

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CESAR AUGUSTO ROVEDA DEBONA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TUBO SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA
ILUMINAÇÃO NATURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

CESAR AUGUSTO ROVEDA DEBONA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TUBO SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA
ILUMINAÇÃO NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jean-Marc Stephane Lafay

Co - Orientador: Anderson Diogo Spacek

PATO BRANCO

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Desenvolvimento de um Tubo Solar de Baixo Custo para Iluminação Natural

Cesar Augusto Roveda Debona

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 20/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Anderson Diogo Spacek
(Faculdade SATC)
Co-Orientador

Prof. Dr. Fabiano Ostapiv
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente à minha Universidade (UTFPR – Pato Branco) e ao meu curso de Engenharia Mecânica. Dedico também à humanidade, que precisa buscar formas de salvar o Planeta Terra, através da sustentabilidade, para reduzir a crescente degradação ambiental causada pelo sistema político-econômico mundial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Departamento de Engenharia Mecânica, que juntamente com todos seus servidores me auxiliaram durante este trabalho e ao longo da minha caminhada universitária.

Aos meus orientadores do Trabalho de Conclusão de Curso Jean-Marc Stephane Lafay e Anderson Diogo Spacek, que me guiaram para o melhor deste trabalho.

Departamento da Engenharia Elétrica e Departamento de Engenharia Civil, agradeço por me proporcionarem ferramentas e equipamentos necessários para este trabalho. Também devo agradecer ao Departamento de Projetos que me auxiliou com a escolha e furação da sala de construção e testes.

Gratidão à Faculdade SATC pelo empréstimo do Domo e Difusor, que foram essenciais para o sucesso deste trabalho, às empresas Ecovision, Atitude Engenharia, Senai, Marel e Faculdade Fadep, por fornecerem os equipamentos luxímetros necessários para as aferições de iluminação deste projeto. Também à Willians Francelino que emprestou sua câmera profissional para auxiliar nas medições.

Finalmente devo ser eternamente grato às pessoas que eu amo e fazem parte da minha vida, especialmente à Pâmela Norberto Tigre e à minha família que estiveram juntos comigo em todos os momentos bons e ruins.

EPÍGRAFE

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”.
(Mahatma Gandhi)

“Be the change you want to see in the world”.
(Mahatma Gandhi).

RESUMO

DEBONA, Cesar. Desenvolvimento de um Tubo Solar de Baixo Custo para Iluminação Natural. 2018. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Tubos solares são equipamentos utilizados para canalizar a luz natural para dentro de ambientes, gerando economia de energia elétrica durante os períodos ensolarados e favorecendo a saúde de seus ocupantes. Estes equipamentos, de elevado custo e pouco difundidos no Brasil, são constituídos de três partes: domo, tubo reflexivo e difusor. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo geral, desenvolver um tubo solar feito de espelhos planos convencionais, tendo em vista o baixo custo e o uso de materiais disponíveis. Além do mais, domo e difusor não foram desenvolvidos, sendo utilizados modelos comerciais. Sendo assim, após metodologia de projeto, construção e avaliação, os resultados em questão de iluminação e custo foram satisfatórios, sendo que na maior parte dos dias ensolarados de testes, a iluminância excedeu o mínimo recomendado pela norma para uma sala de aula, gerando economia de até 2160 Wh em um dia. Além disso, é mostrado que o custo estimado para construção do tubo solar desenvolvido neste trabalho é de 360 reais.

Palavras-chave: Tubo Solar, Tubo Solar Hexagonal, Iluminação Natural, Espelhos.

ABSTRACT

DEBONA, Cesar. Development of a Low-Cost Solar Tube for Natural Lighting. 2018. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Solar tubes are equipment used to transfer natural light into environments, generating energy savings during sunny periods and favoring the health of its occupants. This equipment, that has high cost and is little diffused in Brazil, is constituted of three parts: a dome, a reflective tube and a diffuser. Therefore, this work has, as general objective, developing a solar tube made of conventional flat mirrors, considering the low cost and the use of available materials. Moreover, the dome and the diffuser were not developed, and commercial models were used. Therefore, after design, construction and evaluation, the results in question of illumination and cost were satisfactory, and for most of the sunny days of tests, the illuminance exceeded the minimum recommended by the norm for a classroom, generating savings of up to 2160 Wh in a day. In addition, it is shown that the estimated cost for building the solar tube, developed in this works, is 360 reais.

