

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DA ILUMINAÇÃO A LED,
ELETRÔNICA E INCANDESCENTE**

Lucas Ferreira Coelho

Brasília, Dezembro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DA ILUMINAÇÃO A LED,
ELETRÔNICA E INCANDESCENTE**

Lucas Ferreira Coelho

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Marco Antônio Freitas do Egito Coelho, _____
ENE/UnB
Orientador

Prof. Adolfo Bauchspiess, ENE/UnB _____
Examinador Interno

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, ENE/UnB _____
Examinador Interno

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Canito e Ruth, que sempre me incentivaram em todos os aspectos, mas em especial a estudar, e esforçaram-se para oferecer as melhores oportunidades para que eu pudesse trilhar esse caminho.

Lucas Ferreira Coelho

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de Brasília por toda a estrutura e professores ofertados para meus estudos.

Agradeço ao professor Marco Egito, que além de orientar-me com sabedoria e tranquilidade, concordou em realizar este trabalho em duas etapas, antes e depois do meu intercâmbio.

Agradeço aos meus pais, Canito e Ruth, e aos meus irmãos, Henrique e Juliano, por todo apoio e pelo ambiente amoroso e tranquilo existente em nosso lar.

Agradeço à minha namorada, Fernanda, pelo apoio incondicional e carinho em todos os momentos.

Agradeço à todos meus amigos, sobretudo os companheiros de curso que me acompanharam nesta jornada.

Lucas Ferreira Coelho

RESUMO

A comparação da eficiência energética entre lâmpadas envolve a medição da potência consumida e o fluxo luminoso total emitido por elas. Esta última medição é feita, nos laboratórios próprios com uma esfera integradora, mas na falta dela pode-se medir de maneira indireta a partir da iluminância ou da intensidade luminosa. Este trabalho apresenta dois métodos para medir o fluxo luminoso utilizando um luxímetro e as medidas fornecidas em lux. Aplicando esses métodos, um estudo de caso com doze lâmpadas foi realizado comparando os valores de eficiência energética delas.

Palavras Chave: Eficiência energética, Fluxo luminoso, Iluminância, Intensidade luminosa, Método indireto, Esfera Integradora, Luxímetro.

ABSTRACT

Comparing the energy efficiency between lamps involve measuring the consumed power and the total luminous flux of them. The latter measurement is made in specialized laboratories using an integrating sphere, but in the lack of it, it is also possible to calculated indirectly from the illuminance or light intensity values. This report presents two methods to measure the luminous flux using a lux meter and the given lux measures. Applying these methods, a case study using twelve lamps was conducted comparing the energy efficiency of them.

Keywords: Energy efficiency, Luminous flux, Illuminance, Luminous intensity, indirect method, Integrating sphere, Lux meter.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	INTRODUÇÃO GERAL	1
1.2	MOTIVAÇÃO	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS	4
2.2	CATEGORIAS DE LÂMPADAS	6
2.2.1	LÂMPADA INCANDESCENTE	6
2.2.2	LÂMPADAS DE DESCARGA	7
2.2.3	LÂMPADAS LED	10
2.3	LUMINÁRIAS	12
2.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS LÂMPADAS	13
2.4.1	POTÊNCIA	13
2.4.2	FLUXO LUMINOSO	15
3	MÉTODOS	21
3.1	INTRODUÇÃO	21
3.2	MEDIÇÃO DE POTÊNCIA	22
3.3	MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 1	23
3.4	MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 2	27
3.5	ANÁLISE ECONÔMICA	29
4	RESULTADOS	31
4.1	INTRODUÇÃO	31
4.2	MEDIÇÃO DE POTÊNCIA	34
4.3	MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 1	36
4.4	MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 2	37
4.5	MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	38
4.6	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	40
4.7	ANÁLISE ECONÔMICA	41
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	43
5.1	CONCLUSÕES	43
5.2	TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ANEXOS	47
I RESULTADO - FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 1	48
II RESULTADO - FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 2	54

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação da intensidade luminosa.....	5
2.2	Lâmpada incandescente tradicional.....	6
2.3	Lâmpada incandescente halógena.....	7
2.4	Funcionamento das lâmpadas de descarga.....	8
2.5	Lâmpada fluorescente tubular.....	9
2.6	Lâmpada fluorescente compacta.....	9
2.7	Outras lâmpadas de descarga.....	10
2.8	Lâmpada LED - 1.....	10
2.9	Lâmpada LED - 2.....	11
2.10	Lâmpada LED - 3.....	11
2.11	LED SMD.....	12
2.12	Esquemático do circuito.....	13
2.13	Integração numérica - Método dos trapézios repetidos.....	14
2.14	Esfera integradora de Ulbricht.....	15
2.15	Esquemáticos da esfera integradora de Ulbricht.....	16
2.16	Possível envoltório esférico da fonte luminosa.....	18
2.17	Medida indireta do fluxo luminoso.....	18
2.18	Segmentos esféricos - Variação angular.....	19
2.19	Área do segmentos esférico.....	19
3.1	Instrumentos de medida.....	21
3.2	Circuito utilizado na medição da potência.....	22
3.3	Caixa utilizada nas medições de fluxo luminoso.....	24
3.4	Esquemático das medições em quatro diferentes posições.....	24
3.5	Variações importantes durante a medição.....	25
3.6	Envoltório imaginário - método 1.....	26
3.7	Esquemático da montagem - método 2.....	27
3.8	Envoltório imaginário - método 2.....	29
4.1	Lâmpadas incandescentes tradicionais.....	32
4.2	Lâmpadas fluorescentes compactas.....	32
4.3	Lâmpadas LED - 4.....	33
4.4	Lâmpadas LED - 5.....	33
4.5	Lâmpadas incandescentes tradicionais.....	35
4.6	Lâmpadas fluorescentes compactas.....	35
4.7	Lâmpadas LED - 6.....	35
4.8	Lâmpadas LED - 7.....	35

LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplos NBR5413	4
3.1	Valores reais das resistências	23
3.2	Constante zonal - Método 1	26
3.3	Constante zonal - Método 2	28
4.1	Especificações - Lâmpadas testadas ¹²	31
4.2	Potência real e nominal - Lâmpadas testadas ³	34
4.3	Fluxo luminoso - Método 1 - OSRAM 40W	37
4.4	Fluxo luminoso - Método 2 - OSRAM 40W	38
4.5	Fluxo luminoso - Comparação de resultados ⁴	39
4.6	Eficiência energética	40
4.7	Preço e eficiência.	41
4.8	Consumo e custo de operação por hora.	41
4.9	Comparação 2x2 - GOLDEN	42
4.10	Comparação 2x2 - PHILIPS 14W	42
4.11	Comparação 2x2 - OUROLUX 15W	42
I.1	Fluxo luminoso - Método 1 - OSRAM 40W	48
I.2	Fluxo luminoso - Método 1 - PHILIPS 40W	48
I.3	Fluxo luminoso - Método 1 - CARREFOUR 60W	49
I.4	Fluxo luminoso - Método 1 - PHILIPS 14W	49
I.5	Fluxo luminoso - Método 1 - OUROLUX 15W	50
I.6	Fluxo luminoso - Método 1 - LUZ SOLLAR 21W	50
I.7	Fluxo luminoso - Método 1 - PHILIPS 9.5W	51
I.8	Fluxo luminoso - Método 1 - GOLDEN 5W	51
I.9	Fluxo luminoso - Método 1 - LSC 6W	52
I.10	Fluxo luminoso - Método 1 - CHINESA 3X1W	52
I.11	Fluxo luminoso - Método 1 - CHINESA OVO	53
I.12	Fluxo luminoso - Método 1 - CHINESA MILHO	53
II.1	Fluxo luminoso - Método 2 - OSRAM 40W	54
II.2	Fluxo luminoso - Método 2 - PHILIPS 40W	55
II.3	Fluxo luminoso - Método 2 - CARREFOUR 60W	55
II.4	Fluxo luminoso - Método 2 - PHILIPS 14W	56
II.5	Fluxo luminoso - Método 2 - OUROLUX 15W	56
II.6	Fluxo luminoso - Método 2 - LUZ SOLLAR 21W	57
II.7	Fluxo luminoso - Método 2 - PHILIPS 9.5W	57
II.8	Fluxo luminoso - Método 2 - GOLDEN 5W	58
II.9	Fluxo luminoso - Método 2 - LSC 6W	58

II.10 Fluxo luminoso - Método 2 - CHINESA 3X1W.....	59
II.11 Fluxo luminoso - Método 2 - CHINESA OVO.....	59
II.12 Fluxo luminoso - Método 2 - CHINESA MILHO.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
C	Consumo energético	$[kWH]$
Co	Custo de operação	$[R\$/kWH]$
Dp	Diferença de preço	$[R\$]$
E	Iluminância	$[lux]$ ou $[lm/m^2]$
Ec	Economia por hora	$[R\$/H]$
f	Frequência	$[Hz]$
h	Altura do segmento esférico	$[m]$
h_t	Altura do trapézio	$[s]$
I	Intensidade luminosa	$[cd]$
$i(t)$	Corrente instantânea	$[A]$
L	Luminância	$[cd/m^2]$
P	Potência	$[W]$
Pr	Preço da lâmpada	$[R\$]$
$p(t)$	Potência instantânea	$[W]$
R	Raio da esfera	$[m]$
r	resistência	$[\Omega]$
T	Período onda periódica	$[s]$
t	tempo de recuperação do investimento	$[H]$
$v(t)$	Tensão instantânea	$[V]$
x	Rotação da lâmpada	$[^\circ]$
Z	Impedância	$[\Omega]$

Símbolos Gregos

η	Eficiência Energética	$[lm/W]$
ϕ	Fluxo luminoso	$[lm]$

Grupos Adimensionais

k	constante zonal
m	Número total de trapézios
ρ	Fator ou índice de reflexão
Z	Zona esférica

Subscritos

<i>E</i>	Emitido
<i>i</i>	número de cada divisão
<i>n</i>	número da zona
<i>M</i>	Medido

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FFL	Fator de fluxo luminoso
<i>E27</i>	Soquete Edson de <i>27mm</i>
LED	Light Emitting Diode
IRC	Índice de reprodução de cor

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A questão energética sempre foi e continuará sendo de primordial importância na vida dos seres humanos por um longo tempo. A busca por fontes de energia, em qualquer uma de suas formas como química, térmica e mais recentemente elétrica, bem como os meios de transportá-la e armazená-la, por exemplo, atrai a atenção do homem a milhares de anos. Atualmente, o constante incremento na quantidade de energia demandada e os danos provocados ao meio ambiente devido a questão energética estão mais em voga.

Historicamente, a energia consumida no mundo cresce a cada ano, em especial, o consumo de energia elétrica aumentou mais de duas vezes e meia entre 1980 e 2011 [1]. Os motivos desse constante incremento são vários, por exemplo, o crescimento da população mundial, o grande número de pessoas que saíram da pobreza e começaram a consumir energia, o crescente uso de aparelhos elétricos e eletrônicos. Todos esses pontos não devem se modificar em um curto e até mesmo médio prazo, visto que a população mundial tende a ser cada vez maior, o modo de vida das pessoas está cada vez mais pautado na tecnologia e o número de pessoas em situação de miséria ainda é enorme. Portanto, pode-se concluir que a demanda energética mundial continuará crescendo e, para atendê-la, o mesmo deverá ocorrer com a produção de energia. Nesse sentido, novos empreendimentos para geração estão em desenvolvimento em todo o planeta, bem como no Brasil, com a construção da usina hidroelétrica de Belo Monte e os parques eólicos na região Nordeste, por exemplo.

Concomitantemente, a questão da preservação ambiental é bastante discutida. É ponto praticamente pacífico que a ação humana, consumindo indiscriminadamente recursos naturais e eliminando resíduos de maneira descuidada, está provocando uma gradativa degradação do meio ambiente com graves consequências como o aumento da temperatura ambiente, o derretimento das geleiras, a devastação da flora e da fauna. A geração e o consumo de energia são duas das ações que mais impactam a natureza, por exemplo com a emissão de resíduos tanto nas usinas térmicas como na queima de combustíveis fósseis nos carros e indústrias. Até mesmo fontes de energia renováveis são motivos de debate quanto ao impacto ambiental. As usinas hidrelétricas inundam uma vasta área para compor seu reservatório de água, já em relação a energia solar questiona-se o considerável gasto energético durante a produção dos painéis solares. Inúmeras pesquisas são realizadas a fim de solucionar ou ao menos reduzir esse impacto, tentando por exemplo, aumentar o rendimento dos painéis solares, das turbinas eólicas e até mesmo desenvolver novas fontes energéticas como a fusão de hidrogênio.

Existe, porém, uma outra abordagem que contribui para a solução destes dois problemas atuais: a eficiência energética, isto é: ” atividade que procura otimizar o uso das fontes de energia, consiste em usar menos energia para fornecer a mesma quantidade de valor energético” [2]. A busca por uma melhor eficiência energética pode acontecer em qualquer setor, visto que nada mais é do que tentar realizar um mesmo processo gastando menos energia, e, conseqüentemente, mitigando a necessidade de gerar-se mais energia bem como os impactos ambientais. As maneiras de implementá-la são várias, entre elas está o aprimoramento dos processos de conversão de energia, a reutilização de energia que seria desperdiçada, a

otimização das condições de funcionamento dos equipamentos e a substituição de produtos por similares mais eficientes. Este trabalho é focado neste último quesito, mais especificamente na substituição de lâmpadas buscando uma boa iluminação com um menor gasto de energia.

1.2 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de produtos mais eficientes é uma busca atual do mercado, visto que a população em geral está conscientizando-se de que esses equipamentos contribuem tanto para a economia de energia elétrica como para a redução do impacto ambiental e buscando as melhores opções neste quesito. É possível verificar essa mudança também no mercado de iluminação. Desde 1879, quando Thomas Edison desenvolveu a primeira lâmpada incandescente comercializável, as lâmpadas passaram por inúmeras mudanças objetivando tanto melhorar a quantidade de luz irradiada como o rendimento energético.

Nos últimos anos em especial, novos produtos estão sendo lançados prometendo menor consumo, maior duração e até mesmo uma vantajosa economia financeira para o consumidor. Mas até onde isso é verdade? Podemos confiar nas especificações de empresas cujo principal objetivo é vender seus produtos? Qual opção devemos escolher para proteger o meio ambiente? E qual proporcionará um menor custo durante toda sua vida útil? Foram essas questões, entre outras, que motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS DO PROJETO

Existem tantos tipos de lâmpadas disponíveis no mercado, inclusive com tecnologias variadas no processo de geração da luz, que a escolha pode tornar-se complicada. Este trabalho tem como objetivo facilitar este processo ou, ao menos, esclarecer quais aspectos devem ser considerados e quais são mais importantes.

Para isso, dois pontos principais deverão ser desenvolvidos: elaborar um método que permita comparar de maneira válida a eficiência energética das lâmpadas e, em seguida, aplicá-lo a alguns exemplares. Após a análise desses dois pontos, tenciona-se chegar a conclusão quanto as melhores escolhas de iluminação disponíveis ao consumidor.

1.4 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO

A fim de apresentar este trabalho da melhor maneira possível, optou-se pela seguinte estrutura do texto:

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do estudo com alguns conceitos importantes nesta área e os equipamentos que serão investigados.

No capítulo 3, exibi-se os métodos que serão empregados para realizar os experimentos de medição de potência e fluxo luminoso, explicando sucintamente como foram feitas as montagens.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos a partir dos experimentos e as análises desses valores.

