação com o computador é feita através de um módulo Bluetooth ZT-05 que é controlado também pelo microcontrolador.

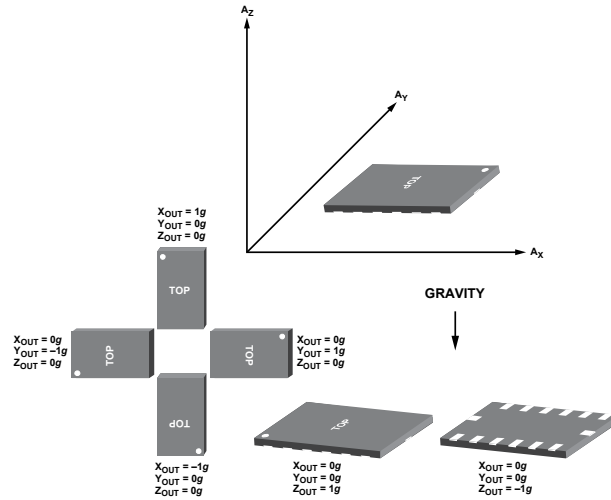


Figura 54 – Resposta do sensor em relação à orientação da gravidade [42]

No produto final, o dispositivo escolhido para coletar informações sobre posicionamento geográfico foi o GPS Trimble Copernicus II. Como foi dito anteriormente, o microcontrolador Piccolo será o responsável por rotear os pacotes de dados provenientes do GPS para o *software* de aquisição.

Por motivo de limitações de recursos, não será possível a utilização de um sistema de nivelamento/posicionamento no sistema de aquisição de dados radiométricos. Sabe-se, porém, que existe uma grande heterogeneidade nas vias públicas com relação ao declive e acrive destas. Esta característica pode vir a ser um fator que influencie na identificação da potência e tecnologias das lâmpadas de iluminação pública. Por isso, um acelerômetro foi instalado na placa de aquisição de dados a fim de oferecer uma referência de inclinação da via para o algoritmo de inteligência computacional. Foi escolhido um acelerômetro de três eixos para esta tarefa e este possui interface de comunicação I²C, o que facilita a integração com o sistema existente, uma vez que existe a necessidade de um barramento de comunicação com este protocolo para interfaceamento com os sensores digitais. O modelo do acelerômetro escolhido foi o ADXL345.

3.6 Firmware

O *firmware* foi desenvolvido na linguagem de programação C utilizando o ambiente de desenvolvimento Code Composer 3.3, também da Texas Instrument.

3.6.1 Estrutura

O projeto do *firmware* foi dividido em 5 camadas lógicas de abstração, cada uma com domínio bem definido, conforme mostrado na Figura 55. As funções de cada camada são:

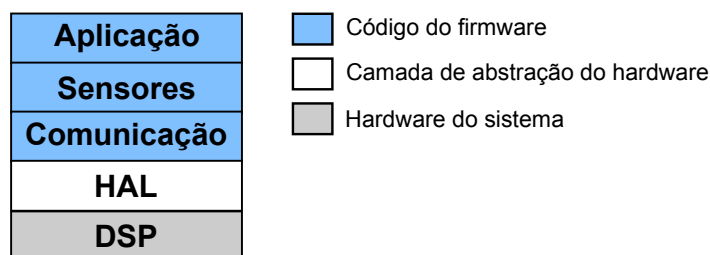


Figura 55 – Camadas lógicas do projeto do firmware

- *DSP*: Camada do microcontrolador. Representa o hardware do sistema.
- *HAL*: Camada de abstração de hardware (*Hardware Abstract Layer*). Composta por uma biblioteca de baixo nível fornecida pela Texas para manipulação dos diversos periféricos do microcontrolador.
- *Comunicação*: Composta das rotinas de alto nível que implementam os protocolos de comunicação SCI e I²C utilizados no projeto. O protocolo SCI é utilizado para a comunicação com o GPS e com o módulo *bluetooth* para conexão o sistema de aquisição de dados, enquanto que o I²C é utilizado na comunicação com os sensores digitais e o acelerômetro.
- *Sensores*: Biblioteca de alto nível para configuração e leitura dos dados dos diversos sensores do sistema, do acelerômetro e do GPS.
- *Aplicação*: Implementa o algoritmo principal do *firmware*.

3.6.2 Funcionamento

Será feito agora uma breve descrição do funcionamento do algoritmo do *firmware*, que está ilustrado no fluxograma da Figura 56.

Ao começar sua execução, o *firmware* executa a seção de inicialização, onde são iniciados os registradores do microcontrolador, seus periféricos e os diversos sensores. Além de habilitada a interrupção do GPS, que é disparada quando o GPS está pronto para enviar novos dados.

Feito isso, o sistema fica aguardando comandos vindos do software de aquisição de dados. Caso ocorra uma interrupção do GPS antes da chegada do próximo comando, é feita uma mudança de configuração da porta seral SCI do *bluetooth* para o GPS. Isso deve ser feito pois essa porta é compartilhada como esses dois periféricos, que só podem ser utilizados um de cada vez. Lê-se então os dados do GPS e, em seguida, retorna-se a configuração da porta SCI para o *bluetooth*. Se chegar algum dado pelo *bluetooth* enquanto ocorre a leitura dos dados do GPS, esse dado é perdido.

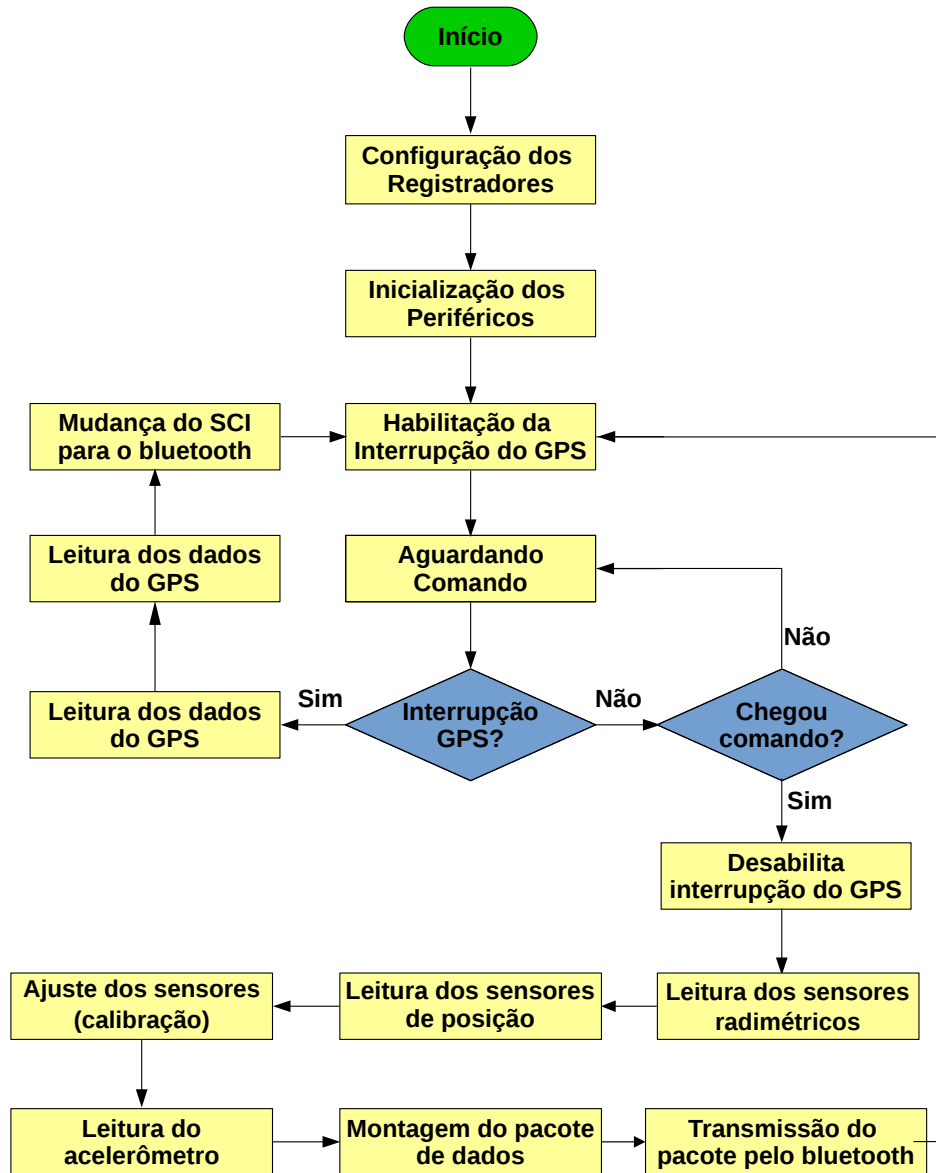


Figura 56 – Fluxograma de funcionamento do firmware

Se chegar algum comando antes do início da interrupção do GPS, essa interrupção é desabilitada, são lidos os dados dos diversos sensores e montado e enviado o pacote de transmissão de dados para o *software* de aquisição.

3.7 Software de Aquisição de Dados

Nesta seção será descrito o software de aquisição de dados, que se conecta à placa para leitura e armazenamento das medidas dos sensores para, posteriormente, serem processadas pelo sistema de classificação.

O sistema foi escrito em Pascal usando o ambiente de desenvolvimento aberto Lazarus, podendo ser gerados executáveis tanto para Microsoft Windows (XP ou superior) quanto para qualquer distribuição GNU/Linux. Além das bibliotecas padrão do Lazarus,

foi utilizada a biblioteca Synapse para efetuar a comunicação serial multiplataforma.

3.7.1 Estrutura

O sistema foi desenvolvido utilizando o padrão de projeto *Modelo-Visão-Controle* (MVC). De acordo com esse padrão, foi feita a separação entre a informação e regras de negócio (Modelo) e o controle e interação com o usuário (Controle e Visão). As ideias centrais por trás do MVC são a reusabilidade de código e separação de conceitos.

Na Figura 57 é mostrado o diagrama de classes simplificado do sistema. Ele reflete apenas o Modelo do sistema, que é o componente responsável efetivamente pelas funcionalidades do programa.

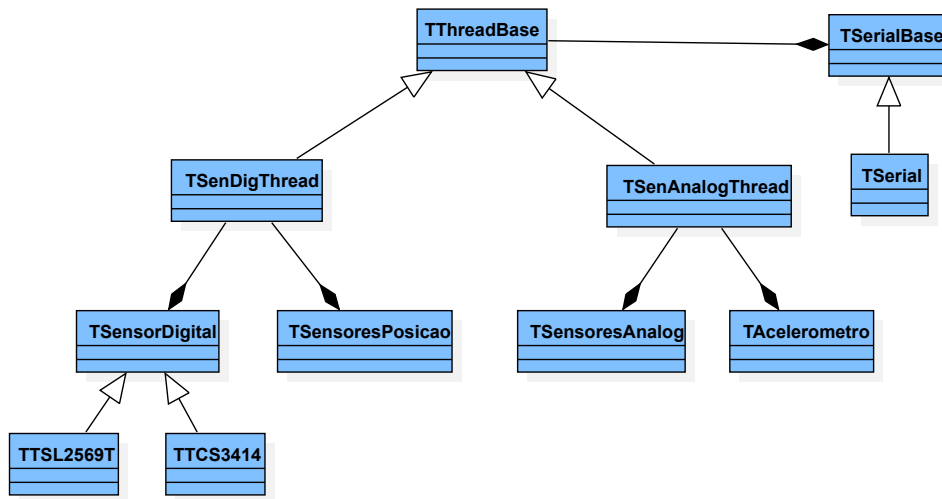


Figura 57 – Diagrama de classes simplificado do software de aquisição de dados

Inicialmente, tem-se a classe TSerialBase, que implementa a interface de acesso com os métodos e propriedades para manipulação da porta serial para comunicação *bluetooth*. Derivada dela tem-se a classe TSerial, que implementa de fato os métodos utilizando a biblioteca Synapse. A utilização da classe base permitiu o desacoplamento entre o programa e a biblioteca serial utilizada, permitindo a fácil substituição desta.

Em seguida, tem-se a classe TThreadBase, que implementa a thread de leitura dos sensores, lendo os dados que chegam da porta serial. Ela sofre duas especializações: TSenDigThread, que efetua a leitura no pacote recebido dados dos sensores digitais e de posição, e TSenAnalogThread, que cuida da leitura dos dados dos sensores analógicos e do acelerômetro.

Por fim, as classes dos sensores de aceleração, posição, radiométricos analógicos e digitais, sendo este último tipo sofrendo duas especializações, relativas aos sensores TSL2569T e TCS3414.

3.7.2 Funcionamento

Na Figura 58 é mostrada a tela do programa desenvolvido, enquanto que a Figura 59 apresenta seu fluxograma de funcionamento.

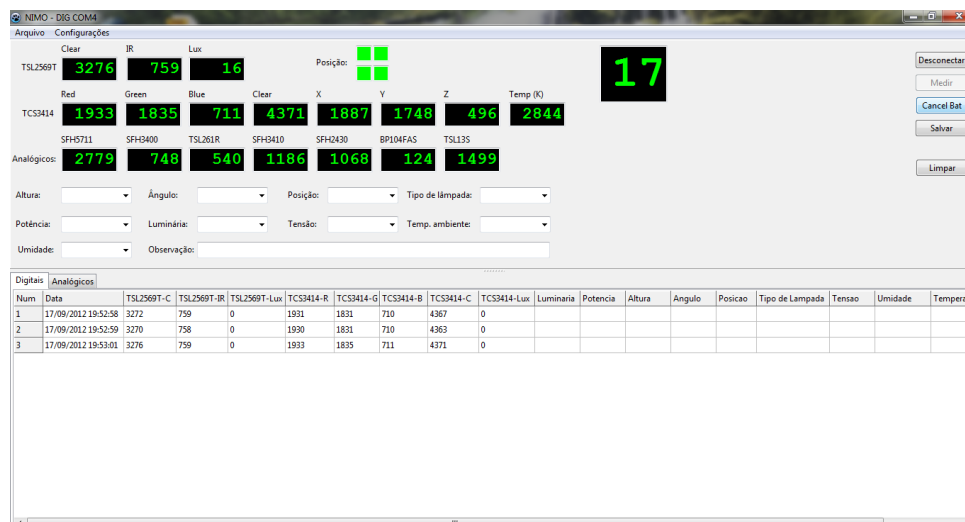


Figura 58 – Tela do programa de aquisição de dados

O programa se inicia aguardando a conexão com a placa de medição. Depois de encontrada a placa e a conexão estabelecida, o sistema fica aguardando um comando do usuário, que pode ser o de monitorar os sensores (botão Monitorar), o de efetuar uma medida (botão Medir) ou o de realizar um lote de medidas em batelada (botão Batch).