Keywords: Solar Tube, Hexagon Solar Tube, Natural Lighting, Mirrors.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo De Energia Por Classe No Brasil	17
Tabela 2 – Fator De Utilização Do Recinto (Tabela Parcial)	25
Tabela 3 – Iluminância Mínima Para Diferentes Ambientes De Acordo Com A Nbriso_Cie8995-1	27
Tabela 4 – Equações Da Transmitância Para Várias Seções De MLPS	30
Tabela 5 – Parâmetros Utilizados Na Equação De Edmonds (2010) Para A Seção Hexagonal	41
Tabela 6 – Lista De Materiais Para Construção Do Tubo Solar Hexagonal	44
Tabela 7 - Luxímetros Utilizados No Método De Medição 1	50
Tabela 8 - Luxímetros Utilizados No Método De Medição 2	51
Tabela 9 - Informações Técnicas Da Lâmpada De Comparação	52
Tabela 10 - Informações Sobre As Coletas	53
Tabela 11 – Informações Do Equipamento Desenvolvido	54
Tabela 12 – Dados De Iluminamento Interno e Externo Do Dia 05/10/2018	55
Tabela 13 – Posicionamento Solar 05/10/2018	58
Tabela 14 – Dados De Iluminamento Interno E Externo Do Dia 07/11/2018	59
Tabela 15 – Posicionamento Solar 07/11/2018	62
Tabela 16 – Dados De Iluminamento Interno E Externo Do Dia 08/11/2018	63
Tabela 17 – Posicionamento Solar 08/11/2018	66
Tabela 18 – Fluxo Luminoso Solar Gerado E Faltante 05/10/2018	68
Tabela 19 – Fluxo Luminoso Solar Gerado E Faltante 07/11/2018	70
Tabela 20 – Fluxo Luminoso Solar Gerado E Faltante 08/11/2018	72
Tabela 21 – Orçamento Do Tubo Solar	74
Tabela 22 – Resultados Do Tubo Solar Hexagonal	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição Do Consumo De Energia Elétrica Por Uso Final No Setor Industrial	18
Figura 2 - Distribuição Do Consumo De Energia Elétrica Por Uso Final No Setor Residencial	18
Figura 3 - Distribuição Do Consumo De Energia Elétrica Por Uso Final No Setor Comercial	18
Figura 4 - Comparação Da Energia Solar Com Outras Fontes De Energia	20
Figura 5 - Espectro Da Radiação Solar Incluindo Um Detalhamento Da Faixa Visível Humana	20
Figura 6 - Processos De Interação Da Radiação Solar Com Os Principais Constituintes Atmosféricos	21
Figura 7 - Total Diário Da Irradiação Global Horizontal – Média Anual	22
Figura 8 - Sistema Sunpipe	29
Figura 9 - Geometria Especificando Parâmetros de um MLP Retangular e a Direção Luz	30
Figura 10 – Simetria Reflexiva Na Seção Transversal De Um Triângulo Equilátero De Lado W	31
Figura 11 – Simetria Reflexiva De Uma Seção Transversal De Um Triângulo Retângulo De Hipotenusa W.....	31
Figura 12 - Camadas De Proteção Do Espelho Mirage	34
Figura 13 – Fluxograma Das Etapas Do Trabalho	36
Figura 14 – Gráfico Da Transmitância Em Função Do Ângulo De Incidência, Obtido Pelas Equações De Edmonds (2010).....	38
Figura 15 – Desenho Das Seções Transversais Inscritas Na Circunferência Da Lente Difusora Comercial	39
Figura 16 – Gráfico Da Potência Transmissiva X Ângulo De Incidência	39

Figura 17 – Desenho Da Seção Transversal Hexagonal Do Tubo De Espelhos.....	40
Figura 18 – Desenho Cad 3d Do Tubo Solar Hexagonal Feito Com Paredes De Espelhos Convencionais	42
Figura 19 – Representação Da Seção Transversal Das Peças Em MDF Utilizadas Na Estrutura De Sustentação Do Tubo Solar Hexagonal.....	42
Figura 20 – Representação Da Estrutura Central E Sua Seção Transversal	43
Figura 21 – Representação da Montagem da Estrutura que Compõe as Extremidades e sua Seção Transversal.....	44
Figura 22 – Etapa De Colagem Dos Espelhos Convencionais E A Estrutura	46
Figura 23 – Finalizada A Estapa De Colagem Dos Espelhos De Vidro	46
Figura 24 – Tubo Solar Hexagonal Finalizado	47
Figura 25 – Fotografia Da Seção Transversal Do Tubo Solar Hexagonal	47
Figura 26 – Resultado Da Instalação Do Tubo Solar Hexagonal	48
Figura 27 – Depósito Em Frente Ao Bloco J1 da Utfpr Campus Pato Branco, Onde o Tubo Solar Hexagonal Foi Instalado	49
Figura 28 – Esquema Da Distribuição Interna Dos Sensores De Iluminância Do Primeiro Método	50
Figura 29 – Distribuição Dos Sensores De Iluminância Para O Segundo Método ..	51
Figura 30 – Tubo Solar Hexagonal Em Ação	53
Figura 31 – Gráfico Da Média Da Iluminamento Interna E Externa, Medidos De Acordo Com O Primeiro Método No Dia 05/10/2018	56
Figura 32 – Gráfico Da Iluminância Interna, Para Cada Ponto De Medição Medidos De Acordo Com O Primeiro Método No Dia 05/10/2018	57
Figura 33 – Gráfico Da Média Da Iluminamento Interna E Externa, Medidos De Acordo Com O Segundo Método No Dia 07/11/2018	60
Figura 34 – Gráfico Da Iluminância Interna, Para Cada Ponto De Medição Medidos De Acordo Com O Segundo Método No Dia 07/11/2018	61
Figura 35 – Gráfico Da Média Da Iluminamento Interna E Externa, Medidos De Acordo Com O Segundo Método No Dia 08/11/2018.....	64