Finalmente, o capítulo 5 traz uma revisão do que foi desenvolvido, as conclusões sobre o estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS

O ramo da ciência que estuda e avalia a luz é chamado de fotometria. Para avançar no estudo da iluminação, é essencial a compreensão de alguns conceitos e grandezas bastante utilizados nessa ciência:

- Fluxo luminoso [ϕ]: Representa uma potência luminosa emitida ou observada, ou ainda, representa a energia emitida ou refletida, por segundo, em todas as direções, sob a forma de luz. Sua unidade é o lúmen [lm] [4].
- Difusor perfeito: Uma superfície que emite ou reflete o fluxo luminoso de tal forma que a luminância é a mesma de qualquer ângulo de visão. É também chamada de Lambertiana [7].
- Eficiência Energética [η]: é o quociente entre o fluxo luminoso emitido em lumens, pela potência consumida expressa em watts [lm/W] [4]. Também chamada de eficácia luminosa.
- Fator ou índice de reflexão [ρ]: razão entre o fluxo luminoso refletido e o incidente. Está relacionado às cores e acabamentos da superfície iluminada [6]. Também chamado de refletância.
- Iluminância [E]: medida em [lux] ou [lm/m^2], é a grandeza ligada à densidade superficial de fluxo luminoso. Refere-se a superfície receptora da fonte [4].

Ou seja, é a quantidade de fluxo luminoso dividido pela área da superfície que a recebe. Constitui a grandeza mais importante em todos os cálculos de iluminação. No Brasil, a ABNT é o órgão responsável por regulamentar este quesito. A NBR5413 estabelece os valores de iluminâncias médias mínimas em serviço para iluminação artificial em interiores, onde se realizem atividades de comércio, indústria, ensino, esporte e outras [5]. À fim de facilitar a compreensão do leitor em relação à escala de lux , segue a pequena tabela 2.1 com três exemplos de iluminâncias médias mínimas para diferentes situações:

Idade	< 40anos	40a55anos	> 55anos
Velocidade / Precisão	Sem Importância	Importante	Crítica
Refletância de fundo	Superior a 70%	30 a 70%	Inferior 30%
Corredores e escadas	75	100	150
Cozinha de hotel	100	150	200
Sala de operações médicas	300	500	750

Tabela 2.1: Exemplos NBR5413

- Índice de reprodução de cor [*IRC*]: É a correspondência entre a cor real do objeto e sua aparência quando submetido à fonte de luz. Quanto maior o *IRC* menor a distorção das cores dos objetos. O valor máximo possível é 100% [6].
- Intensidade luminosa [*I*]: é definida como a razão do fluxo luminoso $d\Phi$, que sai de uma fonte e se propaga no elemento de ângulo sólido $d\omega$, que contém a direção considerada, para esse elemento de ângulo sólido. Sua unidade é a candela[*cd*] [4]. Ver figura 2.1.

$$I_{\alpha} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{\Phi}{\omega} = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

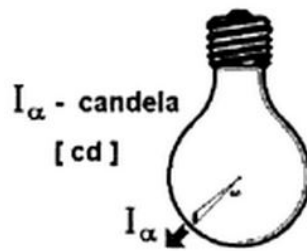


Figura 2.1: Representação da intensidade luminosa.

- Luminância [*L*]: é a razão da intensidade luminosa dI , incidente num elemento de superfície que contem o ponto dado, para a área dA aparente vista pelo observador, quando esta área tende a zero. Sua unidade é [*cd/m*²] [4].
- Luxímetro: aparelho de medição constituído por uma fotocélula, que é excitada pela luz e gera uma corrente elétrica. Essa corrente é transformada, por meio de uma escala apropriada, em lux ou ft-cd [4].
- Luz: é uma radiação eletromagnética capaz de produzir sensação visual [3].
- Temperatura de cor correlata: é a aparência de cor da fonte luminosa que pode ser branca azulada quando possui temperatura elevada (6.100K) ou amareladas quando apresentam baixa temperatura (2.700K) [6].
- Vida mediana: Vida atingida em horas no instante em que 50% das lâmpadas ensaiadas se mantêm acessas [6].
- Vida útil: Tempo em horas após o qual se perde 30% do fluxo luminoso nominal inicial [6].

2.2 CATEGORIAS DE LÂMPADAS

Existem diferentes categorias de lâmpadas disponíveis no mercado, cada uma com características próprias. Uma breve explanação sobre elas será apresentada, focando, em especial, naquelas mais utilizadas no interior de residências: incandescentes, fluorescentes e LED.

2.2.1 Lâmpada Incandescente

A primeira lâmpada incandescente comercializada no mundo foi desenvolvida por Thomas Alva Edison em 1879. Desde então, ela passou por poucas mudanças. Ela consistia, basicamente, de um filamento de bambu carbonizado no interior de um bulbo de vidro a vácuo. Posteriormente, foi utilizado filamento de carbono, até que, por volta de 1909, conseguiu-se trabalhar o tungstênio para a elaboração de filamentos uniformes. Desde então este material é considerado o mais adequado, principalmente pelo seu elevado ponto de fusão (3655 K) e sua característica de emissão [3].

O funcionamento, resumidamente, da-se quando o filamento é aquecido pela passagem de corrente elétrica (efeito joule) e gera luz. Uma grande vantagem dessa lâmpada é que o índice de reprodução de cores chega próximo a 100%. A consequência indesejada, porém, é que uma grande parte da energia é desperdiçada na forma de calor. Existem dois tipos principais de lâmpadas incandescentes:

2.2.1.1 Incandescente Tradicional

Neste tipo, o bulbo é preenchido com gás inerte ou se estabelece o vácuo a fim de evitar a oxidação do filamento. Apresenta, usualmente, um formato de pêra e uma base de rosca tipo Edison para facilitar a ligação com as instalações elétricas. Resiste a temperaturas de até 250°C , a vida útil dessa lâmpada comercial é da ordem de 1000 horas, mas pode ser reduzida caso os acionamentos sejam muito frequentes [3]. Exemplo na figura 2.2.

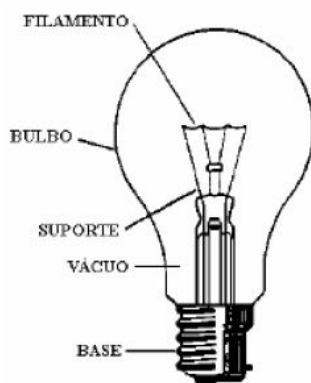


Figura 2.2: Lâmpada incandescente tradicional.

2.2.1.2 Incandescente Halógena

A grande diferença é que gases halógenos (iodo ou bromo) são introduzidos no bulbo e combinam com as partículas de tungstênio desprendidas do filamento. Esta combinação, somada à corrente térmica dentro da lâmpada, faz essas partículas se depositarem de volta no filamento, formando o ciclo regenerativo do halogênio [3]. Essa característica resulta em uma série de vantagens com relação a incandescente comum, entre elas:

- Luz mais branca, brilhante e uniforme durante toda a vida;
- Maior eficiência energética;
- Vida útil mais longa, variando de 2000 a 4000 horas;
- Dimensões menores.

Emitem mais radiação ultravioleta, porém não oferecem perigos a saúde. São largamente utilizadas nos faróis de carros, mas não o são em residências. Ver figura 2.3.



Figura 2.3: Lâmpada incandescente halógena.

2.2.2 Lâmpadas de Descarga

Desconsiderando pequenas variações, esse tipo de lâmpada é formado por um invólucro translúcido, cujo interior é preenchido, a certa pressão, por um mistura de gás(es) inerte(s) com vapor(es) metálicos e por dois eletrodos. Ao aplicar-se uma tensão nesses eletrodos, verifica-se uma emissão de elétrons do eletrodo negativo para o eletrodo positivo que, durante o percurso, excitam os átomos do vapor metálico. Quando estes átomos retornam ao seu estado de menor energia ocorre a liberação de radiação ultravioleta. Essa energia não é visível, mas ao entrar em contato com a pintura fluorescente do invólucro produz a

radiação visível. Suas características de cor e eficácia são determinadas pela composição e espessura do pó fluorescente [3],[8]. Vide figura 2.4

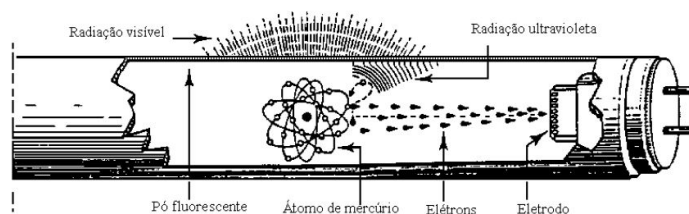


Figura 2.4: Funcionamento das lâmpadas de descarga.

Para funcionar corretamente, esse tipo de lâmpada requer uma tensão mínima para romper a rigidez dielétrica da mistura gasosa e estabelecer o fluxo de elétrons. Além disso, em uma descarga de corrente elétrica através de um meio gasoso, como é o caso, a corrente causa a diminuição da resistência. Isto porque como mais elétrons e íons fluem através de uma área em particular, eles se chocam com mais átomos que liberam elétrons e criam mais partículas carregadas. Desta maneira, a corrente aumenta sozinha em uma descarga elétrica através do gás. Se a corrente não for controlada, ela pode danificar os vários componentes elétricos. Por conta dessas duas características, faz-se necessário o uso de um reator que realiza a partida da lâmpada e limita a corrente. Há diversos modelos de reatores que podem ser utilizados nas lâmpadas à descarga, como de indutância, capacitância, resistência e eletrônico. Os mais utilizados atualmente são os de indutância, também chamados eletromagnéticos, e os eletrônicos. A NBR5114 regula no país o desempenho de reatores em lâmpadas fluorescentes tubulares[9].

Os reatores eletromagnéticos empregam uma bobina ou um autotransformador e são classificados de acordo com seu circuito de partida e fator de potência. São largamente utilizados no mundo, principalmente devido ao seu baixo custo, alta durabilidade e resistência tanto às condições ambientais como à falhas nas instalações. Apresentam, contudo, algumas desvantagens, em especial, um baixo rendimento, baixa densidade de potência, peso elevado e uma possível emissão de ruído.

Outra opção também muito utilizada é o reator eletrônico que exerce a mesma função, mas de uma maneira diferente, aumentando a frequência de operação de 50 ou 60Hz (frequência da rede) para algumas dezenas de kHz. Com isso, obtém-se uma diminuição no consumo de energia, um aumento na vida útil da lâmpada, eliminação do ruído, entre outras vantagens. Essa opção é mais complexa e tem um custo inicial maior, mas que pode ser recuperado na economia energética obtida durante a operação. Esses reatores são divididos de acordo com o tipo de partida, fator de potência e quantidade de lâmpadas. A NBR1447 e NBR14418 regulam a produção dos reatores eletrônicos [9].

Um fator importante do reator é o fator de fluxo luminoso (FFL), pois ele é quem determina o fluxo luminoso nominal emitido pela lâmpada, ou seja, a mesma lâmpada pode emitir diferentes fluxos luminosos dependendo do FFL do reator utilizado.

Existem várias lâmpadas que se enquadram nessa categoria, entre elas serão destacadas:

2.2.2.1 Lâmpadas Fluorescentes Tubulares

Foi desenvolvida na década de 1940 e atualmente é largamente empregada na iluminação de interiores. Utiliza vapor de mercúrio em baixa pressão para emitir a radiação ultravioleta [3]. O nome deve-se ao formato tubular do invólucro. Ver figura 2.5.



Figura 2.5: Lâmpada fluorescente tubular.

2.2.2.2 Lâmpadas Fluorescentes Compactas

Foi introduzida no mercado no início da década de 1980 e também utiliza o mercúrio em sua composição. Sua grande vantagem é que já possui o reator imbutido na base, em geral do tipo rosca Edison, e pode substituir as lâmpadas incandescentes sem necessidades de alterações nas instalações. Exemplo na figura 2.6.



Figura 2.6: Lâmpada fluorescente compacta.

2.2.2.3 Outras alternativas

Existem ainda outras lâmpadas que se enquadram nessa categoria, porém elas não são muito utilizadas na iluminação de interiores. Apenas citaremos algumas aqui.

As lâmpadas de vapor de sódio que emitem um fluxo luminoso amarelo, característico da descarga nesse metal, e que, sendo monocromático, distorce as cores. Por essa razão, é mais utilizada em ruas, túneis e auto-estradas e raramente em residências. Como na figura 2.7(a).

Há também as lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão, por volta de 2 a 4 atm. Elas emitem uma luz branca com tonalidade levemente esverdeada, porém apresentam eficácia luminosa relativamente baixa. São mais utilizadas na iluminação pública urbana [3]. Ver figura 2.7(b).



(a) Lâmpada vapor de sódio.



(b) Lâmpada vapor de mercúrio.

Figura 2.7: Outras lâmpadas de descarga.

2.2.3 Lâmpadas LED



Figura 2.8: Lâmpada LED - 1.

A lâmpada LED, do inglês Light Emitting Diode, é a tecnologia mais recente em termos de iluminação. Ela foi empregada pela primeira vez para emitir luz visível em 1962 e na década seguinte tornou-se comercialmente viável, mas sendo apenas uma luz de balizamento devido ao pequeno fluxo luminoso emitido, problema que começou a ser resolvido nos anos 80. O último passo para que isso acontecesse foi a invenção do LED azul, uma vez que a luz branca é formada juntando-o como os tradicionais LED vermelho e verde já produzidos há algum tempo.

A cor, ou comprimento de onda da luz emitida, depende do material semicondutor usado na camada ativa. Os inventores do LED azul, alcançaram esse feito construindo diversas camadas do semicondutor nitreto de gálio (GaN) misturado com índio (In) e alumínio (Al), como na figura 2.9. Essa descoberta rendeu aos três pesquisadores japoneses o prêmio nobel de física de 2014. Finalmente, já no século XXI, os "Power LED's" entraram no mercado alcançando patamares de até 50W.

A emissão de luz acontece no chip semicondutor, o principal componente do LED. É resultado da passagem de uma corrente elétrica através de uma junção PN com uma camada ativa. O lado P é positivo e o N é negativo. Ao se estabelecer uma diferença de potencial, elétrons entram em movimento e locomovem-se do lado P para o N, se interagindo, liberando fótons e criando o feixe luminoso. Ver figuras 2.9 e

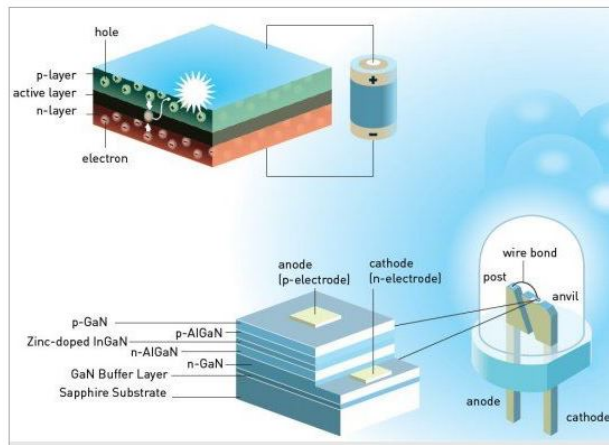


Figura 2.9: Lâmpada LED - 2.

2.10.

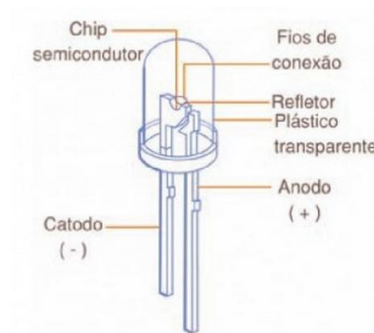


Figura 2.10: Lâmpada LED - 3.

O chip é o que determina a qualidade do LED, sendo responsável pela luz emitida, vida útil, comportamento ao longo do tempo e sensibilidade a variações de temperatura. As fabricantes de chips de melhor qualidade ultimamente são Nichia, CREE, EPSTAR e BRIDFELUX, sendo que a primeira é focada em LED para televisão.

Geralmente, os LEDs vermelhos, verdes e amarelos precisam de uma voltagem entre 2.2 e 2.4V, enquanto os azuis e os brancos brilhantes necessitam de mais do que 3.4V.

É comum hoje em dia a fabricação de LED SMD, que significa dispositivos montados em superfície e tem como objetivo reduzir o espaço ocupado pelos tradicionais componentes. Esses LED são especificados por 4 dígitos como 1210, onde os dois primeiros representam o comprimento e os outros a largura, em polegadas. Ver figura 2.11. A maioria das lâmpadas a LED utilizam o SMD.

Este tipo de fonte apresenta uma série de vantagens que a tornam uma candidata em potencial à lâmpada do futuro.