Na ação de monitoramento, o programa envia a solicitação dos dados de todos os sensores para a placa de medição. Em seguida, aguarda o recebimento dos dados solicitados. Finalmente, os dados de cada sensor são impressos na tela para visualização do usuário. Esse processo se repete até o usuário cancelar o monitoramento. Ao fazer isso, o programa volta a aguardar nova ação do usuário. Na ação de medição, o programa envia a solicitação dos dados para a placa e aguarda a resposta. Após recebida, imprime na tela e na planilha de dados as informações dos sensores. Em seguida, aguarda-se novamente uma nova ação do usuário. Esse procedimento pode ser executado em paralelo com a ação de monitoramento.

Já na ação de medição em batelada, o sistema executa uma série determinada de medições sequencialmente. O número de medições realizadas deve ser previamente configurado. Após a conclusão da série de medições, o programa volta para o estado de espera por comando do usuário.

Por último, a ação de armazenamento dos dados (botão Salvar), não ilustrada no fluxograma. Nela são salvos os dados da planilha de dados em um arquivo texto no formato CSV, permitindo assim o processamento posterior das informações.

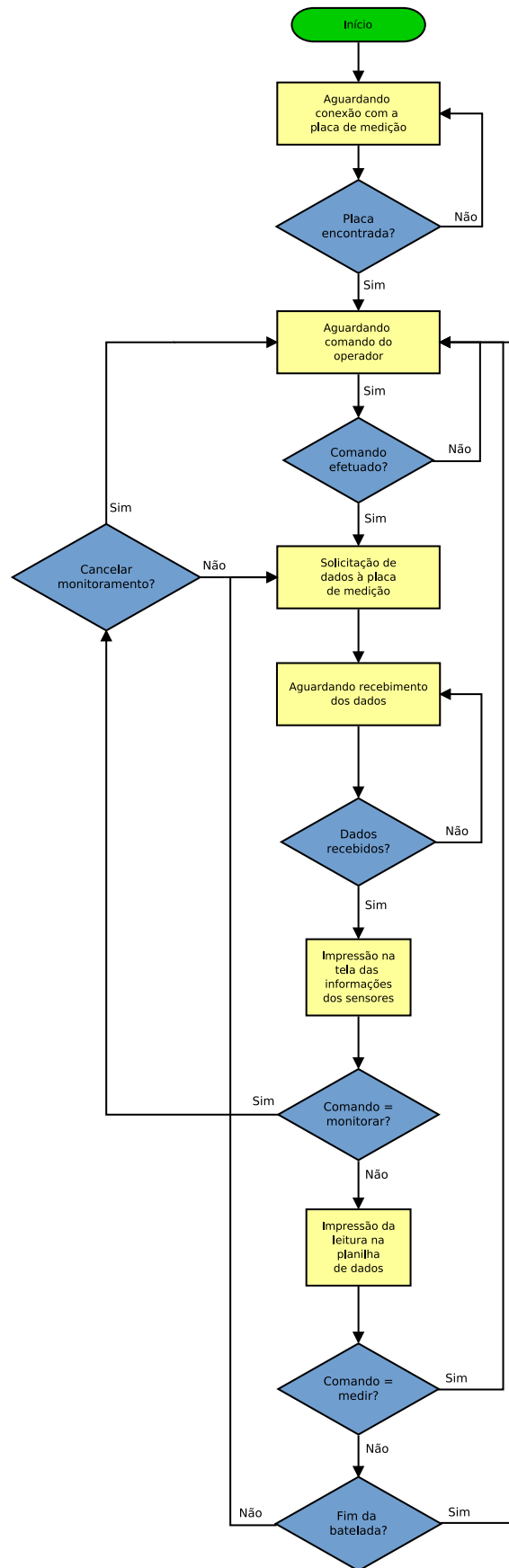


Figura 59 – Fluxograma de funcionamento do software de aquisição

3.8 Estrutura IP

Para promover os estudos e avaliar o desempenho do sistema proposto, foi construída uma estrutura de IP que emula um poste de IP. A Figura 60 mostra o projeto da estrutura.

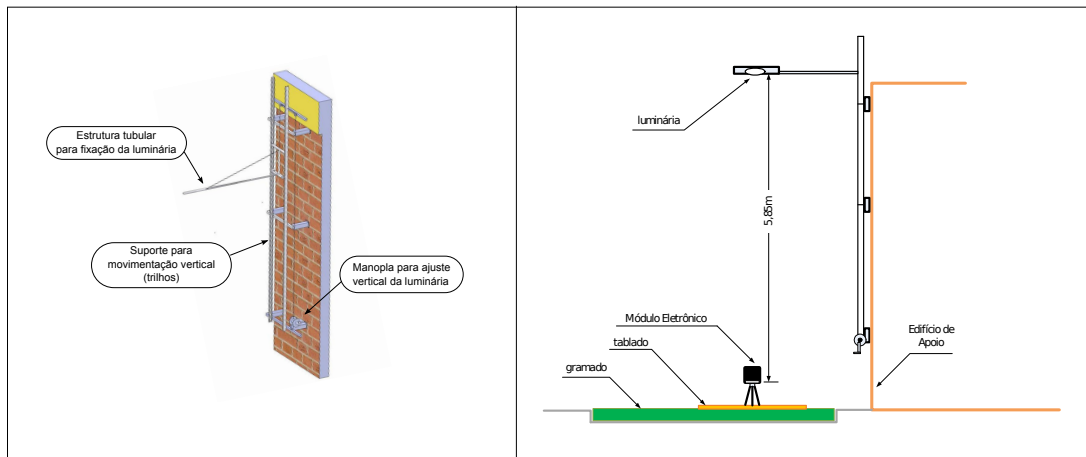


Figura 60 – Esquema da estrutura IP construída

A estrutura é composta por trilhos apoiados nas paredes do galpão do almoxarifado da Escola de Engenharia da UFJF, ao lado do NIMO. Montado nesses trilhos está um suporte para estrutura tubular de fixação da luminária. Esse suporte está preso a cabos de aço que, por meio de um sistema de roldanas presas no alto do galpão, permite a regulagem da altura da estrutura por meio de uma manivela. Além da regulagem de altura, é possível regular também a inclinação da estrutura tubular, podendo mudar assim a inclinação da luminária. Nas Figura 61 e 62 são mostradas imagens da estrutura construída.



Figura 61 – Fluxograma de funcionamento do software de aquisição

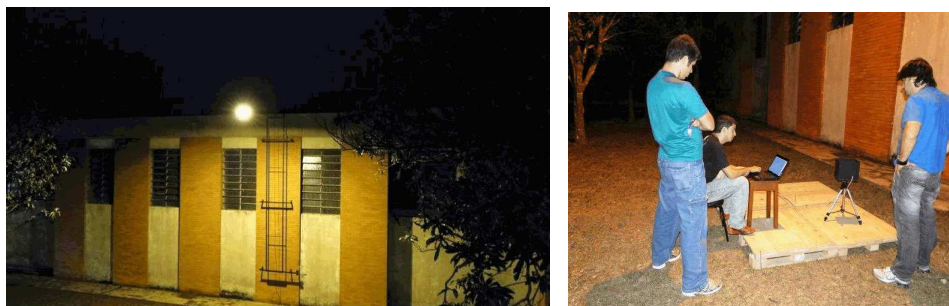


Figura 62 – Fluxograma de funcionamento do software de aquisição

3.9 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentado o sistema de coleta de dados radiométricos para a identificação das lâmpadas de IP.

Iniciou-se com a discussão a respeito do emprego dos sensores radiométricos: a justificativa para a escolha desse tipo de sensor, o que levar em consideração ao se escolher os sensores e, principalmente, foram apresentados os sensores escolhidos, com suas principais características. Além disso, foi mostrado também o método de posicionamento para garantir a medição na região isolux sob a luminária.

Na sequência, foi apresentado o sistema de medição desenvolvido. Começou-se com a descrição do hardware responsável pelo processamento e comunicação. Em seguida, foram apresentados o *firmware* de controle do *hardware* e o *software* de aquisição de dados.

Finalizando, foi vista a estrutura IP construída para a pesquisa e avaliação do desempenho do sistema em estudo.

Após a construção do equipamento apresentado para a medição dos dados radiométricos, o desafio passa a ser a reprodução desse equipamento de medição. Esse será o assunto do capítulo 4.

4 SISTEMA DE CALIBRAÇÃO E AJUSTE

No capítulo 3, foi vista a importância de se obter a reprodutibilidade das medições, permitindo uma maior confiabilidade para o processamento das informações e a classificação dos pontos de IP. A partir da lei de Lambert, concluiu-se que o posicionamento exerce grande influência no processo de medição. Para minimizar esse efeito, foi desenvolvida uma metodologia de posicionamento do equipamento a partir das informações fornecidas por sensores de posição. No entanto, isso não é suficiente para assegurar a reprodutibilidade das medições. É necessário garantir que todos os equipamentos de medição apresentem os mesmos resultados quando expostos a uma mesma fonte luminosa. Essa garantia é obtida por meio do processo de calibração, assunto deste capítulo.

Inicialmente será feita uma introdução teórica do procedimento de calibração de forma geral. Em seguida, será descrita a metodologia de calibração a ser adotada para o sistema de medição radiométrico proposto, incluindo o iluminador de referência projetado para esse fim e o *software* de calibração. Por fim, serão discutidos alguns problemas enfrentados e apresentados os resultados de calibração.

4.1 Calibração

Sistemas de medição sempre apresentam erros. Esses erros podem ser originados internamente, a partir de pequenas diferenças dos elementos do instrumento de medida, ou serem decorrentes da ação de várias grandezas de influência externa. A plena caracterização desses erros, apresentados nas condições em que o sistema de medição é utilizado, é uma condição necessária para que os resultados obtidos sejam mais confiáveis. Para verificar de maneira efetiva como os valores indicados pelo sistema de medição se relacionam com os valores da grandeza a ser medida, é utilizado o procedimento experimental denominado *calibração*.

A calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões [45]. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), em seu Vocabulário Internacional de Metrologia [31], define calibração como:

Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, 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 à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

A calibração não está restrita aos sistemas de medição, sendo também utilizada

na definição do valor efetivo de medidas materializadas (como massa-padrão ou resistor-padrão) e em materiais de referência [45]. Como esses valores dependem das condições de uso, é necessário especificar de forma clara as condições em que a calibração é efetuada. Por isso, ela é normalmente realizada em laboratório, no qual as condições de referência são estabelecidas [46].

O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas. Essa aplicação é denominada *ajuste*, que é definido como o “conjunto de operações efetuadas em um sistema de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados valores de uma grandeza a ser medida” [31]. Com isso, a calibração é um pré-requisito para realizar o ajuste do sistema de medição [46].

Os valores de referência da calibração são estabelecidos por padrões. *Padrão* é a realização da definição de uma dada grandeza, com um valor determinado, utilizada como referência [31]. Segundo Albertazzi [45]:

Padrão é 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.

Os tipos de padrões e a maneira de empregá-los determinam alguns diferentes métodos de calibração apresentados a seguir.

4.1.1 Calibração Direta

Na calibração direta de um sistema de medição, o padrão utilizado é composto por uma ou um conjunto de medidas materializadas. É diretamente aplicado sobre o sistema de medição a calibrar (SMC) [45]. A Figura 63 representa, esquematicamente, as relações nesse tipo de calibração. O valor de referência do padrão (valor verdadeiro convencional - VVC) é comparado com a indicação do SMC. A calibração da balança da Figura 64 usando massas-padrão é um exemplo de calibração direta.

É necessário dispor de uma coleção de padrões suficientemente completa para cobrir toda faixa de medição do instrumento. Um conjunto de padrões de valores escolhidos que, individualmente ou combinados, formam uma série de valores de grandezas de uma mesma natureza é denominado *coleção-padrão* [46].

Medidas materializadas também podem ser calibradas pelo método direto [47]. É necessário dispor de padrões formados por outras medidas materializadas com incertezas melhores que a medida materializada a calibrar. A calibração normalmente é feita usando um comparador que, pelo método diferencial, determina quanto a medida materializada calibrada difere da de referência, determinando assim a correção a ser efetuada.

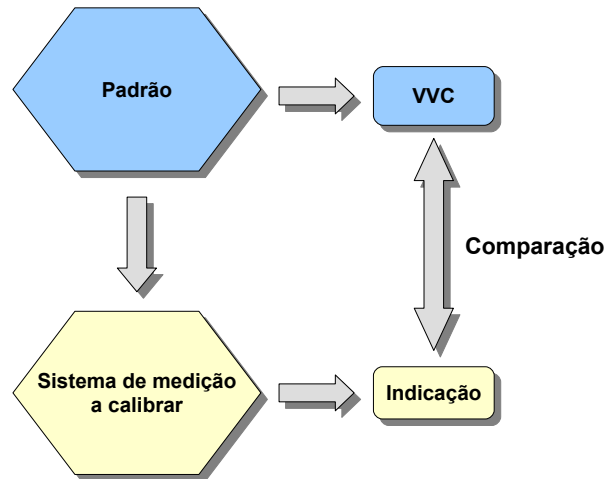


Figura 63 – Calibração direta de um sistema de medição

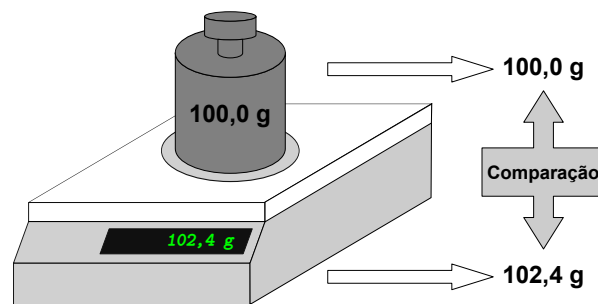


Figura 64 – Exemplo de calibração direta de uma balança usando massas-padrão

4.1.2 Calibração Indireta

Para certas grandezas, não existem medidas materializadas. Para outras, não seria prático utilizá-las. Nesses casos em que o método de calibração direta é inviável ou inconveniente utiliza-se o método de calibração indireta.

A Figura 65 ilustra o esquema de calibração indireta. A grandeza a medir é gerada por meio de um dispositivo auxiliar. O valor gerado da grandeza não precisa ser bem conhecido, mas deve ser estável. A medição da grandeza é feita usando o SMC e, simultaneamente, por outro sistema de medição usado como referência: o sistema de medição padrão (SMP). As indicações e ambos os sistemas são então comparadas. As incertezas do SMP devem ser pelo menos dez vezes menores que o SMC, de tal forma que as diferenças encontradas entre as indicações possam ser atribuídas aos erros do SMC. A Figura 66 apresenta um exemplo de calibração do velocímetro de um automóvel pelo método indireto.