Figura 36 – Gráfico Da Iluminância Interna, Para Cada Ponto De Medição Medidos De Acordo Com O Segundo Método No Dia 08/11/2018	65
Figura 37 – Trajeto Solar No Dia 08/11/2018	67
Figura 38 – Gráfico Do Fluxo Luminoso Solar Gerado E Faltante 05/10/2018	69
Figura 39 – Gráfico Do Fluxo Luminoso Solar Gerado E Faltante 07/11/2018	71
Figura 40 – Gráfico Do Fluxo Luminoso Solar Gerado E Faltante 08/11/2018	73
Figura 41 – Fotografia Da Concentração De Raios Solares Na Sala De Testes	75
Figura 42 - Fotografia Da Concentração De Raios Solares Na Parede	75
Figura 43 - Fotografia Das Frestas Causadas Pelos Problemas De Usinagem E Colagem	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA DOS OBJETIVOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 A ENERGIA NO BRASIL.....	18
2.2 A ENERGIA SOLAR.....	20
2.3 LUZ NATURAL	24
2.4 ILUMINAÇÃO DE INTERIORES	24
2.4.1 Iluminância	24
2.4.2 Fluxo Luminoso	25
2.4.3 Reflectância.....	25
2.4.4 Cálculo Luminotécnico	25
2.4.5 Recomendações de Iluminância para Diferentes Ambientes	26
2.5 ILUMINAÇÃO NATURAL TUBULAR.....	28
2.8 ESPELHOS	34
3 METODOLOGIA	37
3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS E PROJETO DE CONSTRUÇÃO	37
3.2 CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DO TUBO SOLAR.....	45
3.3 MEDIÇÕES	50
3.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS DADOS.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 APRESENTAÇÃO DAS INFORMAÇÕES COLETADAS	55
4.1.1 Dia 05 de Outubro de 2018	55
4.1.2 Dia 07 de Novembro de 2018.....	59
4.1.3 Dia 08 de Novembro de 2018.....	63

4.2 ANÁLISE E COMPARAÇÃO	68
4.2.1 Dia 05 de Outubro de 2018	68
4.2.2 Dia 07 de Novembro de 2018.....	71
4.2.2 Dia 08 de Novembro de 2018.....	73
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	79

1 INTRODUÇÃO

É notório a crescente demanda por energia elétrica a medida que a humanidade se desenvolve. A tarefa de suprir a demanda com energia sustentável é muito complexa e desafiadora, e suas dimensões são ao mesmo tempo sociais, tecnológicas, econômicas e políticas, além de globais. Pessoas em todas as partes do mundo tem o importante papel de moldar o futuro do setor energético através de seu comportamento, preferências e escolha do estilo de vida (*LIGHTING THE WAY: TOWARD A SUSTAINABLE ENERGY FUTURE, 2007*).

No Brasil recentemente houveram episódios de falhas no sistema de energia elétrica, como em 2015 quando uma grave crise energética afetou o país devido à má gestão do governo e falta de chuvas (ENERGIA INTELIGENTE UFJF, 2015). Além disso, o ano de 2018 iniciou-se com o Nordeste enfrentando uma grave crise hídrica que afetou os reservatórios da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (Mozart Luna, 2018), contribuindo para a crise energética que obrigou o governo a utilizar usinas termoeletricas, gerando as bandeiras tarifárias que encareceram as contas de luz. Dessa forma, é evidente a necessidade de soluções para o aumento da oferta ou diminuição da demanda, porém ampliar a oferta significa gerar algum tipo de impacto ambiental, como por exemplo as hidrelétricas, que com as inundações causam diversos problemas ambientais e sociais.

Para atingir os objetivos de sustentabilidade, serão exigidas alterações não apenas no modo em que a energia será oferecida, mas no modo como ela é utilizada. Oportunidades de mudança pelo lado da demanda são tão valiosas e diversas quanto as do lado da oferta, e quase sempre oferecem significativos benefícios econômicos e de longo prazo (*LIGHTING THE WAY: TOWARD A SUSTAINABLE ENERGY FUTURE, 2007*).

Sendo assim, algumas alternativas interessantes são o aperfeiçoamento das tecnologias consumidoras para um melhor rendimento, adaptações para utilização de energia solar e por fim, o que será tratado neste trabalho, a busca por alternativas de baixo custo para maior difusão e utilização de tecnologias mais ecológicas.

Estima-se que em torno de 20% da energia elétrica no Brasil é utilizada para iluminação (ABILUX, 2015^a), um setor que tem um grande potencial para implantação de tecnologias sustentáveis baseadas na energia solar, uma vez que

umas das funções fundamentais do Sol é iluminar a Terra. Nesse contexto, destacam-se os chamados *Tubular Daylighting Device (TDD)*, *Tubular Daylight Guidance System (TDGS)*, ou ainda simplesmente tubos solares, que são tecnologias modernas e sustentáveis, porém com um valor muito alto, impossibilitando a difusão para a real atenuação do maior problema, que é a falta de energia ou excesso de demanda.

A tecnologia dos tubos solares é baseada nos princípios da reflexão, onde um domo que fica no telhado da edificação tem a função básica de captar os raios solares, na sequência, o tubo reflexivo conduz os mesmos até o difusor, que finalmente tem a função de espalhar os raios solares no ambiente da maneira mais homogênea possível. No entanto, estas tecnologias apesar de totalmente interessantes do ponto de vista energético, trazem consigo a desvantagem do seu elevado custo de aquisição e o desconhecimento de sua existência pela maior parte da população brasileira. Estas luminárias naturais, podem substituir a luz artificial durante o dia, enquanto houver incidência solar suficiente, gerando economia de energia elétrica.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma alternativa para reduzir o custo do produto por meio da utilização de espelhos convencionais que podem ser encontrados no comércio de qualquer município.