- Emissão de luz direcional;
- Resistência mecânica elevada, visto que não possui vidro nem filamentos delicados;



Figura 2.11: LED SMD.

- Não contém mercúrio;
- Irradia menos calor;
- Não emite radiação ultravioleta e infravermelha;
- Acionamento imediato;
- Vida útil não é afetada pelo número de acionamento diário.

Além disso, ela é considerada a de maior eficiência energética, o que será averiguado neste trabalho. Existem, porém, algumas características negativas que ainda pesam contra sua escolha. A principal delas é o alto custo de investimento inicial, muito maior do que seus concorrentes. É notória, também, sua dependência em relação a temperatura de operação, que quando muito elevada pode levar a falha e redução sensível da vida útil. Finalmente, existe uma variação na percepção das cores, pois o espectro do LED branco se difere da luz do sol [6]. Percebe-se nos últimos anos um claro desenvolvimento no sentido de mitigar essas falhas, o que resulta em uma grande vantagem a lâmpada LED.

2.3 LUMINÁRIAS

Na maioria dos casos a lâmpada não é ligada diretamente a fiação elétrica. Utilizam-se comumente luminárias. Entre as funções da luminária está proporcionar suporte à lâmpada, controlar e distribuir a luz da lâmpada, facilitar a instalação e a conservação, ter uma aparência agradável, entre outras. Logo, a luminária interfere diretamente na eficiência da lâmpada, tanto positivamente, ao direcionar e distribuir a luz da lâmpada, como negativamente, ao reduzir ou interromper a passagem da luz.

Neste trabalho, as análises serão feitas sem a utilização de luminárias, almejando uma comparação apenas entre as lâmpadas, sem interferências positivas ou negativas. Claro que, em muitos casos, uma luminária pode ser útil e melhorar a iluminação do ambiente porém essa questão excede o objetivo deste estudo.

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS LÂMPADAS

No passado, quando as lâmpadas incandescentes predominavam, era comum ouvir leigos dizendo que precisavam de uma lâmpada forte, de $60W$, por exemplo. A lógica nesse pensamento era relacionar a potência da lâmpada com a capacidade de iluminação. Essa analogia, apesar de imprecisa, funcionava bem. Entretanto, com o advento das fluorescentes e mais recentemente das LED's, que empregam tecnologias totalmente diferentes, a comparação utilizando apenas a potência nominal torna-se totalmente insignificante.

Uma maneira confiável e coerente do ponto de vista teórico de se estabelecer essa comparação é utilizar a eficiência energética. Conforme apresentado no tópico 2.1, esse conceito, também chamado de eficácia luminosa, relaciona de uma só vez a capacidade de iluminação e a potência consumida, permitindo classificar as lâmpadas no quesito rendimento. A fim de obter a eficácia luminosa, é necessário, primeiramente, obter tanto a potência elétrica como o fluxo luminoso de cada lâmpada. A seguir, abordaremos cada uma dessas etapas:

2.4.1 Potência

O cálculo da eficiência energética considera a potência elétrica que efetivamente é absorvida pela lâmpada para ser transformada em luz. Na teoria elétrica, esta potência é denominada média ou ativa. A sua medição não é imediata, mas segue alguns passos.

O circuito elétrico utilizado nos experimentos é bem simples, formado pela lâmpada, rede elétrica e a conexão entre elas. Ele pode ser esquematizado como uma fonte de tensão alternada ligada a uma impedância "Z", como na figura 2.12.

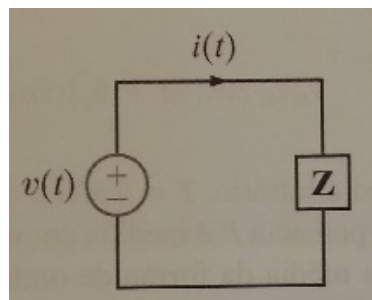


Figura 2.12: Esquemático do circuito.

Utilizando um osciloscópio, é possível medir a tensão instantânea $v(t)$ e a corrente instantânea $i(t)$ na lâmpada que são funções do tempo por se tratar de uma fonte alternada. Multiplicando esses termos, é obtida a potência instantânea.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.1)$$

A partir da potência instantânea, a potência média ou ativa pode ser calculada diretamente. O valor médio de qualquer forma de onda periódica, como é o caso em 2.1, é obtido integrando-se a função ao

longo de um período completo e, em seguida, dividindo-se o resultado pelo período.

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t)i(t) dt \quad (2.2)$$

Essa equação 2.2 poderia então ser utilizada para determinar o valor da potência ativa e posteriormente no cálculo da eficiência energética. Entretanto, as expressões $v(t)$ e $i(t)$ não são conhecidas. Seria possível, dados os parâmetros da rede, determinar a função da tensão e também, considerando as lâmpadas incandescentes impedâncias puramente resistivas, a função da corrente. Porém, para as lâmpadas LED's e fluorescentes compactas não é fácil determinar as expressões de $i(t)$. A resolução algébrica de 2.2 portanto não é viável. Entretanto, ainda é possível solucioná-la de maneira numérica.

Sabendo os valores tanto da tensão como da corrente para um número suficientemente grande de instantes dentro de um período e usando 2.1, a potência instantânea $p(t)$ é determinada numericamente. Em seguida, conforme a equação 2.2, $p(t)$ deve ser integrada e dividida pelo período. A integração numérica pode ser feita pelo método dos trapézios repetidos, que divide a função $p(t)$ em vários segmentos de reta e em seguida calcula as áreas dos trapézios formados pelos segmentos e o eixo "x", conforme a figura 2.13.

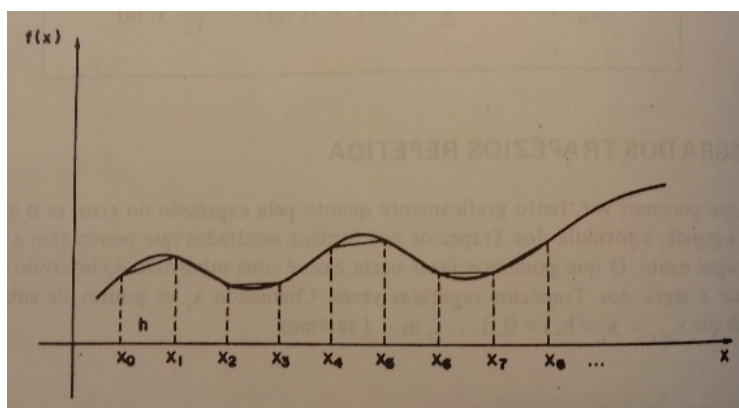


Figura 2.13: Integração numérica - Método dos trapézios repetidos.

A potência média então é dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \frac{h_t}{2} \{p(t_i) + 2[p(t_{i+1}) + p(t_{i+2}) + \dots + p(t_{i+m-1})] + p(t_{i+m})\} \quad (2.3)$$

onde, t_i é o tempo em cada divisão indo de t_0 até t_m , m o número total de trapézios e h_t é igual a altura desses trapézios. T igual a metade do inverso da frequência da rede, no Brasil, $T = \frac{1}{2 \times 60} = 0.0085s$

Concluindo, uma vez adquiridos os valores das curvas de tensão e corrente, as equações 2.1 e 2.3 podem ser empregadas para calcular a potência média de todas as lâmpadas.

A teoria para o cálculo da potência média, bem como a figura 2.12 estão presentes no livro [11]. Já os cálculos e a figura 2.13 podem ser encontrados no exemplar [12].

2.4.2 Fluxo Luminoso

Fluxo luminoso é um conceito menos popular do que potência. Seu significado foi apresentado no tópico 2.1, mas pode ser resumido como toda a energia emitida por uma fonte luminosa, em lúmens. Existem duas metodologias para se medir a quantidade de lúmens de uma lâmpada, a direta e a indireta. A primeira forma utiliza um aparelho chamado de esfera integradora e a segunda mede inicialmente a intensidade luminosa ou a iluminância para em seguida obter o fluxo luminoso.

2.4.2.1 Esfera Integradora

A esfera integradora é o equipamento utilizado em laboratórios luminotécnicos para medição do fluxo luminoso. Ela é também chamada de Esfera de Ulbricht em homenagem a Friedrich Richard Ulbricht, um engenheiro alemão, que por volta de 1900 produziu o primeiro aparelho capaz de medir diretamente o fluxo luminoso de uma lâmpada. Ela consiste, basicamente, de uma esfera oca com a parede interior revestida por uma tinta branca de alta refletância (normalmente 85%) como na figura 2.14. A fonte luminosa é colocada no centro da esfera e o medidor em um ponto da parede interior.



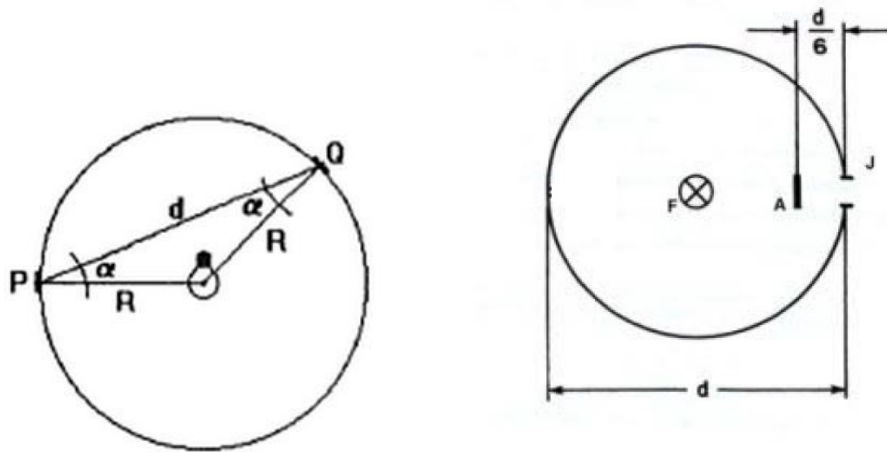
Figura 2.14: Esfera integradora de Ulbricht.

A fundamentação teórica para explicar o funcionamento da esfera considera que ela é um difusor perfeito, isto é, a luminância após uma reflexão no seu interior é igual em todos os sentidos.

Colocando uma fonte luminosa no centro da esfera, verifica-se que o valor da iluminância na parede interior da mesma pode ser dividido em uma parte resultante diretamente da fonte e outra fruto das reflexões internas. Uma análise separada será feita para cada parte, iniciando com as reflexões:

Considerando os esquemáticos na figura 2.15(a), é possível dizer que a iluminância no ponto Q devido a luminância L da área elementar dA presente em P será, conforme a lei dos cossenos:

$$dE_Q = \frac{(L)(dA)(\cos^2 \alpha)}{d^2} = \frac{(L)(dA)}{4R^2} \quad (2.4)$$



(a) Reflexão no interior da esfera.

(b) Dimensões da esfera.

Figura 2.15: Esquemáticos da esfera integradora de Ulbricht.

onde $dA \times \cos\alpha$ é a projeção da área elementar e $d = 2R \times \cos\alpha$. Sendo R o raio da esfera.

Visto que a equação independe do ângulo α , é possível concluir que a iluminância será independente do ponto Q . Logo, a parte da iluminância resultante somente da reflexão, chamada também de iluminância indireta, é uniforme em toda a esfera.

A outra parte do valor da iluminância, referente a iluminação direta, dependerá do formato da lâmpada e cada ponto da esfera apresentará uma influência diferente. A sua contribuição para o cálculo do fluxo luminoso é muito difícil de ser avaliada. A solução mais simples encontrada para contornar essa dificuldade foi colocar um anteparo entre a fonte luminosa e o medidor, vide figura 2.15(b), de modo a extinguir a contribuição da iluminância direta na medição.

Então, é possível resumir que no interior de uma esfera com refletância ρ , o fluxo luminoso emitido pela fonte, ϕ_E , será refletido pela parede interna, resultando em um outro fluxo luminoso, de valor $\rho \times \phi_E$. Esse fluxo refletido refletir-se-á, gerando $\rho^2 \times \phi_E$; que por sua vez produzirá $\rho^3 \times \phi_E$; assim sucessivamente até $\rho^{n+1} \phi_E$. O valor auferido pelo medidor, ϕ_M , será, portanto, a soma de todos os fluxos parciais:

$$\phi_M = \rho \times \phi_E + \rho^2 \times \phi_E + \rho^3 \times \phi_E + \dots + \rho^n \times \phi_E = \phi_E(\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n) \quad (2.5)$$

Como a refletância ρ está sempre entre zero e um, a soma em 2.5 é finita. Aplicando o limite:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{(\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n)(1 - \rho)}{1 - \rho} \right) = \quad (2.6)$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n - \rho^2 - \rho^3 - \dots - \rho^{n+1}}{1 - \rho} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\rho - \rho^{n+1}}{1 - \rho} \right) = \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \quad (2.7)$$

Portanto, aplicando 2.7 em 2.5, o fluxo ϕ_M é dado pela expressão:

$$\phi_M = \phi_E \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2.8)$$

Comumente utiliza-se um luxímetro nesse processo, medindo o valor da iluminância na parede externa. É necessário relembrar então a relação entre fluxo luminoso e iluminância, E :

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (2.9)$$

onde A é igual a área onde esse fluxo incide e que na esfera de raio R é calculada por:

$$A = 4\pi R^2 \quad (2.10)$$

Substituindo a fórmula da área, 2.10, e do fluxo medido, 2.8, em 2.9, obtém-se:

$$E = \frac{\rho}{4\pi R^2(1 - \rho)} \phi_E \implies \phi_E = \frac{4\pi R^2(1 - \rho)}{\rho} E \quad (2.11)$$

Finalmente, com a equação 2.11 e sabendo o raio e a refletância da esfera, é possível saber o fluxo luminoso emitido por uma lâmpada a partir da iluminância.

O diâmetro da esfera deve ser suficientemente grande para garantir as múltiplas reflexões de luz em seu interior. Uma recomendação é que o raio seja pelo menos duas vezes maior do que a maior dimensão da lâmpada.

Essa demonstração pode ser encontrada com mais detalhes nas seguintes fontes [4] e [13].

2.4.2.2 Medida indireta do fluxo luminoso

Esse método é uma forma simplificada de medir o fluxo luminoso e não demanda a utilização de uma esfera de Ulbricht. Sua precisão, apesar de menor, ainda é considerável para análises em geral. Simplificadamente, a ideia é realizar uma série de medidas da intensidade luminosa ou da iluminância ao redor da fonte luminosa e em seguida, relacionando com a área ou zona onde foram auferidas, obter o valor aproximado do fluxo luminoso. Por esse motivo, é também chamado de método do fluxo zonal.

A base teórica desse método é relativamente mais simples em relação à da esfera integradora e será descrita a seguir considerando medidas de iluminância, mas pode também ser desenvolvida, de modo semelhante, utilizando a intensidade luminosa.

Considerando que a fonte de luz esteja em um ponto isolado no espaço e possa irradiar sem interferências externas, seria possível imaginá-la envolvida completamente por um material que absorvesse todo o fluxo recebido. Se, nessa situação hipotética, medissem o valor da iluminância em cada ponto desse material e integrassem pela área do mesmo obteria-se o fluxo luminoso total da fonte. A figura 2.16 ilustra essa hipótese, com um envoltório esférico.