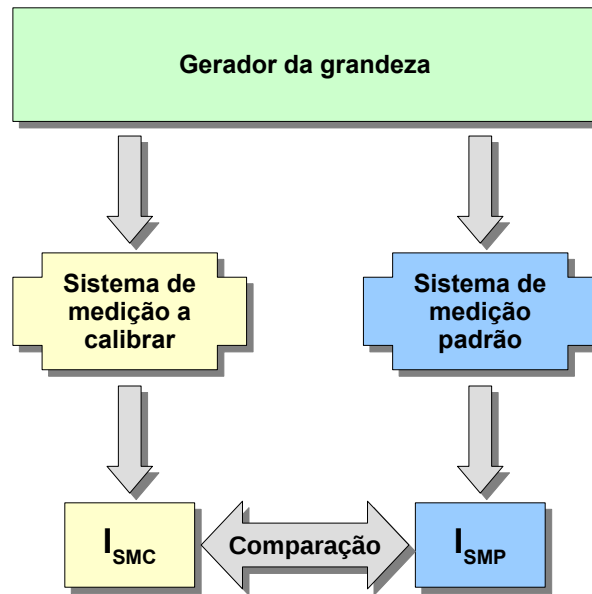


Figura 65 – Calibração indireta de um sistema de medição

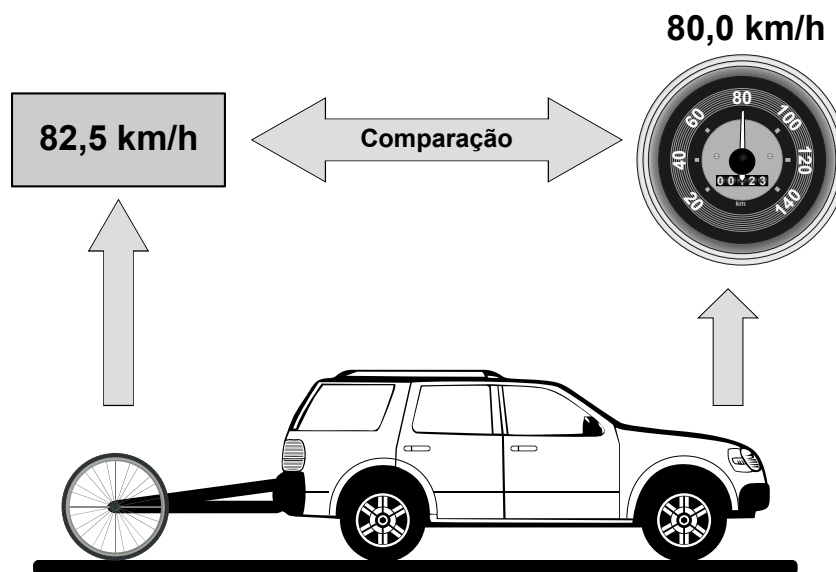


Figura 66 – Exemplo de calibração indireta de um velocímetro de um automóvel

4.1.3 Calibração *in loco*

Normalmente a calibração é realizada em um laboratório, em condições controladas, geralmente normalizadas. Quando as condições de uso são muito diferentes das condições de laboratório, os resultados da calibração podem não ser mais válidos [47]. Há casos em que é possível, por meio de modelos e informações adicionais, transpor razoavelmente bem os resultados obtidos nas condições de calibração para as condições de uso, mas isso não é uma regra.

A calibração *in loco* é uma alternativa para os casos em que as condições de uso diferem muito das de calibração. Nesse caso, os padrões são levados até o local onde

o sistema de medição se encontra e a calibração é realizada nas condições de operação. O desempenho metrológico do sistema de medição levantado nessas condições é mais representativo do que a calibração feita em laboratório [45].

4.2 Metodologia de Calibração

A definição de uma metodologia de calibração única para cada um dos sensores representou um dos grandes desafios deste projeto. Os principais fatores que dificultam essa definição são os seguintes:

- *Natureza única do projeto*: não foi encontrado na literatura nenhum projeto de identificação de lâmpadas de IP usando sensores radiométricos na literatura até o início deste trabalho. Isso nos obrigou a adaptar o procedimento de calibração utilizado com outros tipos de equipamentos que detectam radiação eletromagnética.
- *Adaptação dos sensores*: alguns dos sensores utilizados nesse projeto têm por objetivo a detecção (indicar a presença da radiação) ao invés de medição (determinar a quantidade da radiação recebida). Com isso, não existia a garantia de que esses sensores poderiam apresentar resultados metrológicos confiáveis.
- *Diferença entre os sensores*: além de possuírem aplicações originais distintas, os diversos sensores também apresentam resposta espectral muito diversa entre si (característica, aliás, que determinou a escolha desses sensores). Uma consequência disso é que uma única fonte luminosa excita cada um dos sensores de maneira distinta, diferenciando obrigatoriamente a calibração de cada um deles.
- *Ausência de grandeza física bem definida*: com exceção dos sensores SFH 2430, SFH 5711 e TCS3414, não é possível extrair nenhuma grandeza radiométrica ou luminotécnica bem definida a partir das medidas dos sensores individualmente. Isso nos impediu de efetuar a calibração indireta utilizando algum equipamento comercial de elevada precisão como padrão.

Para resolver esse problema, considerando os desafios citados e as limitações de recurso e de tempo deste projeto, foi necessário abrir mão de algumas características exigidas de um procedimento e de um sistema de calibração. Em relação ao processo em si, devido à falta de um ambiente climatizado, foi definido que a calibração não seria feita sob condições de temperatura e umidade controladas. Quanto ao sistema, foi definido que não seria exigida do padrão de medição uma precisão muito superior ao mais preciso dos sensores. Esta última consideração, em especial, possui grave consequência metrológica e não poderia ser adotada se o objetivo desse projeto fosse a construção de um equipamento de medição. Como o objetivo final é a classificação dos pontos de IP, essa consideração

pode ser feita desde que o sistema de classificação seja robusto o suficiente para lidar com a redução da precisão e da exatidão do sistema de medição.

Feitas essas importantes considerações, foi projetado e construído um sistema de iluminação de referência para o procedimento de calibração dos sensores radiométricos. Esse sistema é composto por um iluminador de referência e um software de supervisão. Ele é caracterizado por ter sua operação totalmente automática, efetuando cuidadosamente as mudanças das configurações de iluminação e a leitura dos dados dos sensores radiométricos a serem calibrados, reduzindo assim a influência do operador no processo. Uma das placas de sensores foi escolhida para fornecer a resposta de referência. Será feita a seguir a descrição de cada um desses componentes.

4.2.1 Iluminador de Referência

Para que os sensores de medição sejam testados de maneira eficaz, o iluminador de referência deve possuir duas características principais: a emissão de luz em uma larga faixa de comprimento de onda e a variação da intensidade luminosa. Para isso, foi construído um iluminador de referência controlada por um microcontrolador ATmega48 [48]. Contando com uma matriz de LEDs de potência (azul, verde, vermelho, branco e infravermelho), ele permite variar tanto o espectro emitido pelo conjunto, quanto o nível de intensidade do fluxo radiante, sendo mostrado na Figura 67.

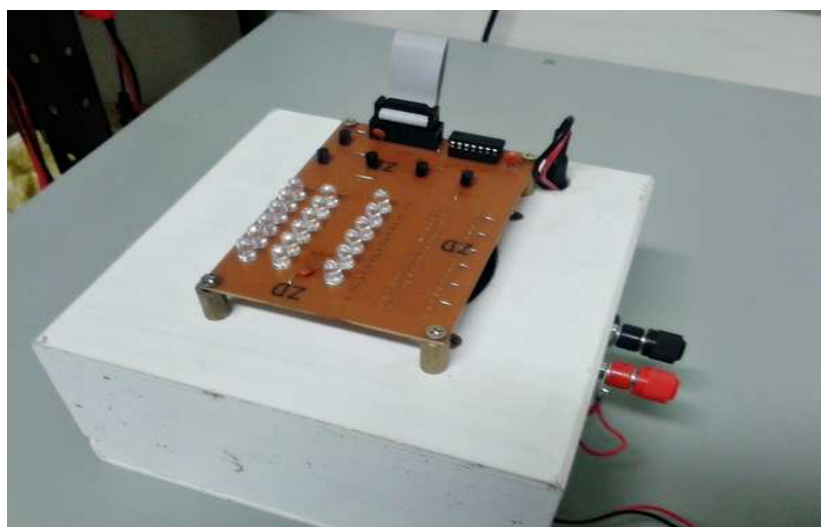


Figura 67 – Iluminador de referência

Através de estudos realizados com base na estrutura mecânica de apoio, enquanto se avaliavam as diversas lâmpadas de IP, foi observada uma forte tendência de o espectro radiométrico variar dentro da faixa visível (400 – 780 nm) e em algumas faixas do infravermelho (780 – 1000 nm). Com o intuito de englobar toda a faixa espectral descrita, os LEDs escolhidos abrangeram cinco faixas distintas: branco, azul, verde, vermelho e

infravermelho. Logo, com a combinação desses LEDs, através de um fino controle da intensidade de cada ramo, obteve-se uma eficaz variação dos dados radiométricos em toda a faixa desejada.

Para que a sensibilidade luminosa dos sensores fosse minuciosamente testada do ponto mínimo à saturação, cada ramo de LEDs é acionado com uma forma de onda quadrada modulada em largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*). Tal acionamento é determinado via software de maneira a se obter diferentes níveis de luminosidade e, conseqüentemente, variar a cor resultante da combinação dos LEDs já mencionados. Essa técnica foi utilizada em detrimento da regulação linear da corrente de entrada para evitar o deslocamento do espectro nominal de cada um dos LEDs. Além disso, um *cooler* posicionado no interior da caixa provê a ventilação necessária para efetuar o controle da temperatura de operação do circuito.

4.2.2 Firmware

O *firmware* de controle do iluminador de referência foi escrito na linguagem C utilizando o ambiente de desenvolvimento CodeVisionAVR. Ele controla a comunicação com o sistema de supervisão e a geração de sinal PWM para o acionamento dos LEDs. Na Figura 68 é mostrado seu fluxograma simplificado.

O *firmware* começa inicializando suas variáveis internas e configurando os periféricos do microcontrolador. Em seguida, ele aguarda o envio de dados pelo sistema de supervisão. Iniciada a leitura, caso seja enviado o comando CLEAR, representado pelo byte correspondente ao caractere "C", ele descarta os dados lidos. Caso contrário, é atribuída a nova configuração dos canais PWM referentes a cada um dos grupos de LEDs. Em seguida, é feita a limpeza do *buffer* de entrada e é aguardada a chegada de novos dados.

4.2.3 Software de Calibração

Para efetuar o gerenciamento do procedimento de calibração, foi desenvolvido um *software* de supervisão, cuja tela principal pode ser vista na Figura 69. Esse *software* foi escrito na linguagem C# usando o ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio .NET 2010.

Esse *software* é capaz de gerenciar o procedimento de calibração de forma totalmente automática, dispensando a interferência do operador durante o processo. Para isso, ele se comunica tanto com o iluminador de referência quanto a placa de sensores radiométricos, controlando a potência para cada um dos LEDs e coletando as medidas dos sensores.

O *software* possui 3 modos de operação distintos: manual, automático (calibração) e monitoramento (dos sensores). Cada um desses modos é contemplado com uma aba

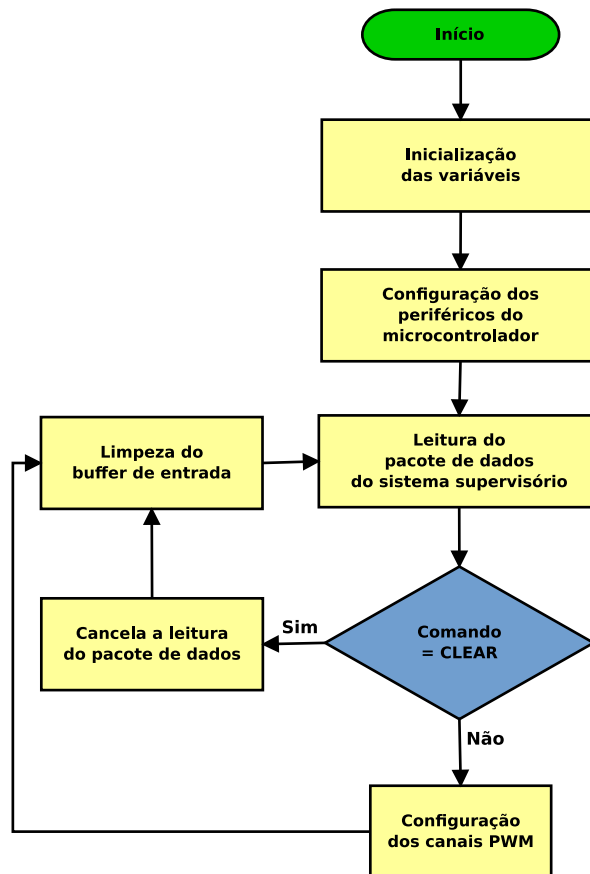


Figura 68 – Fluxograma do *firmware* do iluminador de referência

específica.

Na Figura 69, é mostrada a tela principal do programa no modo manual. Nela é possível definir a razão cíclica para cada conjunto de LEDs individualmente (de 0 a 99) e determinar a temperatura de operação.

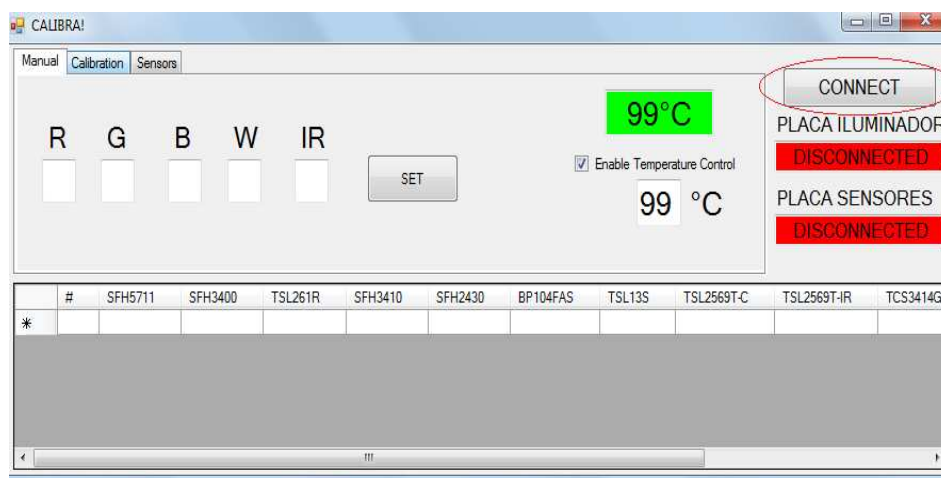


Figura 69 – *Software* de supervisão do sistema de calibração - modo manual

Na Figura 70, é mostrada a tela de calibração, referente ao modo de operação automático. Nessa tela é possível configurar o arquivo com as configurações da calibração e a pasta onde será salva a planilha com os dados das medidas dos sensores, além do botão para se iniciar o procedimento de calibração.