3.1 OBJETIVO GERAL

Construir um tubo de luz solar utilizando espelhos planos convencionais, tendo em vista o baixo custo e o uso de materiais disponíveis.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Referenciar as tecnologias relativas aos tubos solares.
- II. Definir parâmetros construtivos;
- III. Construir e instalar;
- IV. Realizar medições;
- V. Analisar os dados e fazer as comparações descritas na metodologia.
- VI. Concluir a respeito da utilidade do tubo feito com espelhos planos convencionais.

1.3 JUSTIFICATIVA DOS OBJETIVOS

Não apenas no Brasil, mas em todo mundo busca-se racionalizar o consumo de energia, ou seja, consumir menos, pois a demanda é crescente mesmo em tempos de crise. Sabe-se que a maior fonte de energia que o Planeta Terra possui é o Sol, dessa forma faz-se necessário que a humanidade desenvolva e aprimore tecnologias baseadas nessa fonte de energia.

No Brasil e no mundo já existem tecnologias disponíveis para iluminação interna por tubos solares, porém, devido ao elevado custo são pouco difundidas e utilizadas. Sendo assim, este trabalho buscará validar a alternativa da utilização de espelhos convencionais no tubo reflexivo, com o objetivo de reduzir o custo da tecnologia.

Ao propor a tecnologia de baixo custo mais adequada, espera-se que ela seja empregada em maior escala nas residências, salas de aula, escritórios, empresas, entre outros. Dessa forma o consumo de eletricidade poderá ser amenizado, preservando a carga elétrica do país que já se encontra debilitada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017, a distribuição da produção de energia entre as fontes no Brasil acontece da seguinte forma: 65,8% hidráulica, 9,8% gás natural, 8,5% biomassa, 5,8% eólica, 5% combustíveis fósseis, 2,7% nuclear e outras 2,4%. Nota-se que nessas informações do Anuário não é destacada a produção de energia solar no Brasil que, de acordo com o Banco de Informações de Geração da Aneel, é de 0,78%.

Além disso destacam-se os três setores que dominam o consumo, o setor industrial com 35,7 %, residencial 28,8% e comercial 19,1%, como mostra a tabela 1.

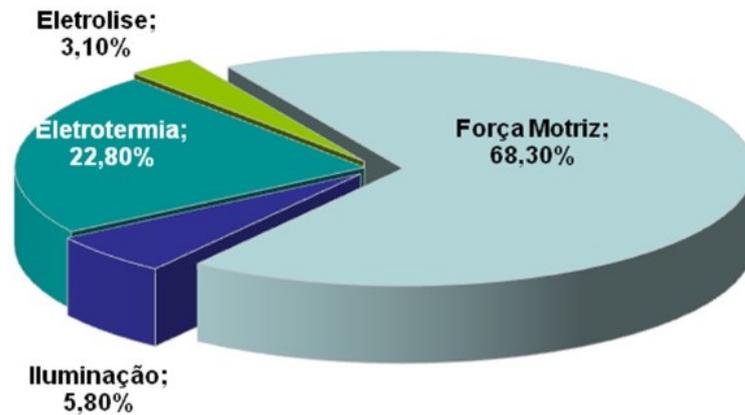
Tabela 1 – Consumo de energia por classe no Brasil.

	2012	2013	2014	2015	2016	%Δ (2016/2015)	Part. % (2016)
Brasil	448.176	463.134	474.823	464.976	460.829	-0,9	100
Residencial	117.646	124.908	132.302	131.190	132.872	1,3	28,8
Industrial	183.475	184.685	179.106	168.856	164.557	-2,5	35,7
Comercial	79.226	83.704	89.840	90.768	87.873	-3,2	19,1
Rural	22.952	23.455	25.671	25.899	27.266	5,3	5,9
Poder Público	14.077	14.653	15.354	15.189	15.092	-0,6	3,3
Iluminação Pública	12.916	13.512	14.043	15.333	15.035	-1,9	3,3
Serviço Público	14.525	14.847	15.242	14.730	14.969	1,6	3,2
Próprio	3.359	3.371	3.265	3.011	3.164	5,1	0,7

Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2017).

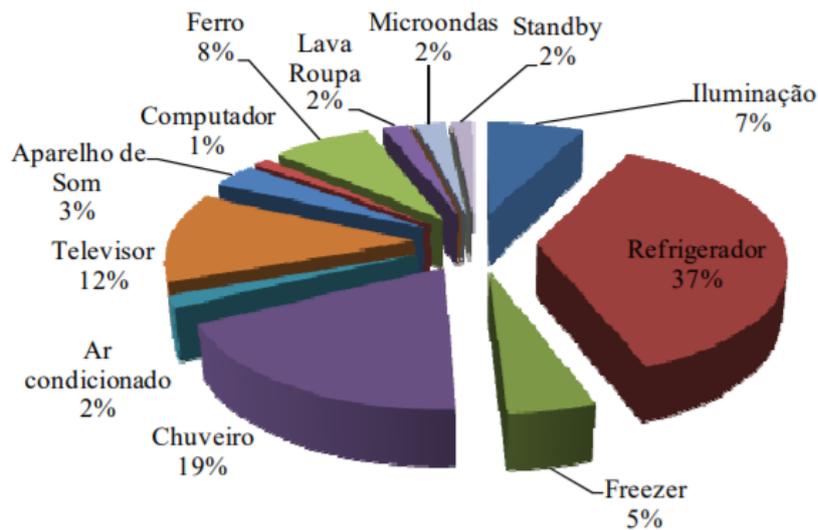
Os usos finais da energia elétrica no Brasil são estimados por classe, com os valores representados nas figuras 1, 2 e 3, destacando-se os consumos gastos na iluminação, que são 5,8 % no setor industrial, 7 % no setor residencial e 44% no setor comercial.