Utilizando o conceito acima e notando que o fluxo luminoso das lâmpadas em gerais apresenta um eixo de simetria, é razoável auferir a iluminância em pontos específicos ao redor da fonte e considerá-la igual ao de outras regiões. Lâmpadas do tipo bulbo e fluorescente compacta possuem um eixo de simetria saindo do centro de sua base até o centro da superfície emissora, como na figura 2.17(a). Ele permite assumir que segmentos esféricos de uma esfera centrada na lâmpada podem apresentar valores de iluminância

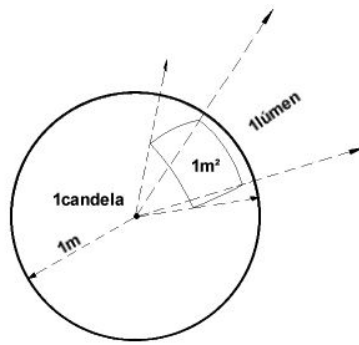
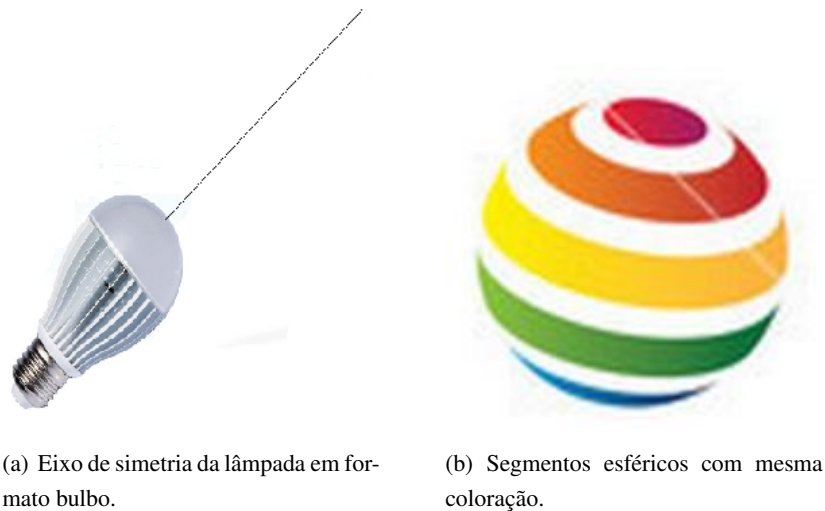


Figura 2.16: Possível envoltório esférico da fonte luminosa.

relativamente constantes em toda sua área. Na figura 2.17(b), supondo que a fonte está no centro da esfera, as regiões com coloração semelhante, chamadas de segmentos esféricos, recebem quantidade de lux aproximadamente iguais. Uma vez obtida a iluminância em cada uma delas e sabendo suas respectivas áreas é possível descobrir o fluxo luminoso da lâmpada.



(a) Eixo de simetria da lâmpada em formato bulbo.

(b) Segmentos esféricos com mesma coloração.

Figura 2.17: Medida indireta do fluxo luminoso.

A fim de que essa aproximação realmente seja válida, o número de segmentos esféricos deve ser grande o suficiente para que a iluminância seja praticamente constante em sua área. Assim, estabelecida uma referência como na figura 2.18, é recomendado variar o ângulo a passos entre 5° e 15° e medir a iluminância para cada um deles.

A área de cada segmento, como o da figura 2.19 pode ser calculada pela fórmula:

$$A = 2\pi Rh \quad (2.12)$$

onde R é o raio da esfera e h a altura do segmento esférico, dada por:

$$h = R\cos\theta_i - R\cos\theta_{i+1} \quad (2.13)$$

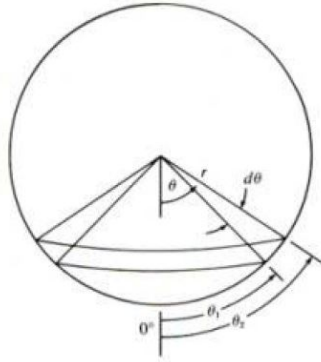


Figura 2.18: Segmentos esféricos - Variação angular.

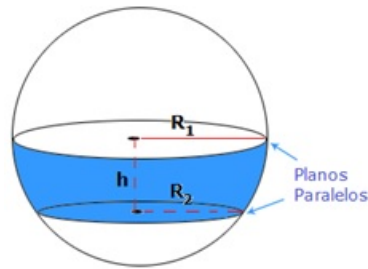


Figura 2.19: Área do segmentos esférico.

sendo θ_i e θ_{i+1} os ângulos de abertura que formam o segmento esférico.

Substituindo 2.13 em 2.12:

$$A = 2\pi R R (\cos\theta_i - \theta_{i+1}) = R^2 2\pi (\cos\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (2.14)$$

A fórmula que relaciona o fluxo, área e iluminância já foi apresentada anteriormente:

$$\phi = EA \quad (2.15)$$

Substituindo 2.14 em 2.15:

$$\phi_{Zn} = E_n R^2 2\pi (\cos\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (2.16)$$

Onde ϕ_{Zn} é o fluxo na zona definida pelos ângulos θ_i e θ_{i+1} e E_n a iluminância medida nessa mesma zona.

Finalmente, o fluxo total emitido pela lâmpada, será igual a soma do fluxo em todos os segmentos que envolvem a fonte luminosa:

$$\phi_T = \sum_{n=1}^S \phi_{Zn} = \sum_{i=1}^S E_i R^2 2\pi (\cos\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (2.17)$$

S é igual ao número total de segmentos esféricos envolvendo a fonte luminosa e quanto maior for,

maior será a precisão do resultado. O termo final da equação anterior é chamado de constante zonal, "k", e depende da variação angular entre as medidas:

$$k = 2\pi(\cos\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (2.18)$$

O valor de R é igual a distância entre a fonte e o ponto onde foi medida a iluminância. Essa teoria considera que todo o fluxo incidente em uma região é originado a uma distância única dessa área, em outras palavras, considera que a fonte de luz é puntiforme. Obviamente, na vida real a situação é bem diferente, as lâmpadas tubulares, por exemplo, comumente apresentam mais de 40cm. É possível, entretanto, fazer essa consideração durante a experimentação, desde que, a distância entre a fonte e o medidor seja suficientemente maior do que a maior dimensão da lâmpada. A distância suficiente sugerida pelas fontes pesquisadas neste trabalho foi entre 4 e 5 vezes a maior dimensão da lâmpada. Na maioria dos casos, essa distância é fixa, permitindo simplificar a equação 2.17:

$$\phi_T = R^2 \sum_{n=1}^S E_n k_n \quad (2.19)$$

Deste modo, é possível obter o fluxo luminoso de uma fonte através de inúmeras medições de iluminância em regiões intencionalmente escolhidas para facilitar o cálculo de sua área. Toda essa teoria está desenvolvida mais detalhadamente em [4], [13] e [14].

3 MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os métodos experimentais utilizados para se medir tanto o fluxo luminoso como a potência. Os experimentos foram realizados principalmente no laboratório de controle de automação do departamento de engenharia elétrica, mas também, em pequena escala, na residência do autor. Parte dos equipamentos utilizados pertenciam à Universidade de Brasília, UnB, e parte ao orientador do trabalho.

Na UnB, não existia à época um laboratório de luminotécnica nem uma esfera integradora. De modo que, a medição do fluxo luminoso teve que ser realizada do modo indireto, cuja teoria está descrita na seção 2.4.2.2. Nenhum experimento com esse intuito havia sido realizado, logo todos os procedimentos foram desenvolvidos para este estudo e foram baseados tanto na referida teoria como no artigo [14], um trabalho oriundo da Universidade Kaunas, na Lituânia, no qual calcularam o fluxo luminoso também de forma indireta. Por ser uma medida não usual e um dos pontos chaves do trabalho, foram realizados dois métodos de obtenção do fluxo luminoso.

O luxímetro utilizado para as medições de iluminância foi o modelo THAL-300 da INSTRUTHERM como o da figura 3.1(a). As funções mais utilizadas foram a medida de iluminância, na unidade [lux] e a tecla 'HOLD' que grava o valor medido em certo instante. O osciloscópio utilizado foi um modelo 2540 da BK PRECISION, como na figura 3.1(b).



(a) Luxímetro THAL-300.

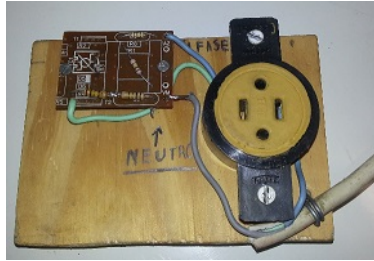


(b) Osciloscópio 2540 - BK PRECISION.

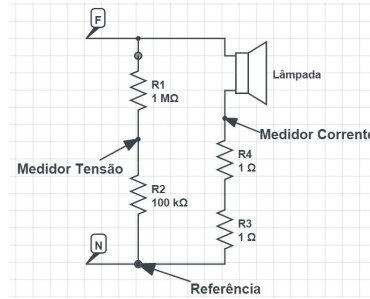
Figura 3.1: Instrumentos de medida.

3.2 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

Conforme descrito na seção 2.4.1, a medição da potência ativa consumida pelas lâmpadas será feita numericamente. Os conectores do osciloscópio devem ser ligados entre a rede elétrica e a fonte luminosa. Para facilitar essa conexão, foi elaborado um circuito aberto cujo esquemático e foto podem ser visto em 3.2(a) e 3.2(b).



(a) Foto do circuito.



(b) Esquemático do circuito.

Figura 3.2: Circuito utilizado na medição da potência.

Essa montagem específica do circuito foi em razão de duas limitações do osciloscópio. Primeiro, o valor máximo de tensão auferido pelo equipamento é menor do que a tensão da rede elétrica, por isso, as resistências r_1 e r_2 , de valores bem distintos, foram colocadas em paralelo com a lâmpada. Assim, a onda da tensão entre r_2 e a referência será k_1 vezes menor do que entre a lâmpada e a referência. Sendo que:

$$k_1 = \frac{r_1 + r_2}{r_2} = \frac{1M + 0.1M}{0.1M} = 11 \quad (3.1)$$

Segundo, o osciloscópio não permite realizar a conexão em série necessária para medir a corrente diretamente. De modo que, as resistências r_3 e r_4 , de valores conhecidos, foram colocadas em série com a fonte luminosa. Portanto, a corrente que percorre a lâmpada será k_2 vezes menor do que a tensão medida entre estas resistências. Onde:

$$k_2 = r_3 + r_4 = 2 \quad (3.2)$$

Portanto, a tensão e a corrente na lâmpada seriam dadas por:

$$v(t) = v_{r_2}(t)k_1 = 11v_{r_2}(t) \quad (3.3)$$

$$i(t) = \frac{v_{r_3r_4}(t)}{k_2} = \frac{v_{r_3r_4}(t)}{2} \quad (3.4)$$

Entretando, esses valores de resistências são teóricos, medindo-os com um multímetro, elas apresentaram variações. Ver tabela 3.1.

Os valores reais de k_1 e k_2 , então, serão:

$$k_1 = \frac{r_1 + r_2}{r_2} = \frac{1.0578M + 0.10067M}{0.10067M} = 11.5 \quad (3.5)$$

resistências	r1	r2	r3+r4
Ω	1.0578M	100.67k	2.21

Tabela 3.1: Valores reais das resistências

$$k_2 = r_3 + r_4 = 2.21 \quad (3.6)$$

Substituindo nas equações 3.4 e 3.3:

$$v(t) = v_{r_2}(t)k_1 = 11.5v_{r_2}(t) \quad (3.7)$$

$$i(t) = \frac{v_{r_3r_4}(t)}{k_2} = \frac{v_{r_3r_4}(t)}{2.21} \quad (3.8)$$

Resumindo, a sequência de medição para cada lâmpada foi, utilizando o osciloscópio, exportar os valores de tensão em r_2 e em r_3r_4 , bem como o instante de tempo em que eles foram obtidos ¹.

O osciloscópio exibe a onda resultante da multiplicação de duas ondas medidas, porém não permite realizar nenhuma medida nessa onda resultante. De modo que é necessário realizar os cálculos em outro software. Como é possível exportar os dados na extensão CSV, o excel é uma opção mais simples.

Utilizando o excel, esses valores foram inseridos nas equações 3.7 e 3.8 e resultaram nos valores reais da corrente e da tensão sobre a lâmpada. Estes, por sua vez, serão substituídos na equação 2.1, obtendo a potência instantânea na lâmpada.

Finalmente, aplicando a fórmula da integral numérica 2.3, também no excel, a potência ativa consumida por cada lâmpada foi obtida²³.

3.3 MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 1

Conforme descrito na seção 2.4.2.2, o método indireto de medição do fluxo luminoso precisa dos valores de iluminância em regiões tais que envolvam completamente a fonte luminosa. Visando esse objetivo, a primeira ideia foi confeccionar um caixa, com dimensões aproximadamente iguais a $43x45x64$ cm, cujas paredes internas foram pintadas de preto, a fim de absorver todo o fluxo luminoso nelas incidente. Na parte superior, uma base de madeira foi introduzida em um eixo de modo a permitir sua rotação e nela foi fixado um soquete do tipo $E27$, o mais popular para lâmpadas residenciais. Duas aberturas foram criadas na caixa, uma menor, perto da base, por onde o luxímetro era introduzido e operado, outra maior, na parte superior que permitia girar quase 180° a lâmpada. A figura 3.3 mostra a caixa utilizada.

¹A amostragem do osciloscópio "BK PRECISION 2540" é de aproximadamente 4000 pontos de tensão em 1s de medida.

²Para facilitar, os cálculos foram feitos com valores de tensão compreendidos em um intervalo de tempo de 0.0835s, que corresponde a exatamente $T = 10$ na equação 2.3.

³A impedância de entrada do osciloscópio não foi considerada.



(a) Visão externa.



(b) Visão interna.



(c) Base de madeira.

Figura 3.3: Caixa utilizada nas medições de fluxo luminoso.

O processo inicia-se ligando a lâmpada e esperando aproximadamente vinte minutos para seu funcionamento padrão ser atingido. Em seguida, ela é rotacionada de maneira a ficar o mais próximo possível do fundo da caixa e essa posição é adotada como o ângulo de referência 0° , como ilustrado no esquemático 3.4. O sensor do luxímetro é então posicionado exatamente na mesma linha do centro da lâmpada e as aberturas da caixa são fechadas com panos pretos a fim de não refletir nem permitir a entrada de luz. Após a função 'HOLD' ser ativada manualmente, o aparelho é retirado e o valor da iluminância anotado.

Para continuar a medição a base deve ser rotacionada. Um teste foi realizado com variação angular igual a 10° e posteriormente com 15° obtendo resultados finais muito próximos, logo este último passo foi definido como padrão para diminuir o número total de medidas e agilizar o processo como um todo. Na figura 3.4 quatro posições angulares diferentes são retratadas.

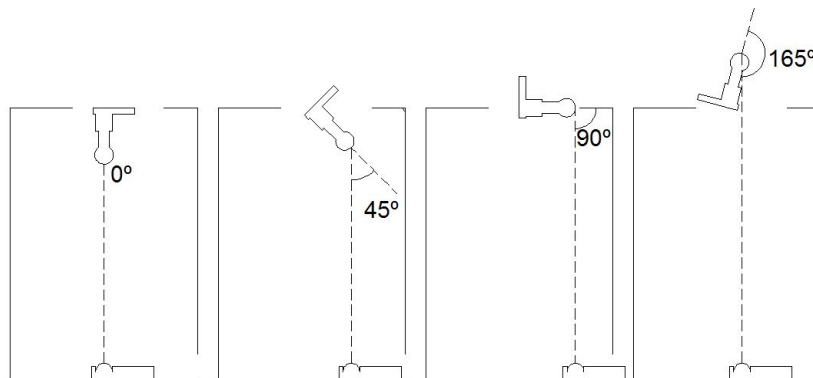


Figura 3.4: Esquemático das medições em quatro diferentes posições.

Essa rotação foi medida utilizando um transferidor, tendo como referência o eixo horizontal e a base de madeira. Portanto, existe uma limitação quanto à precisão da medida

Como explicado em 2.4.2.2, a fonte luminosa será considerada um ponto no espaço e neste experimento ele foi estabelecido no ápice do bulbo das lâmpadas, onde começa a linha tracejada no esquemático 3.4. A combinação desta definição e da montagem proposta resultou em duas consequências que se ignoradas,

invalidam o resultado final. Primeiramente, o luxímetro não pode ser fixado no centro da caixa, mas deve acompanhar o deslocamento horizontal do "ponto luminoso", à medida que a lâmpada é rotacionada. Segundo, a distância entre o medidor e o "ponto luminoso" não é fixa, portanto deve-se utilizar a equação 2.17 para calcular o fluxo luminoso de cada zona e em seguida soma-los. A figura 3.5 exemplifica essas observações.

A distância entre o medidor e o "ponto luminoso" foi chamada de "R" varia conforme a variação angular da lâmpada. A menor distância possível, dada no ângulo 0° , foi medida com uma trena. As seguintes foram calculadas por:

$$R = R_0 + (R_0 - R_0 \times \cos\theta_i) \quad (3.9)$$

onde θ_i é o ângulo de posicionamento da lâmpada.