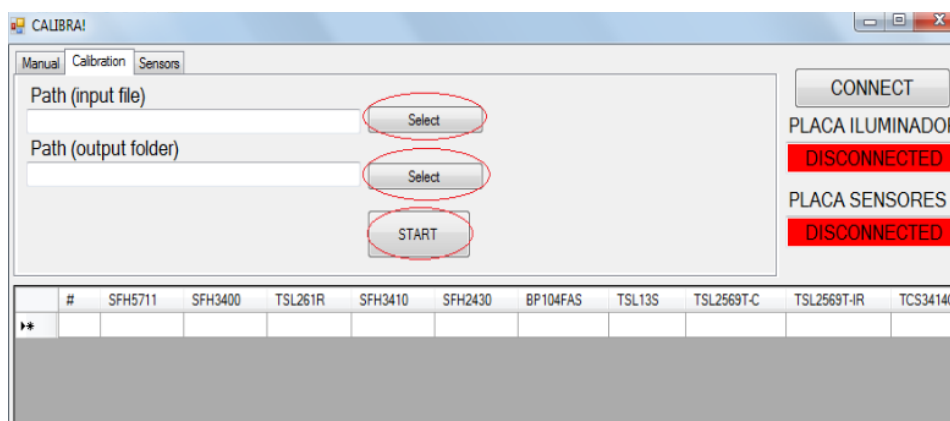


Figura 70 – *Software* de supervisão do sistema de calibração - modo automático

Já a Figura 71 mostra a tela dos sensores, referente ao modo de operação de monitoramento. Nela são mostrados os dados dos sensores em tempo real, além de botões para registrar uma medida, salvar o conjunto de medidas feitas ou limpar as já realizadas. Cada medida registrada é mostrada em uma planilha na parte inferior da tela, que é visualizada em todos os modos de operação.

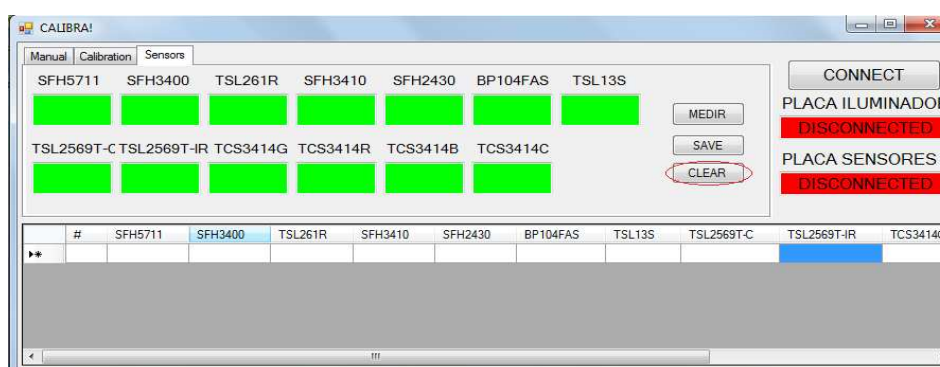


Figura 71 – *Software* de supervisão do sistema de calibração - modo de monitoramento

4.3 Procedimento de Calibração

Esta seção descreve, passo a passo, o procedimento para calibração das placas de medição, utilizando a esfera integradora do NIMO e o iluminador de referência. Ele é dividido em duas etapas. Na primeira etapa são feitas as medidas na esfera com o iluminador de referência e a placa a ser calibrada. Na segunda etapa, é feita a comparação

das respostas obtidas com a resposta da placa de referência. Como placa de referência foi escolhida aquela que apresentava a menor divergência dos dados.

Para realizar o procedimento são utilizados os seguintes equipamentos:

- Esfera Integradora
- Iluminador de referência
- Notebook
- Placa de sensores
- Fonte CC estabilizada

O primeiro passo é fixar a placa de sensores num suporte dentro da esfera, onde também está contido o iluminador de referência (Figura 72).

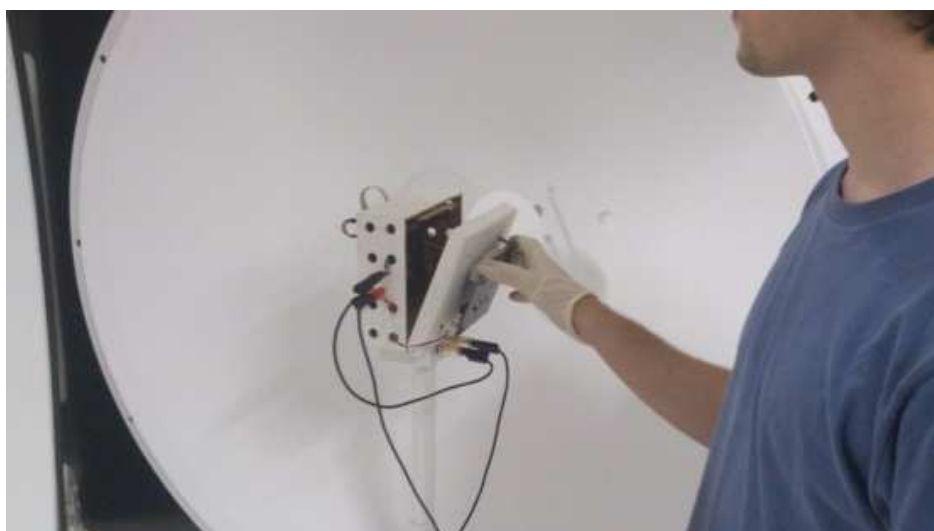


Figura 72 – Fixação da placa de medição

Em seguida, deve-se ajustar a fonte CC estabilizada em 12 V. Efetua-se o *reset* da placa e, no programa de supervisão, clica-se no botão para conexão com as placas de sensores e do iluminador. Na aba manual, ajusta-se a temperatura de operação em 47°C. Por fim, na aba de calibração, carrega-se o arquivo de configuração e inicia-se o processo de calibração.

Após coletados os dados, os mesmos são salvos em uma planilha no formato CSV (Comma-separated values - valores separados por vírgula). Em seguida, o arquivo salvo e o arquivo com a resposta de referência são submetidos a um *script* MATLAB que processa as informações e, por meio de uma linearização usando o método dos mínimos quadrados, calcula os coeficientes angular (ganho) e linear (*offset*) de calibração para cada um dos sensores.

Com os resultados da calibração em mãos, é possível fazer o ajuste da placa de sensores, inserindo esses parâmetros diretamente no *firmware* da placa.

4.4 Resultados de Calibração

4.4.1 Calibração na Esfera

Como resultado preliminar, pode-se destacar a boa reprodutibilidade da metodologia adotada, que pode ser observada na Figura 73, que mostra o resultado de 57 leituras para o sensor SFH3410. Estes resultados têm origem de um conjunto de medidas realizadas durante aproximadamente três dias, conforme registro automático programado no aplicativo de supervisão.

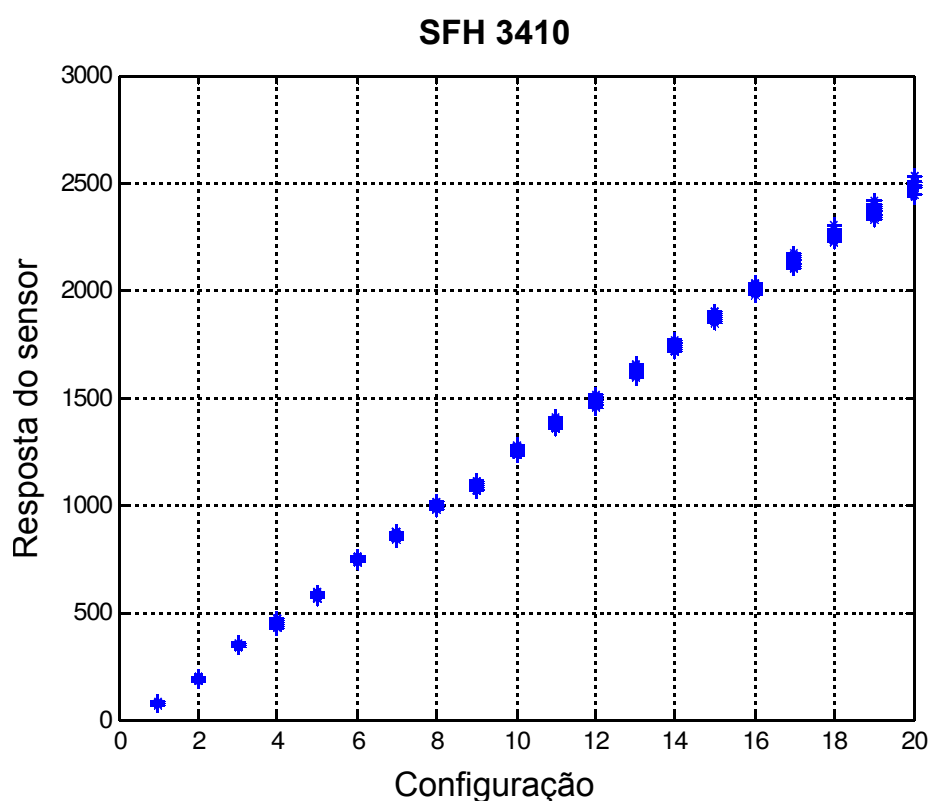


Figura 73 – Leitura do sensor SFH 3410 para 20 configurações, considerando 57 leituras em momentos diferentes para as mesmas configurações

A partir desta definição, as placas são submetidas a um procedimento de calibração e os resultados de suas coletas são comparados aos da placa de referência. A Figura 74 mostra a comparação das medidas da placa 5 (a ser ajustada) com a placa 6 (referência) para o sensor SFH3410. A partir desse gráfico, é possível descobrir os parâmetros de ajuste deste sensor.

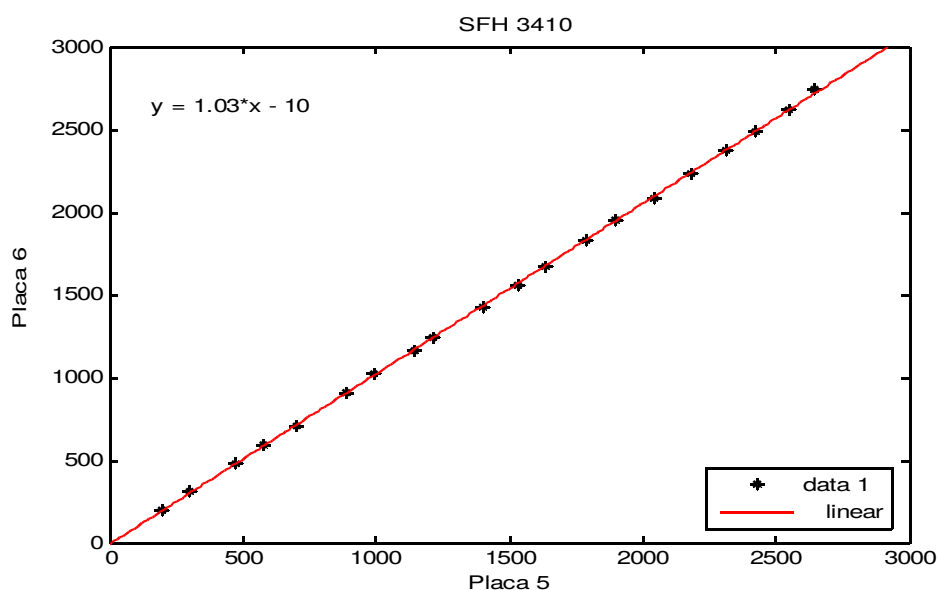


Figura 74 – Ajuste para o sensor SFH3410

4.4.2 Validação na Estrutura IP

Após obtidas as curvas de calibração, foi feita a validação dos resultados obtidos em laboratório pela comparação das medições em campo. O resultado desta validação pode ser visto na Figura 75. É possível observar que, mesmo com o ajuste feito em laboratório, os dados do sensor TSL261R da placa 5 ainda apresentam divergências importantes com relação aos mesmos dados da placa 6. Isso ocorre devido a diversas condições encontradas no campo, que não são triviais de serem reproduzidas em laboratório e que exigiriam um tempo adicional da equipe para serem implementadas. Algumas das condições diversas encontradas em campo são: depósito de detritos sobre as lâmpadas e lentes difusoras, envelhecimento, diversos tipos de inclinação do braço e luminária, condições adversas do ambiente (temperatura, umidade, pressão atmosférica, altitude etc.), entre outras. Além disso, não se pode ignorar a diferença espectral entre a fonte de iluminação de referência e os espectros típicos encontrados em campo, que, em conjunto com as respostas não lineares dos sensores radiométricos, podem levar a discrepâncias consideráveis. Devido a esta constatação, partiu-se para outra estratégia de calibração: a calibração *in loco*.