Figura 1 – Distribuição do consumo de energia elétrica por uso final no setor industrial.



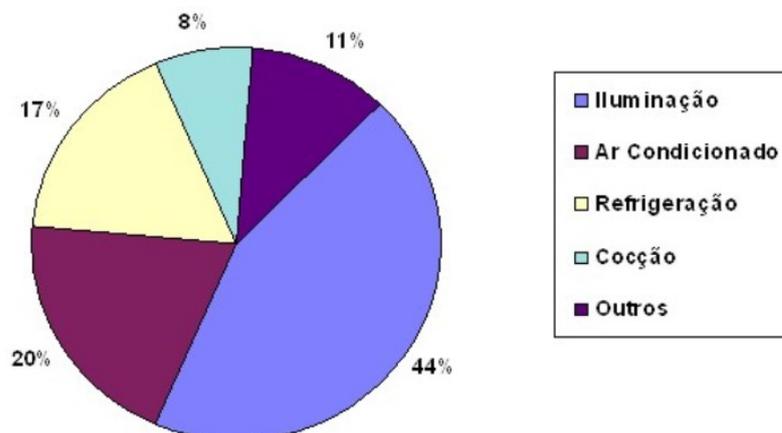
Fonte: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (2005).

Figura 2 – Distribuição do consumo de energia elétrica por uso final no setor residencial.



Fonte: Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro (2009).

Figura 3 – Distribuição do consumo de energia elétrica por uso final no setor comercial.



Fonte: AAE – Agência para Aplicação da Energia.

Comparado aos países desenvolvidos, o Brasil por motivos óbvios tem um consumo menor de energia elétrica. Mesmo assim, devido às políticas públicas, apresentaram-se nos últimos anos frequentes crises de fornecimento e racionamento. Acredita-se que se a economia brasileira tivesse crescido em 2014, provavelmente a oferta de energia elétrica não teria sido suficiente para atender a demanda (MORAIS, 2015).

A partir dessas informações, é possível notar que o Brasil possui a maior parte da sua matriz de energia voltada a energias renováveis, como é o caso da energia hidrelétrica que domina 65,8 % da produção, “representando 32% do potencial estimado” (ANEEL, 2002). No entanto, as usinas hidrelétricas causam inúmeros problemas ambientais nas suas construções, como as inundações de áreas que destroem a fauna e a flora, as mudanças no curso natural dos rios e nos seus ciclos, devido ao represamento e controle das águas e as realocações de população (LAFAY, 2005).

Sendo assim, fica evidente o destino a ser traçado pelos que buscam alternativas para tornar o sistema elétrico brasileiro eficiente e sustentável, que é a busca por desenvolvimento, otimizações e adequações para aumentar a utilização de energia solar.

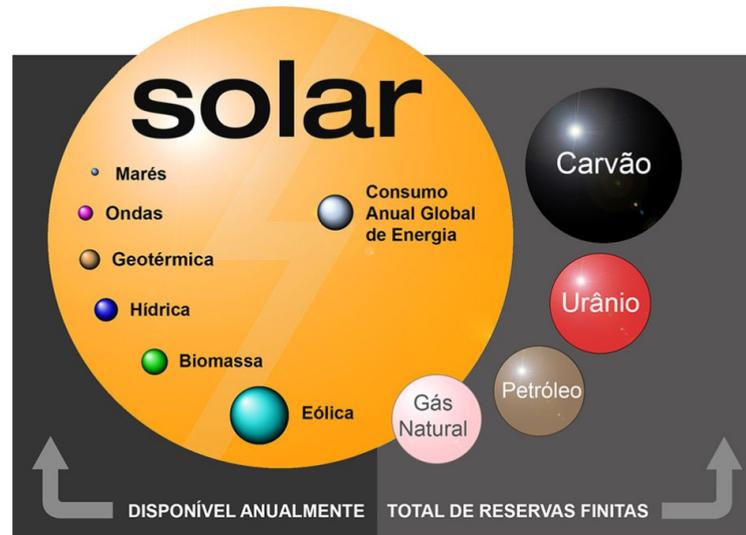
2.2 A ENERGIA SOLAR

A energia solar, ofertada pela estrela central do Sistema Solar, do qual faz parte nosso Planeta Terra, é considerada inesgotável, limpa e sustentável.

Provinda da luz e do calor do Sol, a energia solar é utilizada através de diferentes tecnologias que estão em constante evolução, tais como, o aquecimento solar, a energia solar fotovoltaica, a energia heliotérmica, a arquitetura solar e a fotossíntese artificial (PINTO, et al., 2014).

O potencial da energia solar é disparadamente superior a todas as fontes de energia utilizadas, como ilustra a figura 4.

Figura 4 – Comparação da energia solar com outras fontes de energia.