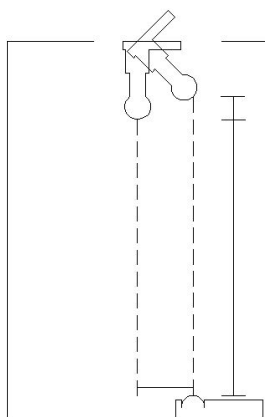


Figura 3.5: Variações importantes durante a medição.

Quanto ao deslocamento horizontal do luxímetro, ele é igual ao deslocamento horizontal do ponto luminoso, que é calculado por:

$$Dh = Dp * \cos(\theta_i) \quad (3.10)$$

Onde, Dh é igual ao deslocamento horizontal do ponto luminoso, Dp é a distância entre a base de madeira e o ponto luminoso e θ_i é o ângulo da medida.

Ao todo foram tomadas doze medidas, correspondendo aos ângulos $x = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 165^\circ$. O valor da iluminância em cada um desses pontos foi considerado constante no segmento esférico formado pelos ângulos $x - 7.5^\circ$ e $x + 7.5^\circ$ para $x \geq 15^\circ$ e por 0° e 7.5° para $x = 0^\circ$. A partir do ângulo 172.5° , a iluminância já é muito pequena e foi tomada como zero nos cálculos.

Conforme discutido na seção 2.4.2.2 o método de medição indireta do fluxo luminoso que será apresentado depende da constante zonal "k", que por sua vez é função dos ângulos que formam os segmentos esféricos e é dado pela equação 2.18. Para este método, a tabela 3.2 exibe os segmentos esféricos e suas respectivas constante.

Zona entre(°)	Const Zonal
0 / 7.5	0.054
7.5 / 22.5	0.424
22.5 / 37.5	0.819
37.5 / 52.5	1.158
52.5 / 67.5	1.419
67.5 / 82.5	1.582
82.5 / 97.5	1.639
97.5 / 112.5	1.583
112.5 / 127.5	1.420
127.5 / 142.5	1.160
142.5 / 157.5	0.821
157.5 / 172.5	0.426

Tabela 3.2: Constante zonal - Método 1

Uma imagem 2D do envoltório imaginário estabelecido por essa montagem ao redor da fonte luminosa seria algo similar a figura 3.6. Onde é possível visualizar a fonte luminosa no centro, os segmentos esféricos, os doze pontos de medição, bem como a variação da distância entre a fonte e o segmento esférico.

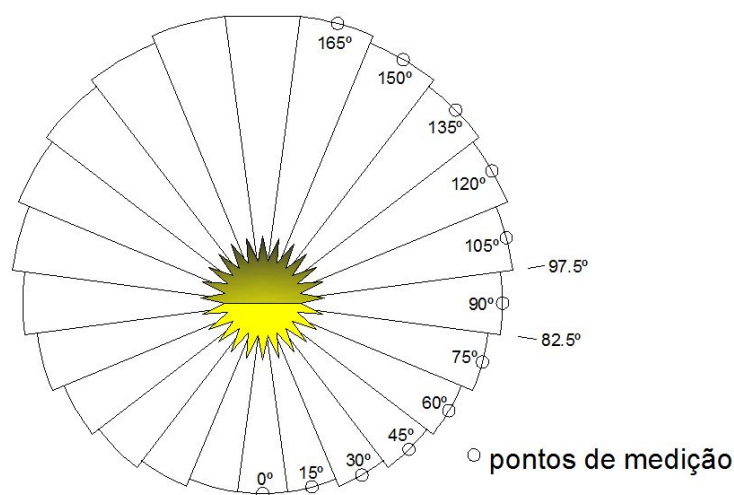


Figura 3.6: Envoltório imaginário - método 1.

Uma vez estabelecidos os ângulos que formam os segmentos esféricos, as distâncias entre estes e a fonte, bem como a quantidade de *lux* nessas áreas, o uso da equação 2.17 dá-se diretamente e o valor do fluxo luminoso total da lâmpada é obtido.

3.4 MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 2

O segundo procedimento experimental utilizado neste estudo também é baseado na teoria da seção 2.4.2.2 de medição indireta do fluxo luminoso. Ele difere do primeiro método por não utilizar uma caixa, mas fazer as medições em um ambiente amplo. O maior problema nessa montagem é que a grande maioria das paredes, tetos e pisos são claros, o que resulta em um alto índice de refletância interferindo no resultado final. A fim de minimizar essa influência, o ideal é realizar o experimento em ambientes grandes, de modo que a distância entre a fonte luminosa e o medidor seja pelo menos 5 vezes menor do que a distância entre eles e as extremidades do cômodo.

Nesta montagem, o afastamento entre a fonte luminosa e o chão não era suficientemente grande, mas um pano preto foi estendido de modo a reduzir a reflexão. Estabeleceu-se, então, uma distância fixa entre a fonte e o luxímetro igual a 80 cm, que é mais que cinco vezes a maior dimensão das lâmpadas testadas.

Em seguida, as medições foram tomadas formando quase uma meia circunferência em volta da fonte luminosa, como ilustrado na figura 3.7. A variação angular dessa vez foi estabelecida em 10° buscando uma maior precisão. Ao todo foram dezessete posições para cada lâmpada, indo de 0° até 160° . A referência 0° foi a mesma do método anterior.

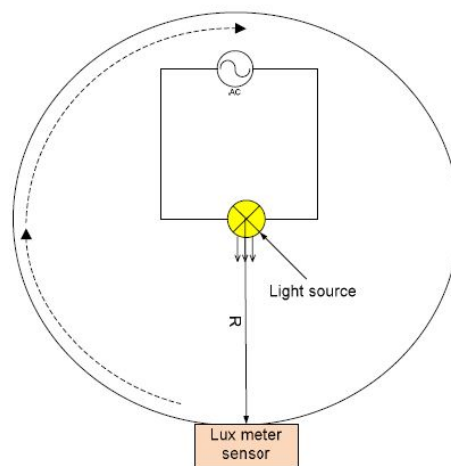


Figura 3.7: Esquemático da montagem - método 2.

As medidas neste experimento foram realizadas utilizando um bastão de $1m$, no qual uma marcação foi feita para fixar a distância de $80cm$. Com um transferidor e o bastão, o posicionamento do osciloscópio era estabelecido.

Os ângulos que limitam os segmentos esféricos desse método são diferentes do anterior. Portanto, os valores da constante zonal também mudam, ver tabela 3.3:

Analogamente ao primeiro método, é possível desenhar uma figura 2D do envoltório imaginário resultante dessa montagem, figura 3.8. Ela tem praticamente o formato de um círculo, exceto entre 160° e 200° onde a iluminância é tão baixa que foi considerada igual a zero e não houve medidas. A fonte luminosa está localizada no centro e os 17 pontos de medição estão representados por pequenos círculos.

Zona entre(°)	Const Zonal
0 / 10	0.095
10 / 20	0.283
20 / 30	0.462
30 / 40	0.627
40 / 50	0.773
50 / 60	0.896
60 / 70	0.991
70 / 80	1.057
80 / 90	1.090
90 / 100	1.090
100 / 110	1.057
110 / 120	0.992
120 / 130	0.897
130 / 140	0.775
140 / 150	0.629
150 / 160	0.464

Tabela 3.3: Constante zonal - Método 2

Devido a facilidade proporcionada pela distância fixa entre a fonte e o luxímetro, o valor da iluminância em cada segmento esférico foi tomado como a média dos valores em cada extremo. Por exemplo, no segmento entre 80° e 90°, a iluminância foi considerada igual a média entre E_{80° e E_{90° .

Como a distância entre o "ponto luminoso" e a fonte é conhecida, bem como o valor da iluminância e dos ângulos que formam os segmentos esféricos, é possível, então, utilizar a equação 2.19 para calcular o fluxo luminoso total das lâmpadas.

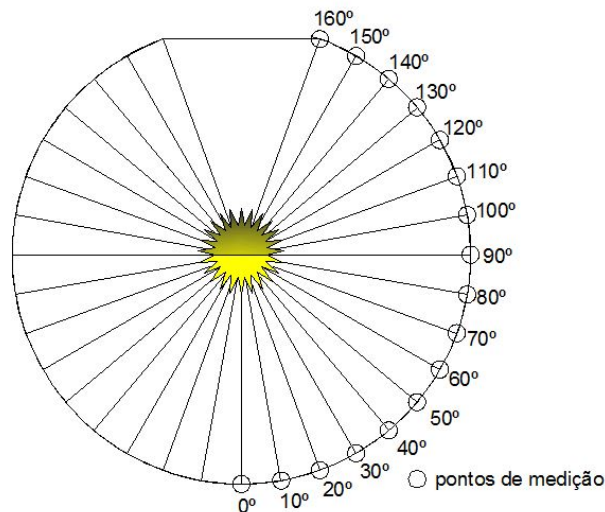


Figura 3.8: Envoltório imaginário - método 2.

3.5 ANÁLISE ECONÔMICA

A questão econômica tem um peso grande na maioria das escolhas na vida humana moderna. Quando se trata de uma decisão entre diferentes produtos essa influência é ainda maior. Por isso, apesar do enfoque deste trabalho ser na parte técnica, uma análise econômica enriquece a comparação entre as lâmpadas disponíveis no mercado.

Essa tipo de análise, quando feita de maneira minuciosa, tem um grau de complexidade elevado, considerando muitas variáveis como a eficiência energética, a vida útil, a utilização média das lâmpadas pelos brasileiros, preço da energia, entre outras. O enfoque que será dado aqui é muito mais superficial, com o intuito apenas de levantar uma questão financeira além do simples preço das lâmpadas.

Assim sendo, o seguinte procedimento foi elaborado levando em consideração a eficiência energética calculada neste trabalho e uma situação hipotética.

Supoe-se que as lâmpadas a serem examinadas emitam todas exatamente 600lm, mantendo a mesma eficiência e preço.

Assim sendo, a potência de cada uma dessas lâmpadas hipotéticas será:

$$P = \frac{600}{\eta} \quad (3.11)$$

O consumo C por hora será, em [kWH]:

$$C = P * 1 \quad (3.12)$$

O preço da energia residencial no Brasil varia de acordo com a energia total consumida e também com a fonte geradora. Para simplificar, será considerado o valor cobrado em dezembro pela CEB na residência do autor, 0.42[R\$/kWH]. Logo, o custo de operação, Co, das lâmpadas em uma hora é:

$$C_o = \frac{0.42 \times C}{1000} \quad (3.13)$$

É possível agora, comparando as lâmpadas duas a duas, descobrir a economia que uma delas proporciona por hora, Ec . Considerando L_1 mais eficiente do que L_2 , tem-se:

$$Ec_{12} = Co_1 - Co_2 \quad (3.14)$$

Também analisando duas a duas, a diferença de preço, Dp , entre elas é:

$$Dp_{12} = Pr_1 - Pr_2 \quad (3.15)$$

Sendo Pr o preço da lâmpada. Finalmente, confrontando a diferença de preço Dp com a economia por hora Ec é possível estimar o número de horas t necessárias para recuperar o investimento inicial:

$$t_{12} = \frac{Dp_{12}}{Ec_{12}} \quad (3.16)$$

4 RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, serão apresentados, primeiramente, os resultados dos experimentos descritos no capítulo 3. Em seguida, será feita uma comparação e análise sobre os valores obtidos e, por fim, a eficiência energética de cada lâmpada será calculada utilizando estes mesmos valores.

A fim de tornar mais clara a apresentação dos resultados, as especificações nominais das lâmpadas, bem como uma foto delas, serão exibidas nesta introdução e referidas posteriormente. Ver tabela 4.1 e figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Foto	Marca	Tecnologia	Potência (W)	Fluxo luminoso (lm)
4.1(a)	OSRAM	Incandescente	40	415
4.1(b)	PHILIPS	Incandescente	40	?
4.1(c)	CARREFOUR	Incandescente	60	?
4.2(a)	PHILIPS	Fluor. Compacta	14	806
4.2(b)	OUROLUX	Fluor. Compacta	15	784
4.2(c)	LUZ SOLLAR	Fluor. Compacta	21	?
4.3(a)	PHILIPS	LED	9.5	806
4.3(b)	GOLDEN	LED	5	450
4.3(c)	LSC	LED	6	470
4.4(a)	CHINESA	LED	3	?
4.4(b)	CHINESA	LED	?	?
4.4(c)	CHINESA	LED	?	?

Tabela 4.1: Especificações - Lâmpadas testadas¹².

As lâmpadas 4.3(a) e 4.3(c) foram adquiridas na Holanda, mas é possível, principalmente com relação a marca Philips, encontrar modelos similares no mercado brasileiro. Já os três exemplares LED da figura 4.4 foram pedidos aqui no Brasil, mas de sites revendedores chineses, "Aliexpress" e "Dealextreme". Todas as outras foram compradas em solo brasileiro.

¹? = Valores nominais não especificados ou não encontrados.

²"Marca Chinesa" se refere a lâmpadas compradas aqui no Brasil de sites revendedores chineses, como "Aliexpress" e "Dealextreme".



(a) OSRAM - 40W.



(b) PHILIPS - 40W.



(c) CARREFOUR - 60W.

Figura 4.1: Lâmpadas incandescentes tradicionais.



(a) PHILIPS - 14W.



(b) OUROLUX - 15W.



(c) LUZ SOLLAR - 21W.

Figura 4.2: Lâmpadas fluorescentes compactas.



(a) PHILIPS - 9.5W.

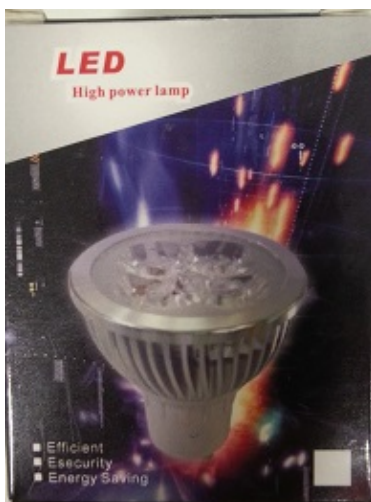


(b) GOLDEN - 5W.



(c) LSC - 6W.

Figura 4.3: Lâmpadas LED - 4.



(a) Chinesa - 3x1W.



(b) Chinesa - Ovo.



(c) Chinesa - Milho.

Figura 4.4: Lâmpadas LED - 5.

4.2 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

Conforme explicado anteriormente, o número de dados adquiridos do osciloscópio visando a medição da potência foi muito grande. Para cada uma das duas ondas de tensão, de cada lâmpada testada, mais de três mil e trezentos valores foram auferidos. De modo que, apresenta-los tornaria o relatório muito extenso e maçante, por isso decidiu-se exibir apenas as formas de onda e o valor da potência consumida após os cálculos.

Os dados exportados pelo osciloscópio em formato CSV foram manipulados no excel para fornecer a potência ativa consumida pelas lâmpadas.

Nas figuras que se seguirão, três ondas estão registradas. A amarela e a azul representam as formas de onda da tensão e da corrente na lâmpada, respectivamente. Já a vermelha é resultado da multiplicação, feita pelo osciloscópio, das duas ondas anteriores, ou seja, representa a potência instantânea.

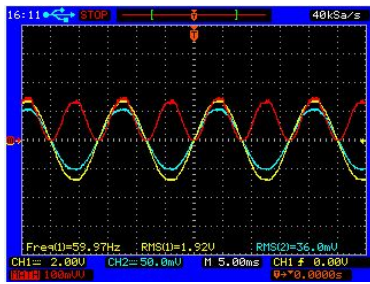
Foto	Lâmpada		Nominal	Potência (W)	
	Marca	Tecnologia		Medida	$\frac{Medida - Nominal}{Nominal}$
4.5(a)	OSRAM	Incandescente	40	38.7	-3%
4.5(b)	PHILIPS	Incandescente	40	38.5	-4%
4.5(c)	CARREFOUR	Incandescente	60	61.0	2%
4.6(a)	PHILIPS	Fluor. Compacta	14	13.4	-4%
4.6(b)	OUROLUX	Fluor. Compacta	15	14.5	-3%
4.6(c)	LUZ SOLLAR	Fluor. Compacta	21	15.6	-26%
4.7(a)	PHILIPS	LED	9.5	8.9	-6%
4.7(b)	GOLDEN	LED	5	4.9	-2%
4.7(c)	LSC	LED	6	6.0	0%
4.8(a)	CHINESA	LED	3	4.1	37%
4.8(b)	CHINESA - OVO	LED	?	2.4	?
4.8(c)	CHINESA - MILHO	LED	?	4.3	?