4.4.3 Calibração *in loco*

Como já dito, diversas condições encontradas no campo são difíceis de reproduzir em laboratório, tais como:

- Sujeira da Luminária;
- Envelhecimento;

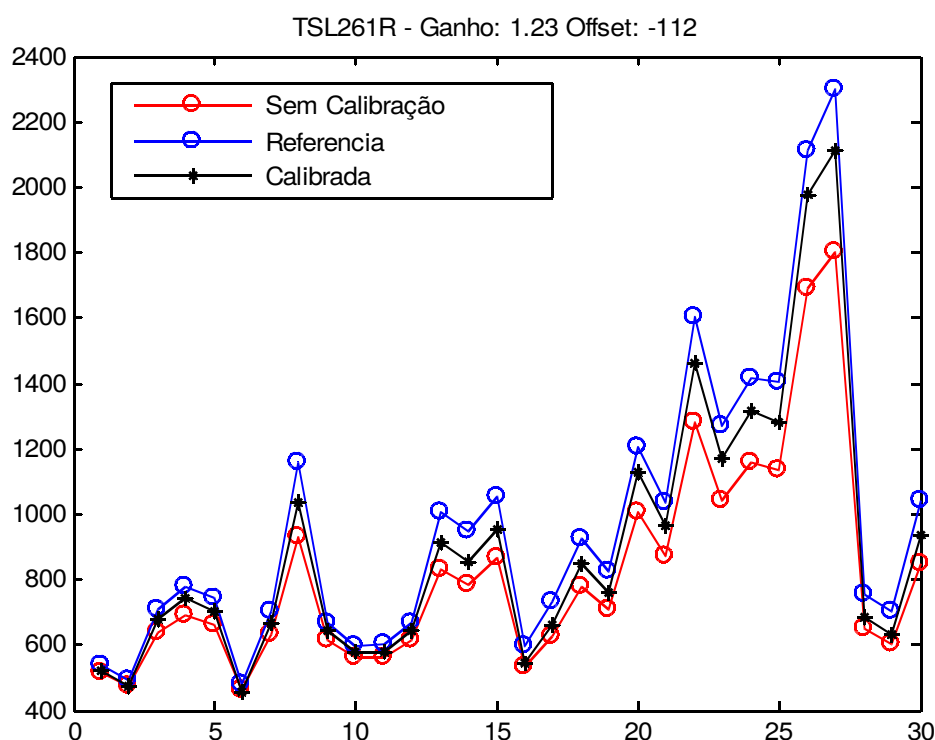


Figura 75 – Validação campo para sensor TSL261R

- Diversos tipos de inclinação;
- Condições do ambiente (temperatura, umidade);
- Outras.

Uma alternativa para casos como esse, em que as condições de uso diferem muito das condições de calibração em laboratório, é a Calibração em Campo, também chamada de Calibração *in loco*. Embora esse método não permite um bom controle das condições de calibração, ele tem como vantagem o aumento da representatividade do desempenho metrológico do sistema de medição, já que leva em consideração todas as nuances e variações do campo no processo de calibração [45]. Desse modo, foi necessário definir uma metodologia de calibração baseada em parâmetros estatísticos e nas características do sistema de medição. Essa metodologia deve apresentar resultados com as seguintes características:

- Reprodutibilidade dos parâmetros de ajuste;
- Alta capacidade de ajuste com os dados do campo.

O primeiro item revela que conjuntos diferentes de dados para calibração devem levar aos mesmos coeficiente de ajuste, garantindo assim a unicidade dos parâmetros de

calibração. Já o segundo item indica que, na validação com os dados do campo, o erro encontrado deve ser mínimo. É importante realçar que os dados utilizados na calibração devem ser diferentes dos dados usados na validação.

O estudo inicial partiu de um universo de 30 pontos de medidas, coletadas com o auxílio de um gabinete projetado para fazer a coleta de todas as placas simultaneamente. Este dispositivo pode ser visto na Figura 76.

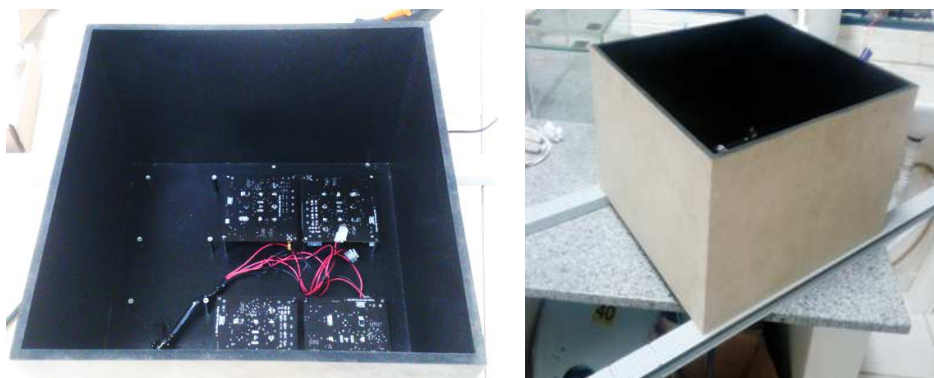


Figura 76 – Gabinete utilizado para medição simultânea das placas

A partir dos dados coletados, verificou-se que amostras distintas do mesmo tamanho levam a parâmetros de ajustes distintos, o que não é desejado. Para eliminar essas variações, definiu-se para a seleção dos parâmetros a média dos coeficientes de 10.000 amostras, que se mostrou estável.

Na Figura 77, é mostrada a variação do erro médio do sensor TSL13S com o número N de pontos utilizados para determinar o ajuste de uma amostra. Essa média foi calculada sobre as 10.000 amostras. Verifica-se que o erro decresce com o aumento de N , permanecendo praticamente constante a partir de $N = 10$. Por isso, foi escolhido esse valor para o tamanho da amostra. Os outros sensores apresentam comportamento similar.

Desse modo, foi utilizada a seguinte metodologia de determinação dos parâmetros de ajuste:

- Seleção de 10.000 amostras de forma aleatória;
- Cálculo dos parâmetros de ganho (A) e offset (B) por linearização para cada uma das amostras;
- Cálculo da média dos parâmetros A e B para o conjunto de 10.000 amostras e defini-la como os parâmetros de ajuste.

Como mostrado na Figura 78, ao se repetir 10 vezes o processo de calibração, não ocorre variação dos parâmetros, o que denota a unicidade dos mesmos e a estabilidade do método.

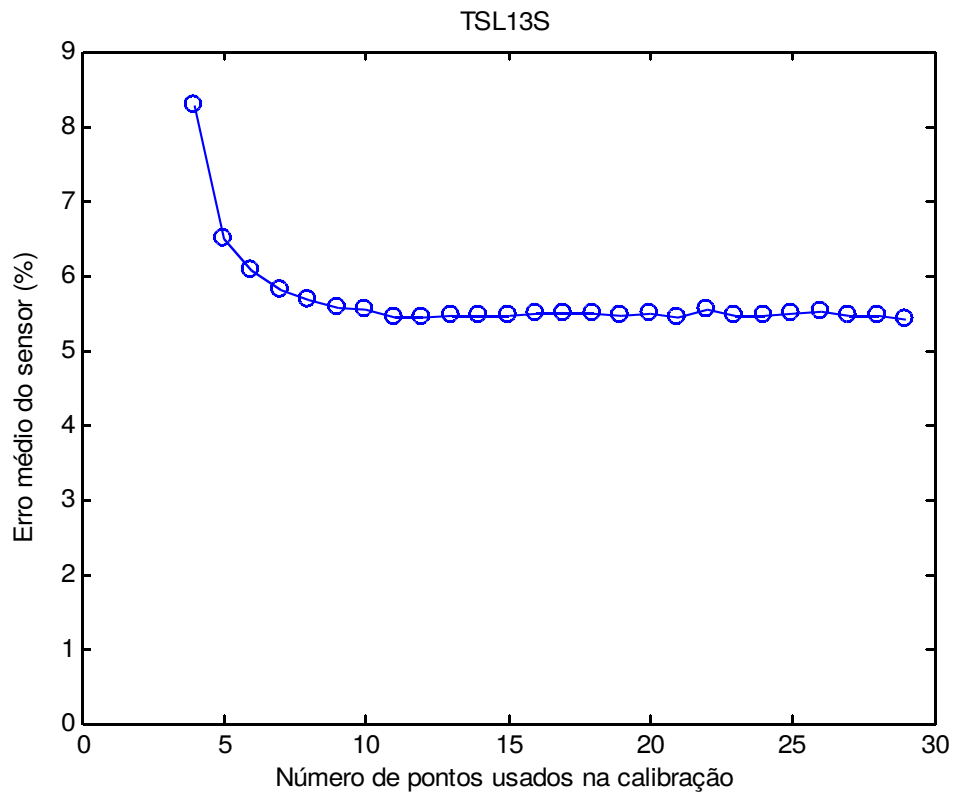


Figura 77 – Variação do erro médio do sensor com o número de postos por amostra, para 10.000 amostras

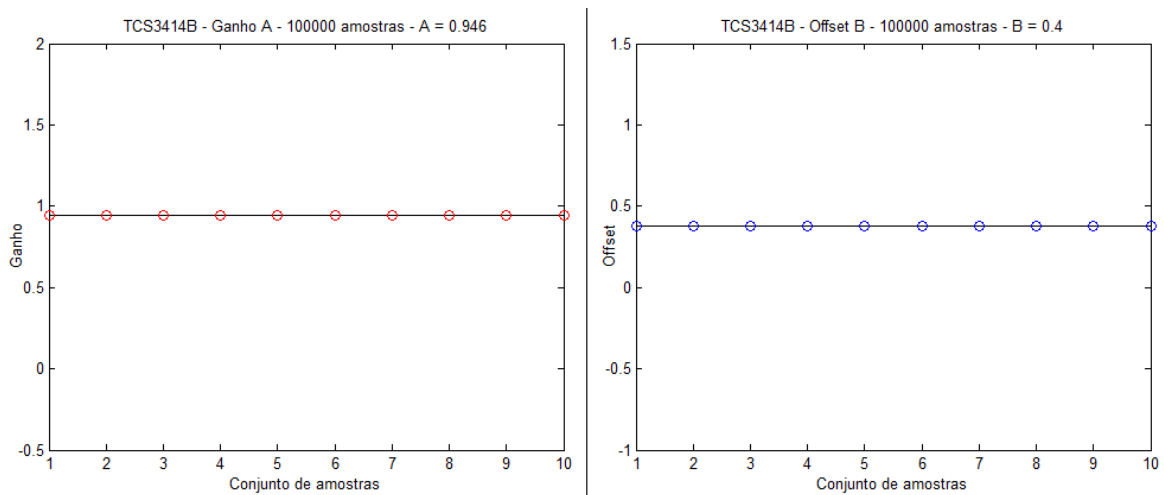


Figura 78 – Variação dos parâmetros de ajuste para o sensor TCS3414B para 10 conjuntos de 10.000 amostras distintas cada, totalizando 100.000 amostras.

Por fim, é realizada a validação do ajuste pela comparação com os demais dados de campo. O sensor TSL261R, que apresentou a maior divergência entre valor sem calibração e de referência, apresentou um ajuste quase perfeito dos dados, conforme mostra a 79. Com isso, foram atendidos os dois requisitos para a metodologia de determinação dos parâmetros de calibração.

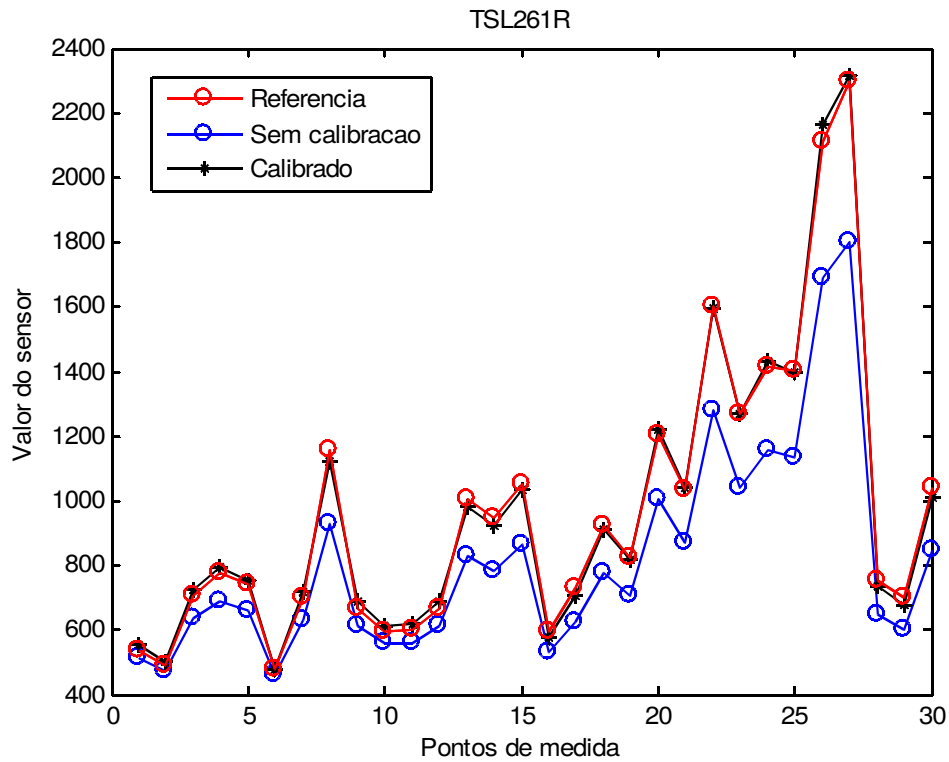


Figura 79 – Ajuste do sensor TSL261R com os dados de campo

Na tabela 2, são mostrados os erros máximo e médio para cada um dos sensores analógicos e digitais.

Tabela 2 – Erro máximo e médio para cada sensor radiométrico após o ajuste de calibração

Sensor	Erro máximo	Erro médio
BP 104 FAS	2,20%	0,95%
SFH 2430	3,25%	1,35%
SFH 3400	3,77%	1,35%
SFH 3410	2,39%	1,10%
SFH 5711	0,56%	0,27%
TSL 261R	3,22%	1,88%
TSL 2569T-C	2,93%	1,25%
TSL 2569T-IR	3,52%	1,62%
TCS 3414-R	2,69%	1,28%
TCS 3414-G	3,79%	1,67%
TCS 3414-B	4,70%	2,19%
TCS 3414-C	4,92%	2,00%

4.5 Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou o sistema de calibração desenvolvido para o sistema de identificação de lâmpadas de IP.

Inicialmente, foi feita uma pequena introdução teórica acerca de sistemas de calibração em geral. Em seguida, foi apresentado o sistema de calibração proposto inicialmente, que contém um iluminador microcontrolado de referência e um software de supervisão do processo. Foram descritas as etapas do processo de calibração e apresentados os resultados obtidos.

Embora tenha-se conseguido um bom ajuste de parâmetros com os dados coletados no procedimento de calibração, verificou-se que esse ajuste não era válido quando aplicado aos dados obtidos na estrutura IP. Algumas das possíveis justificativas para esse fato são as condições diversas encontradas em campo de difícil reprodução em laboratório, como depósito de detritos sobre as lâmpadas e lentes difusoras, envelhecimento, diversos tipos de inclinação do braço e luminária, condições adversas do ambiente (temperatura, umidade, pressão atmosférica, altitude etc.), entre outras. Além disso, um fator importante é a diferença espectral entre a fonte de iluminação de referência e os espectros típicos encontrados em campo.

Com isso, partiu-se para outra estratégia de calibração: a calibração *in loco*, que apresenta como vantagem a maior representatividade metrológica por levar em consideração todas as nuances e variações do campo no processo de calibração. Essa metodologia mostrou-se acertada, apresentando bons resultados de calibração.