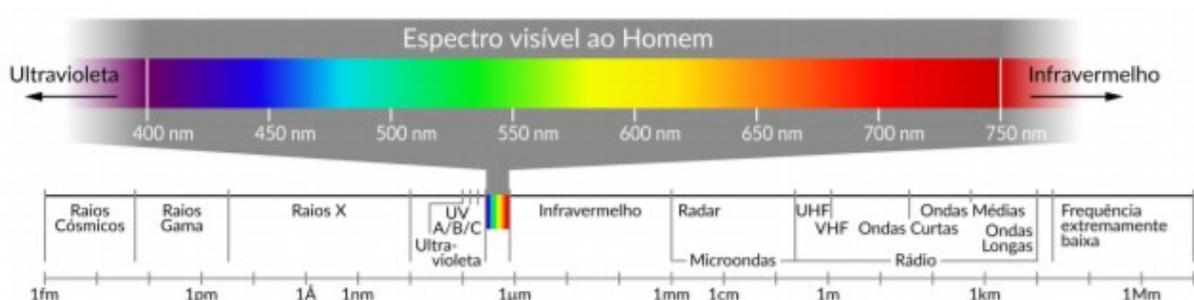


Fonte: PortalSolar.

Constituído por matéria gasosa, principalmente hidrogênio, o Sol possui uma temperatura efetiva de corpo negro de aproximadamente 5777 K, emitindo a maior parte de sua energia eletromagnética nos comprimentos de onda de 0,25 μm a 3,0 μm . A constante solar G , é a energia vinda do Sol, por unidade de tempo, recebida em uma área unitária perpendicular a direção de propagação da radiação, na metade do caminho entre o Sol e a Terra, e tem valor de 1367 W/ m^2 (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

A taxa de energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante a bilhões de anos e sua irradiação é representada pelo espectro eletromagnético, onde a faixa de comprimentos de ondas visíveis, chamado de espectro visível ao homem, é destacada na figura 5.

Figura 5 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana

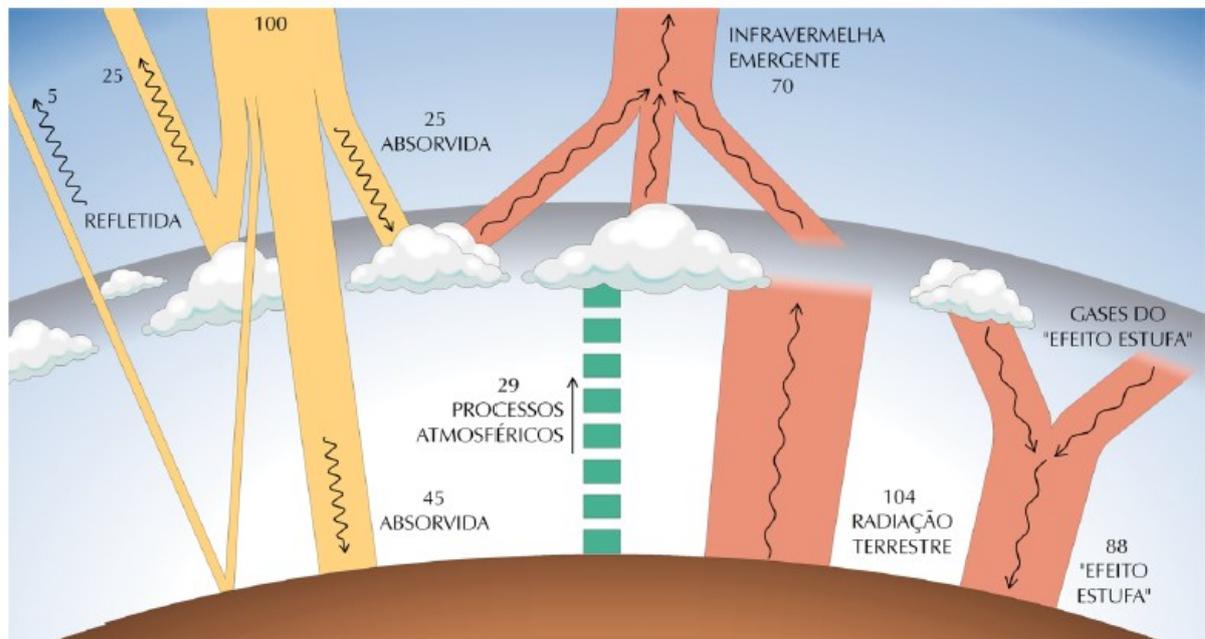


Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

A variação de energia recebida pela terra é devido aos ciclos anual e diário, sendo que, o ciclo anual ocorre por consequência da translação da Terra em torno do Sol e o ciclo diário pela rotação da Terra em torno de seu eixo.

Antes de a radiação chegar na superfície terrestre, ela interage com a atmosfera e quantidades significativas são absorvidas e refletidas, como ilustrado na figura 6. Essa interação, bastante complexa, depende fortemente das condições do céu e outros fatores. Céu nublado reflete uma maior proporção de radiação do que céu limpo e os resultados no nível do solo terrestre influenciam no fenômeno da luz natural (CALLOW, 2003).