Tabela 4.2: Potência real e nominal - Lâmpadas testadas³.

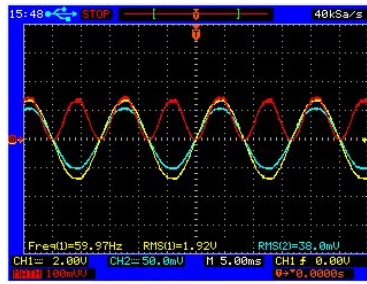
Analisando a tabela 4.2 é possível afirmar que as especificações de potência são, em sua maioria, coerentes com a realidade. Com exceção das lâmpadas LUZ SOLLAR e DA Chinesa 3W, o valor real não diferiu mais do que 6% em relação ao valor nominal. E, além disso, um fato positivo é que a potência medida foi maior do que a nominal em apenas dois exemplares, de modo que o eventual risco de problema devido a um consumo acima do projetado é baixo.

Já era esperado que as lâmpadas chinesas, entre elas 4.4(a), pudessem apresentar especificações, quando exibidas, distantes da realidade. Em sua maioria, os itens vendidos por sites revendedores chineses não são produzidos por marca famosa, reconhecida pela qualidade. Existem reclamações quanto ao desempenho desses itens, principalmente em relação a vida útil, e o único exemplar testado que especificava um valor de potência, mostrou que também este quesito não é preciso, maior do que 35% o

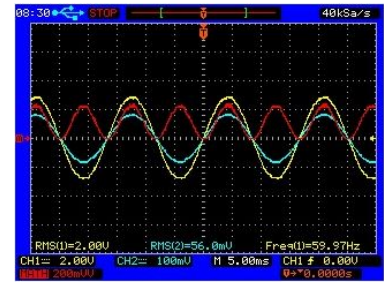
³? = Valores nominais não especificados ou não encontrados.



(a) OSRAM - 40W.

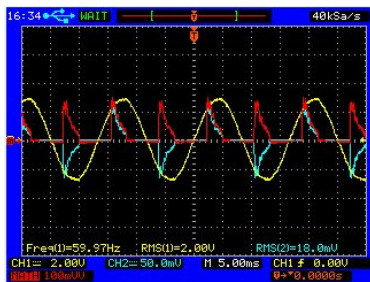


(b) PHILIPS - 40W.

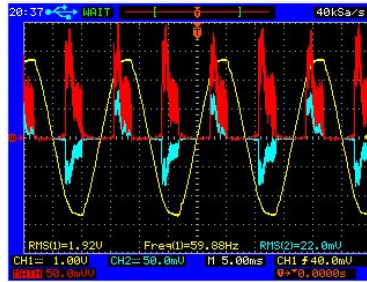


(c) CARREFOUR - 60W.

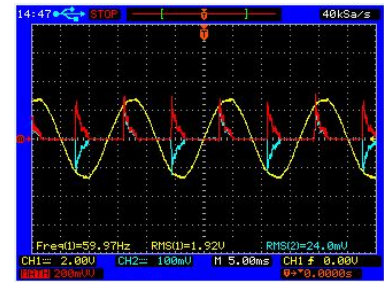
Figura 4.5: Lâmpadas incandescentes tradicionais.



(a) PHILIPS - 14W.

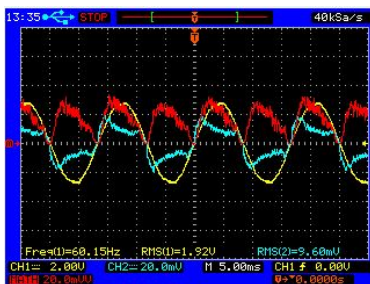


(b) OUROLUX - 15W.

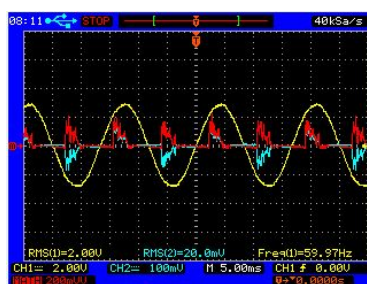


(c) LUZ SOLLAR - 21W.

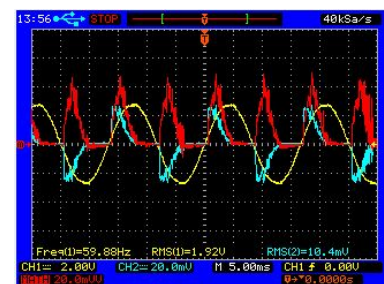
Figura 4.6: Lâmpadas fluorescentes compactas.



(a) PHILIPS - 9.5W.

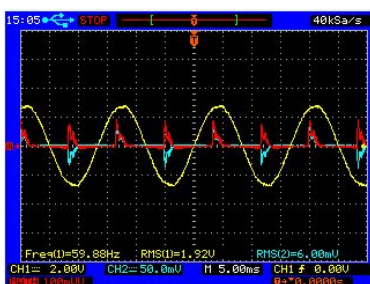


(b) GOLDEN - 5W.

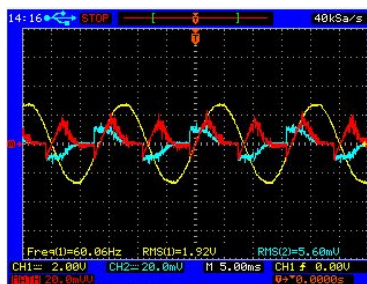


(c) LSC - 6W.

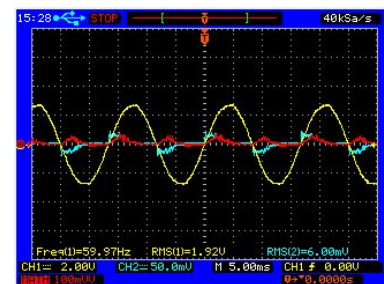
Figura 4.7: Lâmpadas LED - 6.



(a) Chinesa - 3x1W.



(b) Chinesa - Ovo.



(c) Chinesa - Milho.

Figura 4.8: Lâmpadas LED - 7.

nominal.

A lâmpada fluorescente compacta 4.2(c) apresentou um consumo 26% menor do que nas especificações. Uma explicação plausível para esta diferença é que ela esteja com defeito, causado provavelmente por se tratar de um exemplar antigo. Apesar de não se saber o valor nominal do seu fluxo luminoso, existem grandes chances de que também ele esteja afetado.

Uma observação interessante é que, após poucos minutos de funcionamento, a maioria das lâmpadas apresenta um consumo menor do que aquele verificado durante a operação padrão. Assim como o fluxo luminoso, que será visto posteriormente, percebe-se que também o consumo das fontes demora alguns minutos até se estabilizar. Os valores exibidos na tabela 4.2, foram salvos pelo menos quinze minutos depois da ligação da lâmpada.

Em relação as formas de onda da potência instantânea, nota-se uma semelhança entre as lâmpadas que utilizam a mesma tecnologia. Pela figura 4.5 percebe-se que os três exemplares incandescentes apresentam corrente e tensão praticamente em fase, ou seja, atuam como uma carga puramente resistiva. A potência nesses casos tem forma senoidal cuja frequência é o dobro da tensão.

As ondas na figura 4.6 também apresentam grande semelhança, e é notável que as lâmpadas fluorescentes apresentam fator de potência não unitário. Essas ondas assemelham-se mais a triângulos, tendo um pico de subida e queda como uma rampa.

Por último, as lâmpadas LED, figuras 4.7 e 4.8 apresentam ondas com traços de semelhanças não tão grandes como as anteriores. Em especial, o modelo da Philips 4.7(a), cuja corrente é diferente de zero em grande parte do tempo, enquanto que nas outras, sobretudo nas chinesas, a corrente é aproximadamente zero durante um bom período. Isto evidencia possíveis diferenças em suas construções e pode até estar relacionado com diferentes desempenhos que elas venham a apresentar. Contudo, uma análise mais profunda não será feita, já que extrapola os objetivos deste estudo.

4.3 MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 1

Esta seção é dedicada apenas a apresentação dos valores de fluxo luminoso obtidos reproduzindo-se o método 1 descrito na seção 3.3. As análises dos mesmos estão feitas na seção 4.5.

Como os dados gerados nesta parte são muito extensos, optou-se por exibir os resultados de apenas uma lâmpada, enquanto os outros estão nos anexos I.

As lâmpadas testadas foram posicionadas sempre com os mesmos ângulos, portanto a constante zonal da tabela 3.2 será válida em todos os casos. Os seguintes símbolos foram utilizados:

”R” representa a distância entre(°) ponto luminoso e luxímetro;

”E” o valor de lux em cada segmento esférico;

”Fluxo zona” é o fluxo luminoso em determinado segmento esférico;

”Fluxo acumulado” é a soma do ”Fluxo zona” desde o ângulo referência até a presente medida.

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	191	2	2
7.5 / 22.5	0.46	188	17	19
22.5 / 37.5	0.48	188	35	54
37.5 / 52.5	0.50	177	50	104
52.5 / 67.5	0.52	164	63	167
67.5 / 82.5	0.55	150	72	239
82.5 / 97.5	0.58	136	75	314
97.5 / 112.5	0.61	133	79	392
112.5 / 127.5	0.64	120	70	462
127.5 / 142.5	0.66	125	64	526
142.5 / 157.5	0.68	110	42	569
157.5 / 172.5	0.70	41	8	577

Tabela 4.3: Fluxo luminoso - Método 1 - OSRAM 40W

4.4 MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 2

Como na seção anterior, também aqui será apresentado apenas o resultado da medição de fluxo luminoso de uma lâmpada. Os outros resultados encontram-se no anexo II. As análises serão feitas posteriormente, na seção 4.5.

Todas as lâmpadas passaram exatamente pelo mesmo processo, de modo que, a constante zonal será igual a descrita na tabela 3.3.

Neste método, a distância entre o "ponto luminoso" e o luxímetro foi fixada em 80cm para todos os testes.

Os seguintes símbolos foram utilizados:

" E_i " = iluminância medida com o menor ângulo que forma o segmento esférico;

" E_{i+1} " = iluminância medida com o maior ângulo que forma o segmento esférico;

" E_m " = média dos valores descritos logo a cima;

"Fluxo zona" é o fluxo luminoso em determinado segmento esférico;

"Fluxo acumulado" é a soma do "Fluxo zona" desde o ângulo referência até a presente medida.

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	62	65	64	4	4
10 / 20	65	70	68	12	16
20 / 30	70	72	71	21	37
30 / 40	72	70	71	29	66
40 / 50	70	68	69	34	100
50 / 60	68	72	70	40	140
60 / 70	72	78	75	48	187
70 / 80	78	87	83	56	243
80 / 90	87	69	78	54	298
90 / 100	69	65	67	47	344
100 / 110	65	65	65	44	388
110 / 120	65	62	64	40	429
120 / 130	62	68	65	37	466
130 / 140	68	66	67	33	499
140 / 150	66	6	36	14	514
150 / 160	6	0	3	1	515

Tabela 4.4: Fluxo luminoso - Método 2 - OSRAM 40W

4.5 MEDIÇÃO DE FLUXO LUMINOSO - COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

A tabela 4.5 exibe os resultados de fluxo luminoso de ambos os métodos. Infelizmente, o valor nominal dessa grandeza não é conhecido em todos os exemplares. Antigamente, a maioria das lâmpadas não era especificada nesse sentido, como é o caso das incandescentes da PHILIPS e CARREFOUR e também da fluorescente LUZ SOLLAR. Mesmo ultimamente, não são todos os modelos que apresentam essa informação, marcas não tão conhecidas, como as chinesas aqui testadas, comumente a omitem.

Comparando os resultados de fluxo luminoso dos dois métodos, nota-se que os valores fornecidos pelo primeiro foram maiores do que os do segundo em todas as lâmpadas. A diferença foi mais de 30% nas lâmpadas incandescentes e por volta de 20% nas fluorescentes e LED, com exceção de dois exemplares que extrapolaram. São desigualdades muito elevadas que sugerem que os resultados de um dos métodos podem ter sido distorcidos.

Confrontando agora os resultados medidos com o valor nominal, verifica-se que ambos os métodos apresentaram resultados acima do padrão, porém o método 1 foi muito distante do especificado pelos fabricantes. Com exceção da lâmpada LED LSC, todas as outras apresentaram pelo menos 20% a mais, chegando até 43% na fluorescente da OUROLUX.

Por outro lado, o método 2 resultou em valores mais próximos ao nominais. A maior diferença foi 24%, na incandescente OSRAM, mas exibiu-se até fluxo luminoso 12% menor do que o especificado na LED LSC.

^{4?} = Valores não especificados ou não encontrados

Lâmpada			Fluxo Luminoso(lm)				
Marca	Tecnologia	P(W)	Nominal	Met 1	$\frac{Met1-Nominal}{Nominal}$	Met 2	$\frac{Met2-Nominal}{Nominal}$
OSRAM	Incandescente	40	415	577	39%	515	24%
OUROLUX	Fluorescente	15	784	1118	43%	948	21%
PHILIPS	Fluorescente	14	806	1095	36%	966	20%
PHILIPS	LED	9.5	806	998	24%	863	7%
GOLDEN	LED	5	450	542	20%	453	1%
LSC	LED	6	470	483	3%	413	-12%
PHILIPS	Incandescente	40	?	558	?	413	?
CARREFOUR	Incandescente	60	?	942	?	713	?
LUZ SOLLAR	Fluorescente	21	?	993	?	769	?
CHINA	LED	3	?	395	?	138	?
CHINA - OVO	LED	?	?	184	?	151	?
CHINA - MILHO	LED	?	?	250	?	203	?

Tabela 4.5: Fluxo luminoso - Comparação de resultados⁴.

Conclui-se que o método 2 é mais preciso do que o primeiro para todos os tipos de lâmpada testados. Como ambos estão embasados na mesma teoria, o problema do primeiro método encontra-se na elaboração do ambiente de medição. Em relação a esse ponto, a grande diferença foi o local onde as medições aconteceram. Enquanto o segundo utilizou um cômodo amplo, o outro limitou as medições ao interior da caixa.

Muito provavelmente, a distorção no resultado do primeiro método seja influência exatamente da utilização da caixa que, apesar de pintada de preto, não absorvia todo o fluxo luminoso nela incidente, refletindo-o em parte. Além, também da textura do papelão, que por ser lisa, aumenta a reflexão. Como explicado em 2.4.2.2, essa medição do fluxo luminoso considera que toda a iluminância auferida pelo luxímetro é proveniente diretamente da lâmpada. Assim, como neste ambiente a quantidade de lux verificada pelo aparelho era fruto também das reflexões, o resultando final acabou majorado.

Existe também outro indício que corrobora a explicação do parágrafo anterior. A lâmpada LED CHINESA de 3W, figura 4.8(a), apresentou a maior diferença de fluxo luminoso entre os dois métodos, mais de 180%. E, não por coincidência, das lâmpadas testadas é a que emite luz de maneira mais concentrada, ver tabelas I.10 e II.10 nos anexos. A combinação desta característica com a reflexão das paredes da caixa resultou em valores de iluminância muito maiores que a realidade.