É importante salientar que a metodologia de calibração usando o iluminador de referência não deve ser descartada, já que, inicialmente, ela conseguiu determinar parâmetros que se ajustam muito bem com os dados coletados no processo de calibração. A princípio, a utilização do iluminador de referência apresenta duas vantagens importantes para o processo de calibração: a possibilidade de um maior controle das condições de realização de todo o procedimento e a possibilidade de reprodução do padrão, permitindo a calibração por diversas equipes. Devida a limitação de tempo do projeto, não foi possível insistir nessa metodologia, mas é perfeitamente válido um maior desenvolvimento do método em estudos futuros.

Até este ponto, tem-se um equipamento de medição de dados radiométricos e um método bem definido para a reprodução dos resultados de medida desse equipamento, garantindo a reprodutibilidade das mesmas. É necessário então desenvolver uma metodologia de processamento das informações desses sensores para a classificação dos pontos de IP, assunto do capítulo 5.

5 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO

Nos capítulos anteriores foram apresentados o sistema de medição de dados radiométricos e as metodologias de medição e calibração dos sensores, garantido a reprodutibilidade das medições. Feito isso, pode-se iniciar a análise e o processamento das medidas a fim de efetuar a classificação dos pontos de iluminação quanto à tecnologia empregada e a potência elétrica consumida. Esse estudo será o objeto deste capítulo.

De início, será feita uma descrição dos tipos de classificadores utilizados neste trabalho. Em seguida, são mostradas possíveis arquiteturas para o sistema de classificação. Posteriormente, é feita a apresentação da metodologia de treinamento e validação. Por fim, tem-se os resultados de classificação e a análise dos mesmos.

5.1 Técnicas de Reconhecimento de Padrões

O processo de definição do tipo e potência de uma lâmpada de IP por meio de informações radiométricas pode ser modelado como um problema de reconhecimento de padrão, permitindo a utilização de técnicas bem conhecidas para esse fim. Assim, o par tipo-potência de uma lâmpada é tratado como uma classe, que possui como atributos as informações dos sensores radiométricos. Desse modo, o ponto de iluminação pode ser identificado por meio de um algoritmo de classificação.

É importante ressaltar que os algoritmos utilizados devem ter a capacidade de lidar com fontes de erros, tais como os originados por variáveis que não são medidas, como a temperatura do bulbo, o tempo de vida e a tensão de alimentação da lâmpada. Todas essas medidas não são realizadas por falta de viabilidade prática. Além disso, seria de grande interesse que o algoritmo de classificação conseguisse dispensar a altura da luminária, dada a dificuldade de obtenção dessa medida.

Algumas técnicas de reconhecimento de padrões foram selecionadas para um estudo comparativo [49]. Foram escolhidos três técnicas distintas de aprendizado supervisionado: árvore de decisão, vizinho mais próximo e redes neurais. Para o aumento da exatidão, foram utilizadas estratégias como validação cruzada estratificada e *leave-one-out*. Esses estudos foram realizados utilizando o *software* livre de mineração de dados *Weka* [50].

A seguir serão descritos os algoritmos analisados neste trabalho.

5.1.1 J48

J48 é uma implementação do Weka do algoritmo C4.5 desenvolvido por Ross Quinlan [51]. Seu modelo de aprendizado utiliza árvore de decisão e o conceito de entropia da informação e é uma extensão do algoritmo ID3 desenvolvido por ele mesmo [52].

Os dados de treinamento formam um conjunto S de amostras previamente classificadas. Cada amostra s_i consiste em um vetor N -dimensional, em que N é o número de atributos de uma classe, ou, no caso deste trabalho, o número de informações dos sensores, além da classe atribuída à amostra. Para cada nó da árvore, o algoritmo C4.5 escolhe os atributos mais significativos para a separação das amostras de classes distintas. O critério para essa divisão é a diferença de entropia. Por essa razão, esse algoritmo é referido muitas vezes como um classificador estatístico.

5.1.2 IBK

IBK é uma implementação do Weka para o algoritmo do vizinho mais próximo (k-NN - k-Nearest Neighbors) [53], um método não paramétrico de classificação de instâncias baseado nos exemplos de treinamento mais próximo no espaço de características.

É um tipo de aprendizagem baseado na instância (IBK - Instance-Based Learning), e está entre os mais simples de todos os algoritmos de aprendizado de máquina [54]. Neste método, uma instância é classificada pelo voto da maioria de seus vizinhos, com o objeto que está sendo atribuído à classe mais comum entre os seus k vizinhos mais próximos (k é um número inteiro positivo, normalmente pequeno). O modo mais usado para identificar os vizinhos mais próximos é através do cálculo da distância Euclidiana entre o objeto a ser classificado e os seus vizinhos, embora possa ser utilizada qualquer forma de métricas, tais como a distância de Mahalanobis [55]. A Figura 80 ilustra um exemplo de classificação k-NN. Para $k = 1$ ou $k = 3$, o ponto é classificado como um triângulo. Caso contrário, para $k = 5$, o ponto é classificado como um quadrado. Neste trabalho foi sempre utilizado $k = 1$, reduzindo, assim, k-NN para o método do vizinho mais próximo (NN).

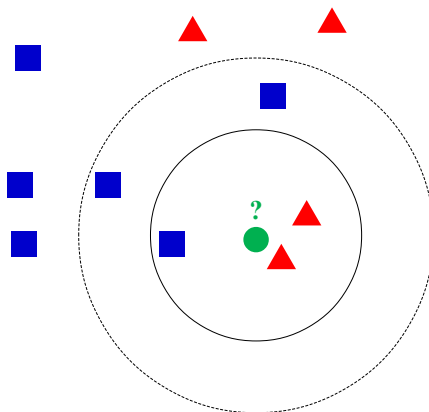


Figura 80 – Exemplo de classificação pelo método do vizinho mais próximo

5.1.3 MLP

Perceptron de múltiplas camadas (MLP - Multilayer Perceptron) [56] é um tipo de rede neural artificial (RNA) com alimentação direta. Tipicamente, uma RNA é composta

por um conjunto de unidades de sensor (nós de origem) compreendendo a camada de entrada, uma ou mais camadas escondidas e uma camada de nodos computacionais de saída. O sinal de entrada propaga-se através da rede, seguindo de camada por camada. A Figura 81 mostra a arquitetura de uma rede de MLP com uma camada de entrada, duas ocultas e uma de saída.

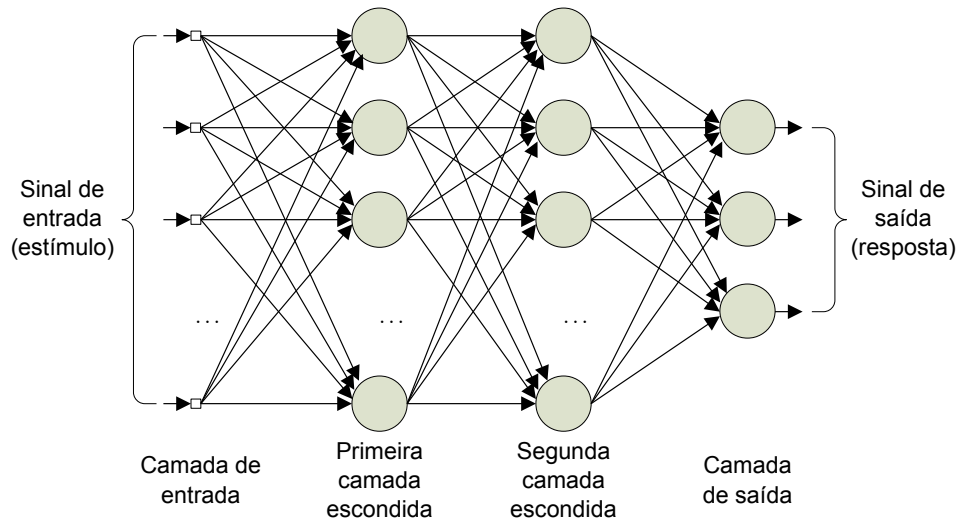


Figura 81 – Arquitetura de uma rede neural MLP com duas camadas escondidas

5.2 Configuração do Sistema de Classificação

Para efetuar a identificação das lâmpadas de IP, foram propostas duas estruturas de classificação: a classificação direta e a classificação em cascata.

Na classificação direta (Figura 82), os dados dos sensores alimentam um único classificador, que identifica diretamente o tipo e a potência das lâmpadas. Esse processo de classificação apresenta como vantagem a simplicidade, já que é necessário uma única etapa de treinamento para se obter o classificador. Em contrapartida, esse método gera um classificador mais complexo por ter que lidar com um maior número de classes possíveis no processo de classificação e, possivelmente, com uma maior região de sobreposição dos dados entre as classes, diminuindo assim a taxa de acerto.

Ja na classificação em cascata (Figura 83), o procedimento de classificação é dividido em duas etapas. Na primeira ocorre a determinação do tipo da lâmpada a ser identificada. Definido o tipo, os dados são encaminhados para um segundo classificador para a determinação da potência da lâmpada. Assim, o sistema de classificação passa a contar com 4 classificadores, 1 de tipo e 3 potência, um para cada tipo de lâmpada. Essa configuração apresenta maior complexidade, exigindo quatro etapas de treinamento de classificadores par se obter o classificador final. No entanto, ele gera classificadores mais simples individualmente, por lidar com um número menor de classes e, possivelmente,

uma menor região de sobreposição entre as classes, aumentando assim a taxa de acerto. A grande questão é se esse aumento compensa o erro gerado por duas etapas de classificação, que será respondida pelos resultados de classificação.

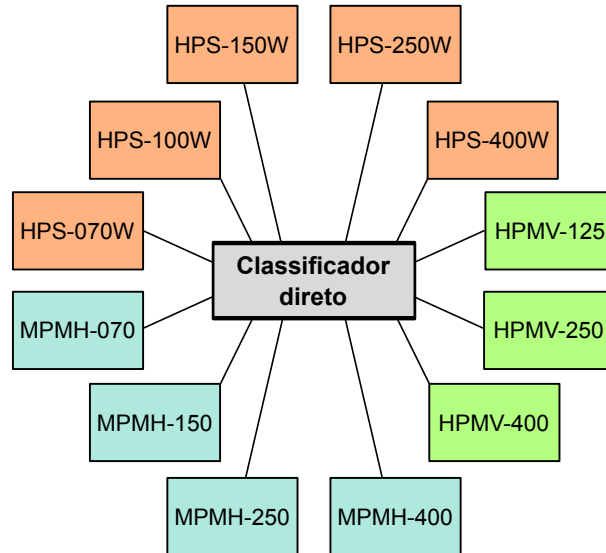


Figura 82 – Sistema de classificação direta

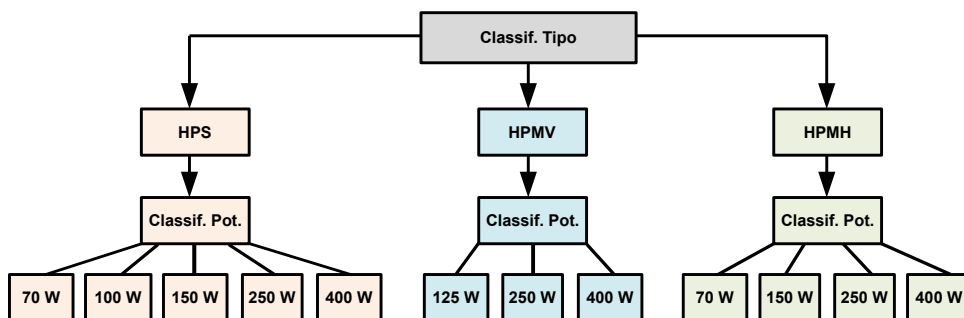


Figura 83 – Sistema de classificação em cascata

5.3 Metodologia de Treinamento e Validação

É comum medir-se o desempenho de um classificador em termos de taxa de acerto ou exatidão. Essa Figura de mérito consiste na proporção de casos classificados corretamente ao longo de todo o conjunto de instâncias.

Em geral, o procedimento de construção dos classificadores e a avaliação de sua exatidão pode ser dividido em duas etapas: treinamento e validação. O treinamento tem por objetivo definir os parâmetros do algoritmo classificador com base em um conjunto de dados marcado, que tem ambas as entradas (ou seja, os dados de sensores) e as saídas (isto é, as lâmpadas) conhecidas a priori. O passo de validação utiliza uma base de dados não marcadas, que tem apenas as entradas conhecidas. Neste caso, o algoritmo classificador

devem inferir a saída com base nos dados fornecidos utilizando os parâmetros encontrados no passo de treinamento.

Frequentemente, a forma na qual dados são divididos para avaliar o desempenho leva a resultados superestimados [57]. Os conjuntos de dados de treinamento e validação devem ser diferentes um do outro, a fim de tornar possível a quantificação da capacidade de generalização do classificador. Uma divisão única do conjunto de dados disponível em $x\%$ para treinamento e $(100-x)\%$ para validação pode introduzir um viés considerável no desempenho estimado.

Um bom compromisso entre a significância estatística e complexidade computacional consiste em utilizar a validação cruzada estratificada, em que o conjunto de dados é dividido em k subconjuntos, cada um desses usado uma vez para ensaio e $k - 1$ vezes para a formação. Quando o tempo de treinamento do classificador não for excessivo, a validação cruzada leave-one-out (LOO) pode ser usada. LOO dá uma estimativa mais confiável do que a divisão de dados treinamento-validação simples, uma vez que quase todos os exemplos são usados para treinamento e validação, mantendo esses conjuntos disjuntos. LOO é um caso especial de validação cruzada k vezes em que o conjunto total de dados tem padrões k . Assim, a validação LOO foi usada para comparar a exatidão dos classificadores.

5.4 Resultados de Classificação

Para a avaliação do sistema de classificação de dados, foi gerado um conjunto de 324 medidas variando tipo e potência de lâmpadas, modelo de luminária e ângulo de inclinação do braço da mesma. Além dos dados dos sensores, também foi medida a altura da luminária para cada amostra, a fim de analisar a influência desse parâmetro no procedimento de medição. Esse parâmetro não é medido pelo sistema de coleta dada a dificuldade prática de se efetuar essa medição automaticamente. A descrição dessas instâncias é mostrada na tabela 3.

O conjunto de medidas foi submetido aos três tipos de classificadores (J48, IBK e MLP), utilizando duas configurações de classificação (único e em cascata), usando ou não os dados de classificação, permitindo comparar cada um desses itens. Os resultados de classificação são apresentados nas tabelas 4 a 9.