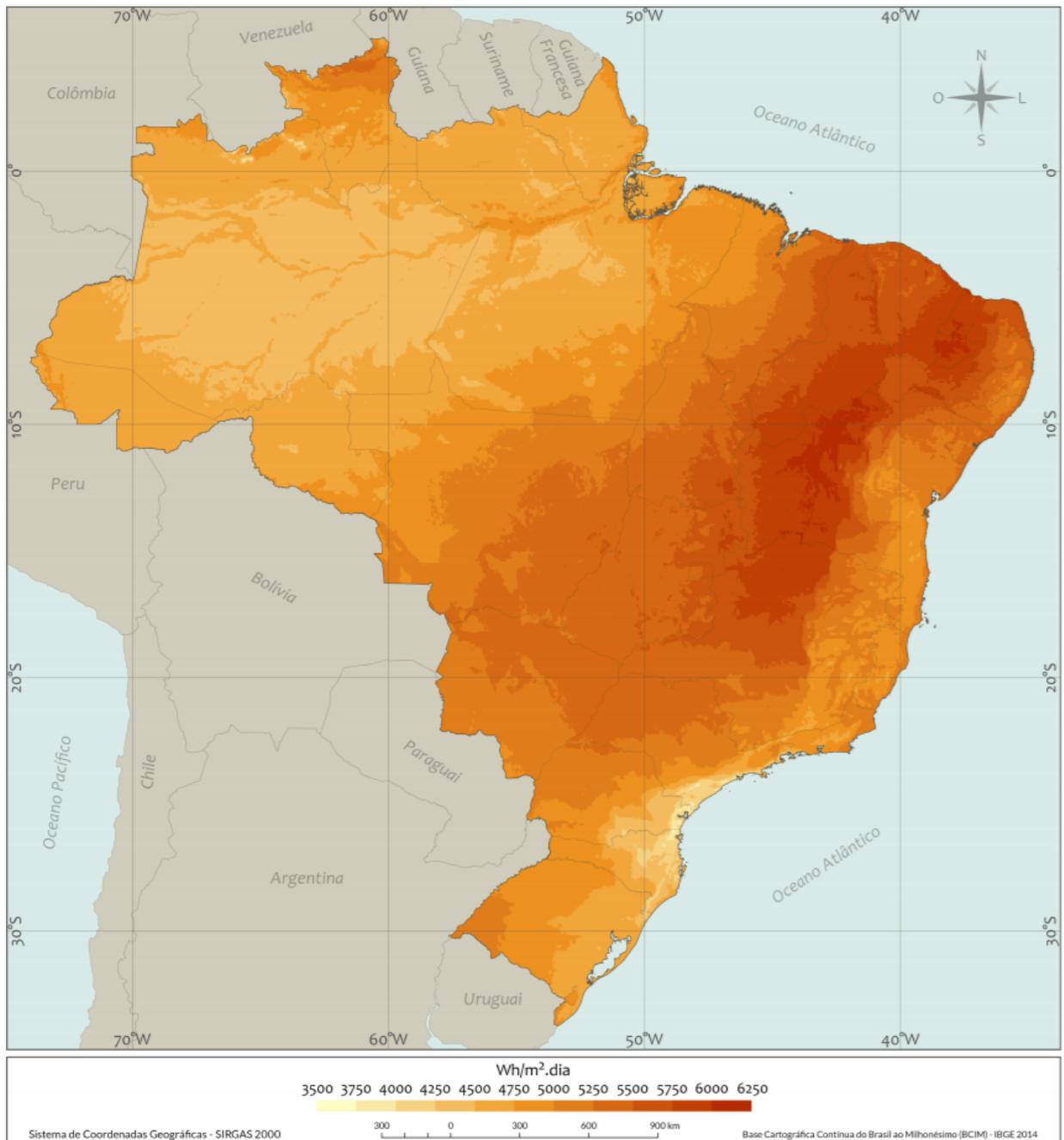
Figura 6 – Processos de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

A Irradiância Global Horizontal (G), é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal, definida pela soma da Irradiância direta horizontal e a Irradiância difusa horizontal (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017).

Figura 7 – Total diário da irradiação global horizontal – média anual.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Como mostra a figura 7, em termos de irradiação solar, o Brasil é um país privilegiado, pois a maior parte do seu território recebe elevadas quantidades de radiação solar. Para ter uma ideia, no local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade solar do que no lugar mais ensolarado da Alemanha, que é um dos líderes no uso da energia fotovoltaica (AMERICA DO SOL, 2018).

2.3 LUZ NATURAL

A luz visível, é o efeito da leitura pelo olho, da radiação com comprimentos de onda do espectro visível podendo ser natural ou artificial. A luz natural, tem suas vantagens para o homem, pois além de ser abundante ela faz bem à saúde, promove um melhor conforto visual, regula o relógio biológico e traz sensação de prazer instantânea.

A luz provinda do Sol, é um dos principais agentes responsáveis pelo sistema circadiano, também chamado relógio biológico, localizado no cérebro humano, e afeta diretamente o entendimento de espaço e o comportamento das pessoas, podendo haver variação como uma maior atividade no período da manhã e sensação de sonolência com a chegada do fim do dia (GIORDANI, 2017).

Sem a luz solar que sempre acompanhou a humanidade, o ser humano pode ter inúmeros problemas de saúde, como irritação nos olhos, cansaço visual, problemas de pele e distúrbios emocionais (NÚCLEO *HEALTH CARE*, 2018), como a SAD (*Seasonal affective disorder*), um tipo de depressão influenciada pela luz (GIORDANI, 2017). Além disso, a vitamina D é sintetizada pelo organismo por influência da luz solar, e falta de tal suplemento é causa de inúmeras doenças como câncer (côlon, próstata e mama), doenças autoimunes e inflamatórias (esclerose múltipla e doença de Crohn), depressão e doenças cardiovasculares (JORGE ET AL., 2018).