Uma outra análise interessante da tabela 4.5 é que, caso a linha correspondente a lâmpada incandescente da OSRAM seja excluída, nota-se uma ordem decrescente na diferença relativa, colunas seis e oito. Em ambos os métodos, as lâmpadas LED apresentaram os resultados mais próximos ao nominal, enquanto que as fluorescentes estão mais distantes. Uma explicação para esta tendência pode estar relacionada com o formato da lâmpada. Os cálculos do fluxo luminoso aproximam a fonte a um ponto no espaço, uma vez que a distância entre ela e o luxímetro é suficientemente grande. Essa aproximação é muito mais próxima da realidade nas lâmpadas LED com formato de bulbo do que nas fluorescentes compactas. A emissão nas lâmpadas LED, mesmo naquelas que possuem mais de um chip, acontecesse em uma área consideravelmente

pequena, ao passo que nas fluorescentes é muitas vezes maior, ao longo de todo o tubo.

Visando simplificar os cálculos, outra aproximação também considerada foi a emissão de luz simetricamente a um eixo que passa pelo centro da base. Conforme explicado em 2.4.2.2, permitiu-se então realizar um número pequeno de medições representando todo o espaço em volta da lâmpada. Este aspecto está mais distante da realidade nas incandescentes testadas, cujos filamentos formam praticamente uma reta perpendicular ao eixo. Já nas lâmpadas LED e fluorescente compactas existe uma simetria quase total em relação a um ponto central em um plano paralelo a base da lâmpada, ver figura 2.8, que deve resultar em uma emissão de radiação próxima, mas não perfeitamente simétrica em relação ao eixo.

Todas as aproximações feitas apresentam consequências no resultado final e justificam em parte as diferenças encontradas. Além disso, as condições de medições não eram exatamente as ideais. A obtenção de valores de iluminância majorados devido a reflexão deve ter acontecido em ambos os métodos. No primeiro, a questão da caixa preta já foi discutida e no segundo, apesar de minimizada, deve-se lembrar que as paredes e teto do ambiente eram claras e a área do cômodo poderia ser maior.

4.6 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O método 2 de medição de fluxo luminoso foi o mais preciso como discutido na seção anterior, por isso o cálculo da eficiência energética levou em conta apenas seu resultado.

Lâmpada		Medições		Eficiência Energética
Marca	Tecnologia	Iluminância(lm)	Potência(W)	lm/W
PHILIPS	LED	863	8.9	97
GOLDEN	LED	453	4.9	92
PHILIPS	Fluorescente	966	13.4	72
LSC	LED	413	6.0	69
OUROLUX	Fluorescente	948	14.5	65
CHINESA	LED OVO	151	2.4	63
LUZ SOLLAR	Fluorescente	769	15.6	49
CHINESA	LED MILHO	203	4.3	47
CHINESA	LED	138	4.1	34
OSRAM	Incandescente	515	38.7	13
CARREFOUR	Incandescente	713	61.0	12
PHILIPS	Incandescente	413	38.5	11

Tabela 4.6: Eficiência energética

É notável imediatamente pela tabela 4.6 que a maior eficiência foi obtida por uma lâmpada LED e, na última posição, quase nove vezes menos eficiente, encontra-se uma incandescente, conforme o esperado. O mais interessante, contudo, encontra-se entre os extremos, pois nem todas as LED estão no topo da classificação.

Os resultados comprovam mais uma vez que as lâmpadas incandescentes apresentam os piores níveis

de eficiência energética, sendo pelo menos quase quatro vezes pior do que as fontes com outra tecnologia. Entre as fluorescentes e as LED a comparação não é tão simples, mas é possível afirmar que as de origem chinesa apresentam rendimento pior do que as fluorescentes. Apenas um de seus exemplares posicionou-se a frente da fluorescente LUZ SOLLAR, mas faz-se necessário lembrar que este exemplar é antigo e apresentou um consumo de potência bem fora do padrão.

Outro ponto notório é a fluorescente PHILIPS ser mais eficiente do que a LED LSC. A primeira foi comprada recentemente para este experimento e prometia uma alta eficiência energética, portanto seus componentes devem ter sido escolhidos e projetados visando esta questão. Já a segunda custou metade das concorrentes equivalentes no mercado e é de uma marca holandesa que prima pelo baixo preço, provavelmente em detrimento da qualidade. E, além de tudo, os resultados obtidos neste estudo para as lâmpadas fluorescentes apresentaram fluxo luminoso superior em relação ao nominal, o que também pode explicar essa situação.

Feitas estas considerações, as LED de marcas respeitadas realmente apresentam rendimento superior às fluorescentes, chegando até a ser 50% mais eficazes e do ponto de vista técnico são as mais eficientes.

4.7 ANÁLISE ECONÔMICA

As quatro lâmpadas utilizadas nesta análise econômica foram compradas juntas para este trabalho há aproximadamente quatro meses na Leroy Merlin de Brasília. A tabela 4.7 mostra o preço e a eficiência calculada experimentalmente:

LÂMPADA	PREÇO(R\$)	EFICIÊNCIA(lm/W)
OSRAM 40W	3.47	13
OUROLUX 15W	7.9	65
PHILIPS 14W	8.59	72
GOLDEN 5W	19.9	92

Tabela 4.7: Preço e eficiência.

Supondo que elas emitem $600lm$ e utilizando as equações 3.11, 3.12 e 3.13, o consumo e o custo de operação por hora são dados na tabela 4.8.

LÂMPADA	CONSUMO(kWH)	CUSTO(R\$/H)
OSRAM 40W	0.04615	0.0194
OUROLUX 15W	0.00923	0.0039
PHILIPS 14W	0.00833	0.0035
GOLDEN 5W	0.00652	0.0027

Tabela 4.8: Consumo e custo de operação por hora.

À seguir, são apresentadas nas tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 comparações entre as lâmpadas duas a duas, aplicando as equações 3.14, 3.15 e 3.16.

A coluna "Retorno Investimento" se refere ao tempo de operação necessário para que a economia na conta de luz seja igual a diferença de preço entre as lâmpadas, sua unidade é a hora.

Analisando as tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 é possível concluir que o baixo preço da lâmpada incandescente não compensa a longo prazo. Comparando com as outras três, o investimento feito é recuperado em menos de 1000 horas de uso.

Entre as duas fluorescentes, o tempo de retorno do investimento na mais cara também é baixo, menos de 2000 horas. Evidenciando que até mesmo uma eficiência energética pouco maior pode compensar. Ver tabela 4.10.

Já entre a lâmpada LED e as duas fluorescentes, o tempo para se recuperar o investimento é bem elevado, mais de 10000 horas de uso, o que implica que a variável vida do equipamento também deva ser considerada. Devido a dificuldade de tempo inerente ao processo, não houve nenhum experimento em relação a esse ponto, dificultando uma análise mais realista. Entretanto, utilizando o valor de vida mediana especificado pelos fabricantes, a LED GOLDEN apresenta ampla vantagem, com vida mediana de 15.000h, contra 6.000 das fluorescentes. Ou seja, caso esses valores sejam verdadeiros, não somente o investimento inicial na LED é recuperado durante sua vida útil, como são necessários mais de duas lâmpadas fluorescentes para atingir o mesmo tempo de iluminação.

GOLDEN 5W	ECONOMIA(R\$/H)	DIFERENÇA PREÇO(R\$)	RETORNO INVESTIMENTO(H)
OSRAM 40W	0.0166	16.43	987
OUROLUX 15W	0.0011	12.00	10547
PHILIPS 14W	0.0008	11.31	14865

Tabela 4.9: Comparação 2x2 - GOLDEN

PHILIPS 14W	ECONOMIA(R\$/H)	DIFERENÇA PREÇO(R\$)	RETORNO INVESTIMENTO(H)
OSRAM 40W	0.0159	5.12	322
OUROLUX 15W	0.0004	0.69	1831

Tabela 4.10: Comparação 2x2 - PHILIPS 14W

OUROLUX 15W	ECONOMIA(R\$/H)	DIFERENÇA PREÇO(R\$)	RETORNO INVESTIMENTO(H)
OSRAM 40W	0.0155	4.43	286

Tabela 4.11: Comparação 2x2 - OUROLUX 15W

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O intuito principal deste trabalho é sugerir uma forma simples, mas válida de comparar a eficiência energética de diferentes lâmpadas, não se atendo apenas às especificações técnicas dos fabricantes. Nesse sentido, o resultado final apresentado é positivo, atendendo, dentro de 20% de precisão os objetivos iniciais. A grande incógnita era estabelecer um método de medição de fluxo luminoso que não utilizasse a esfera integradora, aparelho de alto custo que não estava à disposição dos estudos. A dificuldade em encontrar fontes sobre o tema não se restringiu apenas à produção científica brasileira, mas também verificou-se em nível internacional, em artigos em inglês. Poucas são as fontes que citam, mesmo que apenas teoricamente o cálculo do fluxo luminoso de maneira indireta.

Uma vez identificados os trabalhos que abordam o tema, principalmente [4], [13] e [14], foi possível relatar uma base teórica consistente que amparasse os procedimentos que culminaram nos métodos 1 e 2 descritos em 3.3 e 3.4.

Os resultados do primeiro mostraram-se distantes das especificações dos fabricantes, os valores finais foram majorados provavelmente pelo fato de que a tinta preta aplicada ao interior da caixa não foi suficiente para absorver todo o fluxo luminoso nela incidente. De modo que as reflexões intensificavam o valor da iluminância verificada pelo luxímetro e distorciam o cálculo do fluxo luminoso.

O segundo método, por sua vez, apresentou bons resultados, uma vez consideradas todas as dificuldades do processo, as aproximações feitas como a fonte puntiforme e a radiação de maneira simétrica, e que o próprio ambiente do experimento não é exatamente igual ao idealizado na teoria, com grandes dimensões e superfícies escuras. Levando em conta os fatores que influenciam o resultado final, como formato da lâmpada, suas dimensões e a área de emissão da luz é possível realizar uma comparação válida, simples e barata entre a energia total emitida por diferentes fontes. Permite também, mesmo que não rigorosamente, conferir as especificações dos fabricantes, algo bastante útil em se tratando de produtos de qualidade duvidosa.

Quanto aos testes aplicados nos exemplares, algumas conclusões podem ser tecidas. Primeiramente, mesmo grandezas consideradas mais simples, como a potência, podem apresentar valores reais bem diferentes do nominal, de modo que o mais confiável é realizar as medições e não confiar nas especificações.

Outro ponto é evidenciado pelos valores finais de eficiência energética, mostrando que as lâmpadas incandescentes possuem realmente um rendimento muito mais baixo do que as outras tecnologias e tanto do ponto de vista financeiro como de impacto ambiental são amplamente desvantajosas. Assim a gradual proibição da sua produção pelo governo é positiva.

A comparação entre a eficiência das LED e fluorescentes mostra que nem sempre os primeiros levam vantagem e que produtos de baixa qualidade podem acabar não compensando no final das contas. Uma citação especial é necessária em relação aos produtos encontrados em sites de exportação chineses. Muito

atrativos pelos preços reduzidos, não apresentam na maioria das vezes especificações alguma e foram os que obtiveram os piores rendimentos energéticos, perdendo até por larga margem para lâmpadas fluorescentes. Há relatos ainda de uma vida útil curta de acordo com compradores e se todas seguirem esse caminho, configuram-se um investimento barato que no final sai caro. Já lâmpadas LED de marcas conhecidas realmente apresentaram uma eficiência energética superior a todas as fluorescentes, configurando-se uma melhor alternativa do ponto de vista ecológico, uma vez que podem produzir uma mesma quantidade de lúmens consumindo menos energia.

A análise econômica, apesar de simples, mostra que mesmo sendo mais caras, as lâmpadas LED podem proporcionar uma economia na conta de luz ao longo da sua utilização que retorna o investimento feito em sua aquisição. Somando-se a isso ainda o fato de que elas possuem uma vida mediana nominal bem mais elevada do que as concorrentes, tornam-se muito vantajosas também financeiramente.

Por último, unindo a elevada eficiência energética, que proporciona menor impacto ao meio ambiente, à vantagem financeira, que provavelmente aumentará a medida que os preços de venda caírem, a iluminação LED caminha para ser a grande tendência no futuro.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Tomando como base o método 2, estudos futuros podem ser realizados com o objetivo aumentar a precisão dos resultados finais. Algumas sugestões em relação a esse ponto são utilizar um ambiente mais próximo do ideal, com grandes dimensões e superfícies escuras a fim de reduzir ao máximo o nível de reflexão. Seria muito interessante também estabelecer um procedimento para fixar precisamente a distância entre fonte e medidor, visto que essa variável influencia sensivelmente o resultado final do fluxo luminoso. Outro aspecto seria modificar a posição do "ponto luminoso" da lâmpada que aqui foi considerado sempre na extremidade da fonte.

A fim de ampliar as análises, sugere-se buscar uma montagem que possibilite medições de lâmpadas fluorescentes tubulares. Devido ao seu tamanho, ao modo como são conectadas às instalações e a existência em separado dos reatores essa montagem tende a ser mais complicada, exigindo cômodos maiores e suportes especiais. Acredita-se, porém, que o seu formato possibilite a utilização de um envoltório imaginário na forma de cilindro, abrindo mão das medidas de ângulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADMINISTRATION, E. I. *International Eergy Statistics*. 2014 (accessed November, 2014). <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=2&cid=ww,&syid=1980&eyid=2011&unit=BKWH>.
- [2] PROCEL, C. B. de Informação de E. E. *Eficiência energética. Glossário*. 2014 (accessed November, 2014). <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={F392607B-F84E-4A08-9327-A0CCC2594E04}>.
- [3] FREITAS, P. C. F. de et al. *Luminotécnica e lâmpadas elétricas*. 2009.
- [4] COSTA, G. J. C. da. *Iluminação econômica: cálculo e avaliação*. EDIPUCRS, 2006.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5413: Iluminância de interiores*. Abr. 1992.
- [6] SALOMÃO, T. M. *Eficiência energética: projetos luminotécnicos em plantas industriais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- [7] PINTO, R. C. *Curso de fotometria - Aula 3 - Conhecendo mais conceitos e grandezas fotométricas - Instituto de Eletrotécnica e Energia(IEE-USP)*. 2004 (accessed November, 2014). https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iee.usp.br%2Fbiblioteca%2Fproducao%2F2004%2FArtigos%2520de%2520Periodicos%2Finaldo_aula5.pdf&ei=cF9vVISwFoiaNvLbgbgE&usg=AFQjCNEb_In3H0Us7leTBJ1SQDjwW27Hrw&sig2=w-jvs2KsUEk15uCZdNZxMw&bvm=bv.80185997,d.eXY.
- [8] NEVES, G. D.; SCARAZZO, P. S. Estudo comparativo entre duas lâmpadas de descarga de baixa pressão: análise de viabilidade econômica. *Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo*, n. 12, 2014.
- [9] SANTOS, A. S. d. *Reator eletrônico multifrequência para lâmpada fluorescente T5 com pré-aquecimento por tensão*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2004.
- [10] RIBEIRO, A. C. C. et al. O emprego da tecnologia led na iluminação pública. *e-Xacta*, v. 5, n. 1, 2012.
- [11] IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. *Análise Básica de Circuitos para Engenharia*. LTC, 2010.
- [12] RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. *CÁLCULO NUMÉRICO - Aspectos teóricos e computacionais*. McGRAW-HILL, 1988.
- [13] PINTO, R. C. *Curso de fotometria - Aula 5 - Goniofotômetros e determinação de fluxo luminoso - Instituto de Eletrotécnica e Energia(IEE-USP)*. 2004 (accessed November, 2014). <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&>

uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iee.usp.br%2Fbiblioteca%
2Fproducao%2F2004%2FArtigos%2520de%2520Periodicos%2Ffrinaldo_aula5.
pdf&ei=cF9vVISwFoiaNvLbgbgE&usg=AFQjCNEb_In3H0Us7leTBJ1SQDjwW27Hrw&
sig2=w-jvs2KsUEk15uCZdNZxMw&bvm=bv.80185997,d.eXY.

- [14] MARKEVICIUS, V. et al. The means for evaluation of light source characteristics. *Elektronika ir Elektrotechnika*, v. 19, n. 1, p. 48–51, 2013.