Analisando os resultados do classificador de tipo (tabela 4), verifica-se que a altura pouco interfere no resultado de classificação. Isso era esperado, uma vez que esse parâmetro não interfere no espectro radiométrico medido, que é o que caracteriza a tecnologia da lâmpada de IP. Pode-se observar também que o classificador MLP apresenta resultados significativamente melhores que os demais classificadores. Observa-se também que, independente do classificador usado, as lâmpadas de sódio apresentaram um percentual de acerto superior, o que também era esperado, uma vez que sua cor alaranjada, característica

Tabela 3 – Descrição dos valores das instâncias de medidas usadas na avaliação

Tipo de lâmpada	Potência (W)	Luminária	Altura do poste	Angulo de inclinação
Vapor de mercúrio (HPMV)	125	A, B e C	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	250	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	400	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
Vapor metálico (HPMH)	70	A, B e C	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	150	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	250	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	400	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
Vapor de sódio (HPS)	70	A, B e C	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	100	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	150	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	250	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
	400	D, E e F	4,0 - 4,8 - 5,6	0° - 10° - 20°
Número total de instâncias				324

do seu espectro luminoso, permite distingui-la das outras tecnologias, como pode ser visto nas Figuras 14, 17 e 20. Por fim, a comparação dessas Figuras nos indica que, baseado no parâmetro cor, seria possível identificar o tipo de lâmpada. De fato, obtendo as coordenada cromática y a partir da aplicação das equações 3.1 e 3.3 foi possível identificar 100 % a tecnologia, independente do tipo de classificador usado.

Tabela 4 – Resultados do classificador de tipo de lâmpada

Sem informação de altura				
Classificador	Tipo de lâmpada			Média ponderada
	HPMV	HPMH	HPS	
J48	88,9 %	86,1 %	93,3 %	89,8 %
IBK	80,2 %	93,5 %	97,0 %	91,7 %
MLP	96,3 %	95,4 %	100 %	97,5 %
Com informação de altura				
Classificador	Tipo de lâmpada			Média ponderada
	HPMV	HPMH	HPS	
J48	87,7 %	87,0 %	93,3 %	89,8 %
IBK	86,4 %	91,7 %	96,3 %	92,3 %
MLP	98,8 %	97,2 %	97,0 %	97,5 %

Em relação à classificação de potência para as lâmpadas de sódio (tabela 5), uma conclusão importante é que, ao contrário do que ocorre na classificação de tipo, a altura passa a ser um componente importante para a distinção das instâncias. Como as lâmpadas são do mesmo tipo, o espectro pouco varia entre elas e que resta para diferenciar uma instância da outra é a amplitude da resposta dos sensores. E, de acordo com a lei de *Lambert*, essa amplitude é diretamente proporcional à intensidade luminosa (e, conseqüentemente, à potência da lâmpada) e inversamente proporcional ao quadrado da

altura. Além disso, também se observa que o classificador MLP apresenta os melhores resultados de classificação. Ambos os fatos observados também ocorrem na classificação de potência para as lâmpadas de mercúrio (tabela 6) e multivapores metálicos tabela 7.

Já comparando os classificadores de potência relativos a cada um dos tipos de lâmpada, verifica-se que o classificador de potência para o sódio apresentou na média taxas de acerto menores que os demais. Isso provavelmente ocorreu um pouco pelo número maior de classes (5 potências para HPS, 3 para HPMV e 4 para HPMH), mas, sobretudo, pela menor diferença de potência entre as classes, tornando-as mais próximas e aumentando a dificuldade da separação das mesmas.

Tabela 5 – Resultados do classificador de potência - HPS

Sem informação de altura						
Classificador	Potência da lâmpada					Média ponderada
	70 W	100 W	150 W	250 W	400 W	
J48	92,6 %	33,3 %	70,4 %	70,4 %	96,3 %	72,6 %
IBK	88,9 %	48,1 %	63,0 %	77,8 %	81,5 %	71,9 %
MLP	96,3 %	66,7 %	63,0 %	88,9 %	96,3 %	82,2 %
Com informação de altura						
Classificador	Potência da lâmpada					Média ponderada
	70 W	100 W	150 W	250 W	400 W	
J48	92,6 %	70,4 %	70,4 %	85,2 %	88,9 %	81,5 %
IBK	100 %	81,5 %	81,5 %	85,2 %	92,6 %	88,1 %
MLP	100 %	81,5 %	85,2 %	88,9 %	96,6 %	89,6 %

Tabela 6 – Resultados do classificador de potência - HPMV

Sem informação de altura				
Classificador	Potência da lâmpada			Média ponderada
	125 W	250 W	400 W	
J48	96,2 %	70,4 %	82,5 %	83,8 %
IBK	92,3 %	92,6 %	92,6 %	92,5 %
MLP	96,2 %	100 %	100 %	98,8 %
Com informação de altura				
Classificador	Potência da lâmpada			Média ponderada
	125 W	250 W	400 W	
J48	96,2 %	96,3 %	88,9 %	93,8 %
IBK	96,2 %	100 %	96,3 %	97,5 %
MLP	96,2 %	100 %	100 %	98,8 %

Em relação à classificação direta de tipo e altura, novamente observa-se a influência desta última no processo de classificação. Além disso, pode-se constatar que, para a maioria das medidas, esses classificador apresenta resultados inferiores aos classificadores de potência correspondentes, indicado a superioridade da classificação em cascata.

Tabela 7 – Resultados do classificador de potência - HPMH

Sem informação de altura					
Classificador	Potência da lâmpada				Média ponderada
	70 W	150 W	250 W	400 W	
J48	100 %	85,2 %	51,9 %	81,5 %	78,9 %
IBK	100 %	85,2 %	51,9 %	81,5 %	78,9 %
MLP	100 %	88,9 %	66,7 %	92,6 %	86,2 %
Com informação de altura					
Classificador	Potência da lâmpada				Média ponderada
	70 W	150 W	250 W	400 W	
J48	92,6 %	92,6 %	55,6 %	92,6 %	82,6 %
IBK	100 %	100 %	74,1 %	85,2 %	89,0 %
MLP	100 %	100 %	74,1 %	85,2 %	89,0 %

Tabela 8 – Resultados do classificador único sem informação de altura

Tipo de lâmpada		Classificador		
		J48	IBK	MLP
HPMV	125 W	92,3 %	95,7 %	89,3 %
	250 W	67,9 %	67,9 %	71,4 %
	400 W	84,6 %	87,5 %	82,1 %
HPMH	70 W	86,2 %	78,1 %	88,0 %
	150 W	91,7 %	80,8 %	92,9 %
	250 W	66,7 %	48,1 %	79,2 %
	400 W	74,2 %	71,4 %	85,2 %
HPS	70 W	85,2 %	85,7 %	86,7 %
	100 W	43,8 %	56,0 %	64,0 %
	150 W	43,9 %	67,9 %	71,4 %
	250 W	43,9 %	67,9 %	71,4 %
	400 W	88,5 %	88,5 %	92,9 %
Média ponderada		74,5 %	74,7 %	82,9 %

Por fim, tem-se um resumo com os resultados médios de classificação, ilustrado pela Figura 84. Ela permite visualizar de forma mais clara a superioridade do tipo de classificador MLP em relação ao J48 e ao IBK. Também é possível ver a superioridade da classificação em cascata em relação à direta. Essa diferença foi significativa para os classificadores J48 e IBK, mas foi pequena no caso do MLP, ilustrando seu maior poder de adaptação na etapa de treinamento. E finalmente, a taxa média obtida pelo classificador MLP sem altura, cujo valor foi 87,5 %, já pode ser considerado um bom valor, atendendo as necessidades da concessionária. No entanto, esse valor pode ser melhorado e o incremento provocado pela inserção da informação de altura, que possibilitou uma ótima taxa de acerto de 93,4%, mostra um possível caminho para a melhora do sistema.

Tabela 9 – Resultados do classificador único com informação de altura

Tipo de lâmpada		Classificador		
		J48	IBK	MLP
HPMV	125 W	92,0 %	92,0 %	88,9 %
	250 W	81,5 %	96,2 %	92,6 %
	400 W	85,7 %	89,7 %	100 %
HPMH	70 W	86,2 %	89,3 %	100 %
	150 W	88,9 %	100 %	96,3 %
	250 W	68,2 %	61,5 %	81,5 %
	400 W	73,9 %	65,4 %	92,6 %
HPS	70 W	91,6 %	100 %	100 %
	100 W	62,1 %	70,0 %	80,0 %
	150 W	65,4 %	66,7 %	84,6 %
	250 W	77,8 %	76,9 %	92,6 %
	400 W	85,2 %	85,2 %	96,3 %
Média ponderada		79,9 %	82,7 %	92,3 %

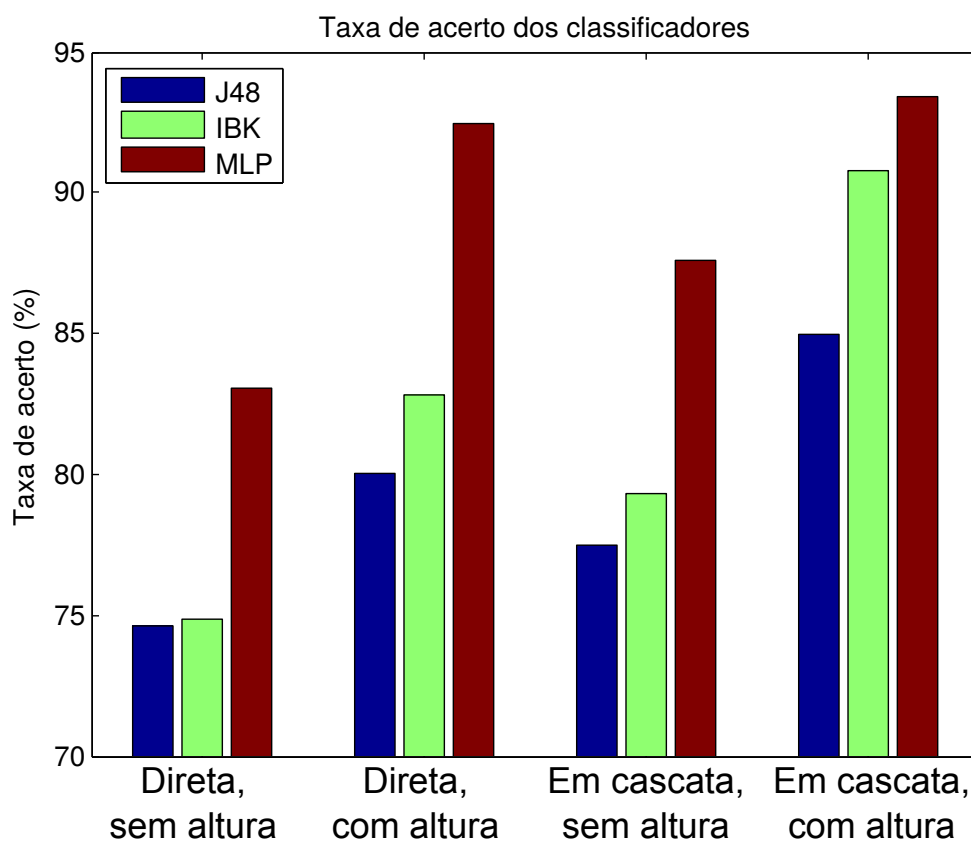


Figura 84 – Resultados médios de classificação, com e sem as medidas de altura da luminária

5.5 Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou a classificação das lâmpadas de IP por meio dos dados dos sensores radiométricos, objetivo final deste trabalho

Inicialmente, foi feita uma introdução sobre técnicas de reconhecimento de padrões.

Em seguida, foram descritos os três tipos de classificadores analisados neste trabalho: J48, IBK e MLP.

Em seguida, foram apresentadas duas alternativas de configuração do sistema de classificação. Na primeira, classificação direta, é utilizado um único classificador para identificar tipo e potência das lâmpadas diretamente. Na segunda, classificação em cascata, um classificador é responsável por identificar o tipo de lâmpada, enquanto que um segundo é responsável por identificar a potência.

Mais adiante, são apresentados os resultados de classificação, permitindo uma comparação entre os diversos tipos de classificadores e alternativas de configuração. Não só isso, foi possível verificar o efeito da altura no processo de classificação. A análise dos resultados levou às seguintes conclusões:

- O classificador MLP é o melhor tipo de classificador considerando todas as condições analisadas.
- O classificação em cascata apresenta em resultado global superior à classificação direta.
- A altura não influencia a identificação de tipo, mas exerce grande influência na classificação de potência.

Finalizando, o classificador MLP sem informação de altura apresentou uma taxa de acerto média de 87,5%, se mostrando adequando à esta aplicação. Todavia, é de grande interesse o incremento dessa taxa e a inserção da informação de altura possibilita isso, tendo atingido uma taxa de 93,4% de acerto, mostrando a validade de um estudo futuro para a medição automática desse parâmetro.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs o desenvolvimento de um sistema de identificação automática de tipo de tecnologia e potência elétrica dos pontos de IP. A finalidade desse sistema é permitir às concessionárias de energia elétrica a atualização do mapa dos pontos de IP, minimizando assim as perdas comerciais. Isso é necessário devido à transferência da responsabilidade do gerenciamento do parque de IP das concessionárias para os municípios, de acordo com a resolução nº 414 de 2010 da ANEEL. Esse sistema é fruto do projeto de P&D promovido pela concessionária EDP Escelsa e realizado pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em conjunto com a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), por meio do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO).

Inicialmente, foi apresentado o Sistema de Iluminação Pública brasileiro. Foram contemplados o histórico do sistema e uma descrição das principais tecnologias de iluminação utilizadas no presente, contextualizando o cenário no qual o sistema de identificação está inserido.

Em seguida foi mostrado o equipamento de medição construído. Iniciando com a apresentação de diversos conceitos de iluminação, foram descritos os sensores radiométricos, os circuitos de aplicação dos sensores, a plataforma microcontrolada, incluído hardware e *firmware*, o *software* de aquisição de dados e a metodologia de medição e avaliação dos dados, incluindo a estrutura de IP construída para os estudos do sistema.

A calibração do equipamento apresentado foi o assunto do Capítulo 4. De início foi abordado o sistema de calibração automática construído utilizando um iluminador de referência microcontrolado e a esfera integradora. Apesar de se conseguir excelentes ajustes com esse sistema dentro do ambiente de calibração, os parâmetros de ajuste obtidos não se mostraram eficazes ao operar no ambiente semicontrolado da estrutura IP. Devido a isso, foi apresentada uma nova abordagem utilizando a calibração em campo, que permitiu encontrar parâmetros de ajuste satisfatórios.