I. RESULTADO - FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 1

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	191	2	2
7.5 / 22.5	0.46	188	17	19
22.5 / 37.5	0.48	188	35	54
37.5 / 52.5	0.50	177	50	104
52.5 / 67.5	0.52	164	63	167
67.5 / 82.5	0.55	150	72	239
82.5 / 97.5	0.58	136	75	314
97.5 / 112.5	0.61	133	79	392
112.5 / 127.5	0.64	120	70	462
127.5 / 142.5	0.66	125	64	526
142.5 / 157.5	0.68	110	42	569
157.5 / 172.5	0.70	41	8	577

Tabela I.1: Fluxo luminoso - Método 1 - OSRAM 40W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	158	2	2
7.5 / 22.5	0.46	178	16	18
22.5 / 37.5	0.48	178	33	51
37.5 / 52.5	0.50	168	48	99
52.5 / 67.5	0.52	157	60	159
67.5 / 82.5	0.55	150	72	230
82.5 / 97.5	0.58	130	71	302
97.5 / 112.5	0.61	120	71	373
112.5 / 127.5	0.64	117	68	441
127.5 / 142.5	0.66	116	59	500
142.5 / 157.5	0.68	112	43	543
157.5 / 172.5	0.70	71	15	558

Tabela I.2: Fluxo luminoso - Método 1 - PHILIPS 40W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.47	316	4	4
7.5 / 22.5	0.47	301	29	32
22.5 / 37.5	0.48	293	56	89
37.5 / 52.5	0.50	299	87	176
52.5 / 67.5	0.52	280	110	286
67.5 / 82.5	0.55	249	120	405
82.5 / 97.5	0.58	206	113	519
97.5 / 112.5	0.61	194	113	632
112.5 / 127.5	0.63	198	113	745
127.5 / 142.5	0.66	202	101	847
142.5 / 157.5	0.68	189	71	917
157.5 / 172.5	0.69	122	24	942

Tabela I.3: Fluxo luminoso - Método 1 - CARREFOUR 60W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	136	2	2
7.5 / 22.5	0.46	137	12	14
22.5 / 37.5	0.48	210	39	53
37.5 / 52.5	0.50	292	83	136
52.5 / 67.5	0.52	338	129	265
67.5 / 82.5	0.55	368	176	441
82.5 / 97.5	0.58	363	200	641
97.5 / 112.5	0.61	301	178	819
112.5 / 127.5	0.64	235	137	956
127.5 / 142.5	0.66	171	87	1043
142.5 / 157.5	0.68	106	41	1084
157.5 / 172.5	0.70	55	11	1095

Tabela I.4: Fluxo luminoso - Método 1 - PHILIPS 14W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	186	2	2
7.5 / 22.5	0.46	225	21	23
22.5 / 37.5	0.48	298	55	78
37.5 / 52.5	0.50	350	99	178
52.5 / 67.5	0.52	381	146	324
67.5 / 82.5	0.55	381	181	505
82.5 / 97.5	0.58	351	193	699
97.5 / 112.5	0.61	296	175	874
112.5 / 127.5	0.64	217	126	1000
127.5 / 142.5	0.66	151	77	1077
142.5 / 157.5	0.68	90	35	1111
157.5 / 172.5	0.70	34	7	1118

Tabela I.5: Fluxo luminoso - Método 1 - OUROLUX 15W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.45	171	2	2
7.5 / 22.5	0.45	188	16	18
22.5 / 37.5	0.47	258	46	65
37.5 / 52.5	0.49	307	85	149
52.5 / 67.5	0.51	339	128	277
67.5 / 82.5	0.55	343	162	439
82.5 / 97.5	0.58	314	173	612
97.5 / 112.5	0.61	258	154	766
112.5 / 127.5	0.64	205	121	887
127.5 / 142.5	0.67	134	70	957
142.5 / 157.5	0.69	75	29	987
157.5 / 172.5	0.71	33	7	993

Tabela I.6: Fluxo luminoso - Método 1 - LUZ SOLLAR 21W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	737	8	8
7.5 / 22.5	0.46	693	63	72
22.5 / 37.5	0.48	652	121	193
37.5 / 52.5	0.50	559	159	351
52.5 / 67.5	0.52	450	172	524
67.5 / 82.5	0.55	340	162	686
82.5 / 97.5	0.58	244	134	820
97.5 / 112.5	0.61	160	95	915
112.5 / 127.5	0.64	88	51	966
127.5 / 142.5	0.66	45	23	989
142.5 / 157.5	0.68	19	7	996
157.5 / 172.5	0.70	7	1	998

Tabela I.7: Fluxo luminoso - Método 1 - PHILIPS 9.5W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.45	273	3	3
7.5 / 22.5	0.45	261	23	26
22.5 / 37.5	0.47	241	43	69
37.5 / 52.5	0.49	219	61	129
52.5 / 67.5	0.51	192	72	202
67.5 / 82.5	0.55	170	80	282
82.5 / 97.5	0.58	140	77	359
97.5 / 112.5	0.61	116	69	428
112.5 / 127.5	0.64	89	52	480
127.5 / 142.5	0.67	67	35	515
142.5 / 157.5	0.69	50	20	535
157.5 / 172.5	0.71	32	7	542

Tabela I.8: Fluxo luminoso - Método 1 - GOLDEN 5W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	255	3	3
7.5 / 22.5	0.46	245	22	25
22.5 / 37.5	0.48	229	43	68
37.5 / 52.5	0.50	213	60	128
52.5 / 67.5	0.52	192	74	202
67.5 / 82.5	0.55	163	78	279
82.5 / 97.5	0.58	123	68	347
97.5 / 112.5	0.61	99	58	406
112.5 / 127.5	0.64	70	41	446
127.5 / 142.5	0.66	46	24	470
142.5 / 157.5	0.68	25	10	479
157.5 / 172.5	0.70	16	3	483

Tabela I.9: Fluxo luminoso - Método 1 - LSC 6W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.51	903	13	13
7.5 / 22.5	0.53	628	76	88
22.5 / 37.5	0.60	418	125	213
37.5 / 52.5	0.71	124	73	286
52.5 / 67.5	0.86	42	44	330
67.5 / 82.5	1.03	19	32	362
82.5 / 97.5	1.21	14	33	395
97.5 / 112.5	1.39	0	0	395
112.5 / 127.5	1.56	0	0	395
127.5 / 142.5	1.70	0	0	395
142.5 / 157.5	1.82	0	0	395
157.5 / 172.5	1.89	0	0	395

Tabela I.10: Fluxo luminoso - Método 1 - CHINESA 3X1W

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.47	149	2	2
7.5 / 22.5	0.47	149	14	16
22.5 / 37.5	0.48	147	28	44
37.5 / 52.5	0.50	138	40	84
52.5 / 67.5	0.52	108	42	127
67.5 / 82.5	0.55	70	34	160
82.5 / 97.5	0.58	24	13	174
97.5 / 112.5	0.61	13	8	181
112.5 / 127.5	0.63	5	3	184
127.5 / 142.5	0.66	0	0	184
142.5 / 157.5	0.68	0	0	184
157.5 / 172.5	0.69	0	0	184

Tabela I.11: Fluxo luminoso - Método 1 - CHINESA OVO

Zona entre(°)	R(m)	E(lux)	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 7.5	0.46	38	0	0
7.5 / 22.5	0.46	38	3	4
22.5 / 37.5	0.48	47	9	13
37.5 / 52.5	0.50	56	16	29
52.5 / 67.5	0.52	69	27	55
67.5 / 82.5	0.55	76	36	91
82.5 / 97.5	0.58	78	43	134
97.5 / 112.5	0.61	73	43	178
112.5 / 127.5	0.64	62	36	214
127.5 / 142.5	0.66	43	22	236
142.5 / 157.5	0.68	28	11	247
157.5 / 172.5	0.70	15	3	250

Tabela I.12: Fluxo luminoso - Método 1 - CHINESA MILHO

II. RESULTADO - FLUXO LUMINOSO - MÉTODO 2

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	62	65	64	4	4
10 / 20	65	70	68	12	16
20 / 30	70	72	71	21	37
30 / 40	72	70	71	29	66
40 / 50	70	68	69	34	100
50 / 60	68	72	70	40	140
60 / 70	72	78	75	48	187
70 / 80	78	87	83	56	243
80 / 90	87	69	78	54	298
90 / 100	69	65	67	47	344
100 / 110	65	65	65	44	388
110 / 120	65	62	64	40	429
120 / 130	62	68	65	37	466
130 / 140	68	66	67	33	499
140 / 150	66	6	36	14	514
150 / 160	6	0	3	1	515

Tabela II.1: Fluxo luminoso - Método 2 - OSRAM 40W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	58	54	56	3	3
10 / 20	54	51	53	10	13
20 / 30	51	60	56	16	29
30 / 40	60	60	60	24	53
40 / 50	60	61	61	30	83
50 / 60	61	60	61	35	118
60 / 70	60	58	59	37	155
70 / 80	58	61	60	40	196
80 / 90	61	56	59	41	237
90 / 100	56	42	49	34	271
100 / 110	42	50	46	31	302
110 / 120	50	49	50	31	333
120 / 130	49	52	51	29	362
130 / 140	52	58	55	27	390
140 / 150	58	35	47	19	408
150 / 160	35	0	18	5	413

Tabela II.2: Fluxo luminoso - Método 2 - PHILIPS 40W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	98	95	97	6	6
10 / 20	95	99	97	18	23
20 / 30	99	112	106	31	55
30 / 40	112	117	115	46	101
40 / 50	117	112	115	57	157
50 / 60	112	111	112	64	221
60 / 70	111	114	113	71	293
70 / 80	114	113	114	77	369
80 / 90	113	99	106	74	443
90 / 100	99	72	86	60	503
100 / 110	72	67	70	47	550
110 / 120	67	66	67	42	592
120 / 130	66	77	72	41	633
130 / 140	77	82	80	39	673
140 / 150	82	64	73	29	702
150 / 160	64	0	32	11	713

Tabela II.3: Fluxo luminoso - Método 2 - CARREFOUR 60W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	52	62	57	3	3
10 / 20	62	87	75	13	17
20 / 30	87	106	97	29	46
30 / 40	106	130	118	47	93
40 / 50	130	141	136	67	160
50 / 60	141	172	157	90	250
60 / 70	172	187	180	114	364
70 / 80	187	184	186	125	489
80 / 90	184	141	163	113	602
90 / 100	141	109	125	87	690
100 / 110	109	111	110	74	764
110 / 120	111	102	107	68	832
120 / 130	102	90	96	55	887
130 / 140	90	76	83	41	928
140 / 150	76	51	64	26	953
150 / 160	51	0	26	13	966

Tabela II.4: Fluxo luminoso - Método 2 - PHILIPS 14W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	67	76	72	4	4
10 / 20	76	97	87	16	20
20 / 30	97	115	106	31	51
30 / 40	115	125	120	48	100
40 / 50	125	141	133	66	165
50 / 60	141	153	147	84	250
60 / 70	153	163	158	100	350
70 / 80	163	168	166	112	462
80 / 90	168	156	162	113	575
90 / 100	156	125	141	98	673
100 / 110	125	114	120	81	754
110 / 120	114	103	109	69	823
120 / 130	103	86	95	54	877
130 / 140	86	69	78	38	915
140 / 150	69	49	59	24	939
150 / 160	49	0	25	9	948

Tabela II.5: Fluxo luminoso - Método 2 - OUROLUX 15W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	56	66	61	4	4
10 / 20	66	79	73	13	17
20 / 30	79	89	84	25	42
30 / 40	89	104	97	39	80
40 / 50	104	117	111	55	135
50 / 60	117	126	122	70	205
60 / 70	126	127	127	80	285
70 / 80	127	122	125	84	369
80 / 90	122	121	122	85	454
90 / 100	121	107	114	80	534
100 / 110	107	98	103	69	603
110 / 120	98	85	92	58	661
120 / 130	85	70	78	44	705
130 / 140	70	59	65	32	737
140 / 150	59	46	53	21	759
150 / 160	46	0	23	10	769

Tabela II.6: Fluxo luminoso - Método 2 - LUZ SOLLAR 21W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	266	258	262	16	16
10 / 20	258	256	257	47	63
20 / 30	256	235	246	73	135
30 / 40	235	211	223	90	225
40 / 50	211	189	200	99	324
50 / 60	189	162	176	101	424
60 / 70	162	149	156	99	523
70 / 80	149	124	137	92	615
80 / 90	124	88	106	74	689
90 / 100	88	71	80	55	745
100 / 110	71	54	63	42	787
110 / 120	54	40	47	30	817
120 / 130	40	33	37	21	838
130 / 140	33	25	29	14	852
140 / 150	25	18	22	9	861
150 / 160	18	0	9	3	863

Tabela II.7: Fluxo luminoso - Método 2 - PHILIPS 9.5W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	97	97	97	6	6
10 / 20	97	97	97	18	23
20 / 30	97	92	95	28	51
30 / 40	92	89	91	36	88
40 / 50	89	89	89	44	132
50 / 60	89	78	84	48	180
60 / 70	78	79	79	50	230
70 / 80	79	68	74	50	279
80 / 90	68	61	65	45	324
90 / 100	61	44	53	37	361
100 / 110	44	38	41	28	389
110 / 120	38	37	38	24	412
120 / 130	37	31	34	20	432
130 / 140	31	22	27	13	445
140 / 150	22	9	16	6	451
150 / 160	9	0	5	1	453

Tabela II.8: Fluxo luminoso - Método 2 - GOLDEN 5W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	87	87	87	5	5
10 / 20	87	85	86	16	21
20 / 30	85	85	85	25	46
30 / 40	85	82	84	34	80
40 / 50	82	78	80	40	119
50 / 60	78	74	76	44	163
60 / 70	74	68	71	45	208
70 / 80	68	65	67	45	253
80 / 90	65	54	60	42	294
90 / 100	54	43	49	34	328
100 / 110	43	34	39	26	354
110 / 120	34	29	32	20	374
120 / 130	29	24	27	15	389
130 / 140	24	24	24	12	401
140 / 150	24	16	20	8	409
150 / 160	16	0	8	4	413

Tabela II.9: Fluxo luminoso - Método 2 - LSC 6W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	318	215	267	16	16
10 / 20	215	172	194	35	51
20 / 30	172	115	144	42	94
30 / 40	115	38	77	31	124
40 / 50	38	8	23	11	136
50 / 60	8	0	4	2	138
60 / 70	0	0	0	0	138
70 / 80	0	0	0	0	138
80 / 90	0	0	0	0	138
90 / 100	0	0	0	0	138
100 / 110	0	0	0	0	138
110 / 120	0	0	0	0	138
120 / 130	0	0	0	0	138
130 / 140	0	0	0	0	138
140 / 150	0	0	0	0	138
150 / 160	0	0	0	0	138

Tabela II.10: Fluxo luminoso - Método 2 - CHINESA 3X1W

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	54	57	56	3	3
10 / 20	57	59	58	11	14
20 / 30	59	58	59	17	31
30 / 40	58	56	57	23	54
40 / 50	56	48	52	26	80
50 / 60	48	42	45	26	106
60 / 70	42	27	35	22	128
70 / 80	27	14	21	14	141
80 / 90	14	7	11	7	149
90 / 100	7	0	4	2	151
100 / 110	0	0	0	0	151
110 / 120	0	0	0	0	151
120 / 130	0	0	0	0	151
130 / 140	0	0	0	0	151
140 / 150	0	0	0	0	151
150 / 160	0	0	0	0	151

Tabela II.11: Fluxo luminoso - Método 2 - CHINESA OVO

Zona entre(°)	$E_i(lux)$	$E_{i+1}(lux)$	$E_m(lux)$	Fluxo zona(lm)	Fluxo acumulado(lm)
0 / 10	15	16	16	1	1
10 / 20	16	19	18	3	4
20 / 30	19	21	20	6	10
30 / 40	21	24	23	9	19
40 / 50	24	24	24	12	31
50 / 60	24	32	28	16	47
60 / 70	32	37	35	22	69
70 / 80	37	39	38	26	95
80 / 90	39	39	39	27	122
90 / 100	39	28	34	23	145
100 / 110	28	25	27	18	163
110 / 120	25	22	24	15	178
120 / 130	22	19	21	12	190
130 / 140	19	15	17	8	198
140 / 150	15	6	11	4	202
150 / 160	6	0	3	1	203

Tabela II.12: Fluxo luminoso - Método 2 - CHINESA MILHO