Por fim, no Capítulo 5 foi tratado do sistema de classificação. Foram discutidos três tipos de classificadores comparados neste trabalho: os algoritmos J48, IBK e MLP, todos eles implementados no *software* livre Weka. Foram propostas duas arquiteturas para o sistema de classificação: a primeira, chamada de classificação direta, em que um único classificador retorna de uma vez o tipo e a potência das lâmpadas; e a segunda, denominada classificação em cascata, que divide o trabalho em dois classificadores distintos: o primeiro encarregado de classificar o tipo e o segundo responsável por determinar a potência.

Ainda nesse capítulo, foram apresentados os resultados de classificação. Foram comparadas as duas arquiteturas propostas, dos três tipos de classificadores e a influência do parâmetro altura nas medições, comparações essas resumidas na Figura 84. De uma maneira geral, verificou-se que a classificação em cascata se mostrou superior à classificação

direta, em parte por ter-se obtido um classificador de tipo com exatidão de 100%. Verificou-se também que a rede neural MLP apresenta resultados significativamente melhores que os demais métodos, demonstrado seu maior poder de generalização. Por fim, verificou-se que a medição do parâmetro altura leva a um incremento considerável da taxa de acerto para qualquer um dos classificadores propostos, e, por esse motivo, deve-se buscar uma forma de se efetuar essa medição de forma confiável.

Diversos trabalhos futuros poderão ter como origem este estudo. O passo natural é a avaliação do sistema no parque de IP real, considerando diversos elementos que interferem na medição, como sujeira da luminária, tempo de utilização das lâmpadas, variação da tensão de alimentação das mesmas, entre outros. Especialmente em relação ao tempo de vida, um fator relevante que ele provoca é a alteração do espectro da lâmpada e verificar esse efeito no desempenho do sistema é primordial, sob pena de um sistema ajustado para funcionar bem em um parque de IP recente não trabalhar tão bem em um parque mais antigo. E, dada a influência da altura da luminária nas medições, o desenvolvimento de um método confiável de medição desse parâmetro se torna fundamental para o incremento da exatidão do sistema.

Em relação ao sistema de calibração, seria de grande interesse o aprimoramento do iluminador de referência para sua utilização neste processo. Isso não foi realizado neste trabalho devido à limitação de tempo do projeto. No entanto, esse esforço é válido devido ao maior controle das condições de operação desse sistema se comparado à estrutura IP, característica essa muito importante para qualquer sistema de calibração. Uma abordagem a ser estudada seria a tentativa de reprodução dos espectros das lâmpadas HPS, HPMV e HPMH por meio dos LEDs RGB do iluminador de referência, dimerizando a fonte de iluminação seguindo esse espectro.

Por fim, em relação ao sistema de classificação, algumas melhorias podem ser feitas em trabalhos futuros. Um primeiro passo seria a adoção de uma metodologia de seleção de parâmetros [58], que permite a redução da complexidade do classificador e o incremento de sua exatidão. De preferência, essa técnica deve ser empregada já com os dados de campo em mãos, para evitar o descarte de algum atributo relevante nesse ambiente. Uma outra possibilidade seria o estudo de funções não lineares dos dados que possam incrementar a exatidão do classificador, semelhante à utilização do cálculo das coordenadas cromáticas para a determinação do tipo de lâmpada medida.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA DO AUTOR

Artigos Publicados Em Conferências Internacionais

- SOARES, G. M.; ALMEIDA, A. G. B.; MENDES, R. M.; TEIXEIRA, E. C.; BRAGA, H. A. C.; MACHADO, M. N.; BROETTO, R. S.; CASTRO, M. V. H. B.; FILHO, H. O. GOMES; VAREJAO, F. M.; FILHO, J. G. PEREIRA; CANDEIA, A. B.; SOUSA, R. A. A. *Detection of street lighting bulbs information to minimize commercial losses*. In: 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), 2013, Wellington. 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST). p. 895-900.
- SOARES, G. M.; ALMEIDA, A. G. B.; MENDES, R. M.; TEIXEIRA, E. C.; BRAGA, H. A. C.; MACHADO, M. N.; BROETTO, R. S.; CASTRO, M. V. H. B.; GOMES FILHO, H. O.; VAREJAO, F. M.; PEREIRA FILHO, J. G.; CANDEIA, A. B.; SOUSA, R. A. A. *Performance evaluation of a sensor-based system devised to minimize commercial losses in street lighting networks*. In: 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2014, Montevideo. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014. p. 336-341.

Capítulo de livro publicado

- SOARES, G. M.; BRAGA, H. A. C.; ALMEIDA, A. G. B.; PEREIRA FILHO, J. G.; VAREJÃO, F. M. ; TEIXEIRA, E. C. *On the Use of Light Sensors and Pattern Recognition Techniques for Automated Detection of Street Lighting Lamps*. In: Alex Mason; Subhas Chandra Mukhopadhyay; Krishanthi Padmarani Jayasundera. (Org.). Sensing Technology: Current Status and Future Trends III. 01 ed. Zurich: Springer, 2014, v. 11, p. 67-92.

REFERÊNCIAS

- [1] DA COSTA, G. J. C. *Iluminação Econômica: cálculo e avaliação*. 4a. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006.
- [2] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa 414, de 9 de setembro de 2010*: Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.
- [3] BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 15 jan. 2015.
- [4] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa 587, de 10 de dezembro de 2013*: Altera o art. 218 da Resolução Normativa ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2013587.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.
- [5] ELETROBRÁS PROCEL. *Iluminação Eficiente: iniciativas da Eletrobrás Procel e parceiros*. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2013. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/>. Acesso em: 15 jan. 2015.
- [6] SOMEDA, C. *Electromagnetic Waves, Second Edition*. Taylor & Francis, 2006.
- [7] WIKIMEDIA. *Onda electromagnética : una oscilacion junto al campo eléctrico y al campo magnético para untar, vibrante modelo de dipolo*. 2007. Disponível em: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Onde_electromagnetique.svg. Acesso em: 21 jan. 2015.
- [8] WIKIMEDIA. *Espectro electromagnético*. 2005. Disponível em: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Espectro_eletromagnetico-pt.svg. Acesso em: 21 jan. 2015.
- [9] STARR, C.; EVERS, C.; STARR, L. *Biology: Concepts and Applications with Human Emphasis*. Brooks/Cole biology series. Thomson, Brooks/Cole, 2006.
- [10] WIKIMEDIA. *Sine waves of several frequencies*: Waves colored like the frequencies of the visible spectrum. 2007. Disponível em: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Sine_waves_different_frequencies.svg. Acesso em: 21 jan. 2015.
- [11] BASS, M. *Handbook of Optics: Devices, Measurements, and Properties*. McGRAW-HILL, 1995. v. 2.
- [12] BASS, M. *Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques, and Design*. McGRAW-HILL, 1995. v. 1.
- [13] JR., W. H. H.; BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. McGraw Hill Brasil.
- [14] SCHUBERT, E. F. *Light-emitting Diodes: Devices, Measurements, and Properties*. 2. ed. McGRAW-HILL, 2006.

- [15] WIKIMEDIA. *Small solid angle definition*. 2007. Disponível em: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/Small_solid_angle.svg. Acesso em: 21 jan. 2015.
- [16] DE ARAÚJO MOREIRA, V. *Iluminação & Fotometria: Teoria e aplicação*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- [17] DE ARAÚJO MOREIRA, V. *Iluminação Elétrica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- [18] RODRIGUES, C. R. B. S. *Contribuições ao Uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública*. 2012. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- [19] CREE. *Cree Edge Series Datasheet*. 2014. Disponível em: <http://www.cree.com/Lighting/Products/Outdoor/Streetlights/Cree-Edge-High-Output-TSP-Transportation-Mount>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [20] SÃO PAULO. Secretaria de Energia. *Iluminação Pública: guia do gestor*. 2013. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/519.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.
- [21] SANTANA, R. M. B. *Iluminação Pública: Uma abordagem gerencial*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Salvador, Salvador, 2010.
- [22] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Eficiência Energética: premissas e diretrizes básicas*. 2011. Disponível em: http://www.orcamentofederal.gov.br/projeto-esplanada-sustentavel/pasta-para-arquivar-dados-do-pes/Plano_Nacional_de_Eficiencia_Energetica.pdf. Acesso em: 18 jan. 2015.
- [23] ELETROBRÁS PROCEL. *PROCEL RELUZ: manual de instruções*. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/elb/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7BE6E59419-D24E-4DEF-9789-BAD359904390%7D&ServiceInstUID=%7BB4CC9D75-9E14-4CB5-9279-48991235CCE7%7D>. Acesso em: 18 jan. 2015.
- [24] ROSITO, L. H. Desenvolvimento da iluminação pública no brasil. *O Setor Elétrico*, São Paulo, v. 36, 2009.
- [25] WIKIMEDIA. *Diagram of a high pressure sodium vapor lamp*. 2006. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/File:High_pressure_sodium_lamp.svg. Acesso em: 18 jan. 2015.
- [26] WAYMOUTH., J. F. *Electric discharge lamps*. Monographs in modern electrical technology. M.I.T. Press, 1971.
- [27] GUEDES, L. F. A. *Reator eletrônico microcontrolado orientado a lâmpadas HID alimentado em onda quadrada de baixa frequência*. 2010.
- [28] WIKIMEDIA. *Spectrum of a typical High Pressure Sodium (HPS) lamp*. 2010. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/File:High_Pressure_Sodium_Lamp_Spectrum.jpg. Acesso em: 18 jan. 2015.

- [29] WIKIMEDIA. *Output Spectrum of a typical High Pressure Mercury Lamp*. 2010. Disponível em: http://images.ookaboo.com/photo/m/Mercury_Vapour_Lamp_Spectrum_m.jpg. Acesso em: 18 jan. 2015.
- [30] WIKIMEDIA. *Output Spectrum of a typical Metal Halide lamp*. 2010. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Metal_Halide_Lamp_Spectrum.jpg. Acesso em: 18 jan. 2015.
- [31] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, N. E. Q. I. I. *Vocabulário Internacional de Metrologia 2008: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados*. INMETRO, 2009.
- [32] OSRAM Opto Semiconductors. *BP 104 FAS Datasheet*. 2007. Disponível em: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic4/00083463_0.pdf/BP%20104%20FAS,%20Lead%20\(Pb\)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic4/00083463_0.pdf/BP%20104%20FAS,%20Lead%20(Pb)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf). Acesso em: 22 jan. 2015.
- [33] DONATI, S. *Photodetectors: Devices, Circuits and Applications*. Prentice Hall, 1999.
- [34] OSRAM Opto Semiconductors. *SFH 2430 Datasheet*. 2011. Disponível em: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00083291_0.pdf/SFH%202430,%20Lead%20\(Pb\)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00083291_0.pdf/SFH%202430,%20Lead%20(Pb)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf). Acesso em: 22 jan. 2015.
- [35] OSRAM Opto Semiconductors. *SFH 3400 Datasheet*. 2008. Disponível em: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00083354_0.pdf/SFH%203400,%20Lead%20\(Pb\)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00083354_0.pdf/SFH%203400,%20Lead%20(Pb)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf). Acesso em: 22 jan. 2015.
- [36] OSRAM Opto Semiconductors. *SFH 3410 Datasheet*. 2007. Disponível em: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic0/00083360_0.pdf/SFH%203410,%20Lead%20\(Pb\)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic0/00083360_0.pdf/SFH%203410,%20Lead%20(Pb)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf). Acesso em: 22 jan. 2015.
- [37] AMS austriamicrosystems AG. *TSL 13S Datasheet*. 2007. Disponível em: http://ams.com/eng/content/download/250404/976405/file/TSL13S_Datasheet_EN_v1.pdf. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [38] AMS austriamicrosystems AG. *TSL 261R Datasheet*. 2007. Disponível em: http://ams.com/eng/content/download/250429/976485/file/TSL261R_Datasheet_EN_v1.pdf. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [39] AMS austriamicrosystems AG. *TSL 2569 Datasheet*. 2008. Disponível em: http://ams.com/eng/content/download/250128/975597/file/TSL2569_Datasheet_EN_v1.pdf. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [40] AMS austriamicrosystems AG. *TCS 3414 Datasheet*. 2011. Disponível em: http://ams.com/eng/content/download/250258/975997/file/TCS3414_Datasheet_EN_v1.pdf. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [41] AMS austriamicrosystems AG. *Calculating Color Temperature and Illuminance using the TAOS TCS3414CS Digital Color Sensor*. 2009. Disponível em: <http://ams.com/eng/content/download/251586/993227/version/2>. Acesso em: 22 jan. 2015.

- [42] ANALOG. *ADXL345 Digital Accelerometer Datasheet*. 2013. Disponível em: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [43] ANALOG. *ADXL345 Digital Accelerometer Application Note*. 2010. Disponível em: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1077.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [44] TI Texas instruments. *TMS320F2802x Piccolo Datasheet*. 2014. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28027.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [45] ALBERTAZZI, A.; DE SOUZA, A. R. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. Barueri: Manole, 2008.
- [46] RIBEIRO, M. A. *Metrologia Industrial: Fundamentos da confirmação metrológica*. 3. ed. Salvador: Tek, 2003.
- [47] BENTLEY, J. P. *Principles of measurement systems*. 4. ed. Harlow: Pearson Education, 2005.
- [48] ATMEL. *ATmega48 8-bit Atmel Microcontroller*. 2014. Disponível em: <http://www.atmel.com/images/doc2545.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- [49] DEVYVER, P.; KITTLER, J. *Pattern Recognition: A Statistical Approach*. Prentice-Hall, 1982.
- [50] WITTEN, I. H.; FRANK, E.; HALL, M. A. *Data Mining*. 3. ed. Morgan Kaufmann, 2011.
- [51] QUINLAN, J. *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [52] QUINLAN, J. R. Induction of decision trees. *Machine Learning*, v. 1, n. 1, p. 81–106, 1986.
- [53] COVER, T.; HART, P. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Trans. on Information Theory*, v. 13, n. 1, p. 21–27.
- [54] AHA, D. W.; KIBLER, D.; ALBERT, M. K. Instance-based learning algorithms. *Machine Learning*, , n. 6, p. 37–66, 1991.
- [55] GU, F.; LIU, D.; WANG, X. Semi-supervised weighted distance metric learning for knn classification. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)*, v. 6, p. 406–409, 2010.
- [56] HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2. ed. Prentice Hall, 1999.
- [57] JAPKOWICZ, N.; SHAH, M. *Evaluating Learning Algorithms: A Classification Perspective*. Cambridge University Press, 2011.
- [58] KUDO, M.; SKLANSKY, J. Comparison of algorithms that select features for pattern classifiers. *Pattern Recognition*, v. 33, p. 25–41, 2000.