2.4 ILUMINAÇÃO DE INTERIORES

A seguir serão apresentadas algumas grandezas que serão utilizadas neste trabalho, método luminotécnico para determinação do fluxo luminoso necessário e o gerado pelo tubo solar, além das recomendações da norma brasileira para iluminação de ambientes.

2.4.1 Iluminância

Iluminância é o limite da razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado, para a área da superfície, quando esta tende a zero, ou seja, corresponde ao fluxo luminoso incidente numa determinada superfície

por unidade de área. Conhecida também como nível de iluminamento, é expressa em lux pela equação 1, de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (FILHO, 2002).

$$E = \frac{F}{S} (lux) \quad (1)$$

A equação acima expressa a iluminância E, onde F é o fluxo luminoso em lúmens e S é a área da superfície iluminada em m².

2.4.2 Fluxo Luminoso

Definida como a potência luminosa emitida por uma fonte de luz em todas as direções do espaço, trata-se de uma grandeza fotométrica tendo como unidade de medida o lúmen (lm). O fluxo luminoso também pode ser definido como a potência de radiação emitida por uma fonte luminosa e detectada pela retina humana (FILHO, 2002).

2.4.3 Reflectância

É a relação entre o fluxo luminoso incidente e o refletido sobre uma superfície (FILHO, 2002).

2.4.4 Cálculo Luminotécnico

O método dos Lumens, apresentado na equação 2, bastante utilizado em sistemas de iluminação de edifícios, consiste em determinar a quantidade de fluxo luminoso (lumens) necessário para um ambiente, baseado no tipo de atividade empregada, reflectância das paredes e teto, e do tipo de fonte de luz (FILHO, 2002).

$$\Psi_t = \frac{E * S}{Fu * Fdl} \quad (2)$$

Onde Ψ_t é o fluxo luminoso total necessário (lumens), E é o iluminamento médio requerido pelo ambiente (lux), S é a área do recinto (m^2), F_u é o coeficiente de utilização do recinto e F_{dl} é o coeficiente de depreciação da luminária.

O coeficiente de utilização do recinto é a relação entre o fluxo luminoso incidente no plano de trabalho e o emitido pela fonte luminosa, dependendo das dimensões do ambiente e reflectância das paredes (FILHO, 2002). Dessa forma, este valor pode ser obtido na tabela 2, com o auxílio do índice de utilização do recinto (K) encontrado por meio da equação 3.

$$K = \frac{A * B}{Hlp * (A + B)} \quad (3)$$

Onde A e B são o comprimento e a largura do ambiente e Hlp é a altura da fonte de luz ao plano de trabalho.

Tabela 2 – Fator de Utilização do Recinto (tabela parcial).

Teto	70%		50%		70%	50%	30%	
Parede	50%	30%	50%	30%	10%	10%	30%	10%
K	10% (valor de reflectância percentual do piso)							
0,6	0,32	0,25	0,29	0,22	0,2	0,18	0,2	0,17
0,8	0,39	0,31	0,35	0,29	0,26	0,26	0,26	0,22
1	0,45	0,37	0,4	0,34	0,32	0,31	0,31	0,27
1,25	0,5	0,43	0,45	0,39	0,37	0,36	0,36	0,32
1,5	0,55	0,48	0,49	0,44	0,42	0,4	0,4	0,36
2	0,61	0,55	0,56	0,5	0,5	0,46	0,46	0,42
2,5	0,66	0,6	0,6	0,55	0,55	0,51	0,5	0,47
3	0,69	0,64	0,63	0,58	0,59	0,55	0,53	0,55

Fonte: Filho 2002.

Por fim, o coeficiente de depreciação da luminária é relação entre o fluxo luminoso no fim do período de manutenção e o fluxo no início da instalação, sendo fornecido pelo fabricante da luminária (FILHO, 2002).

2.4.5 Recomendações de Iluminância para Diferentes Ambientes

De acordo com a ABNT NBR NA/CIE 8995-1, a prática de uma boa iluminação para locais de trabalho não é apenas fornecer uma boa visualização das tarefas, é essencial que elas sejam realizadas facilmente e com conforto, satisfazendo aspectos quantitativos e qualitativos exigidos pelo ambiente.

No geral, a iluminação deve assegurar desempenho visual, ficando os trabalhadores capacitados de realizar suas tarefas visuais, rápida e precisamente, mesmo sob circunstâncias difíceis e durante longos períodos. Além disso, deve oferecer segurança visual, ao olhar ao redor e detectar riscos (ABNT NBR NA/CIE 8995-1, 2013).

Para satisfazer esses requisitos, é necessário determinar adequadamente os parâmetros principais de distribuição da luminância, iluminância, ofuscamento, direcionalidade da luz, aspectos da cor da luz e superfícies, cintilação, luz natural e manutenção (ABNT NBR NA/CIE 8995-1, 2013).

A tabela da seção 5 da norma já citada, traz os valores recomendados de iluminância E_m (lux), limite de ofuscamento UGRL e índice de reprodução de cor mínimo R_a para diversos ambientes, dos quais serão destacados, na tabela 3, algumas informações referentes à escritórios, bibliotecas e construções educacionais, que podem ser úteis para a maioria dos ambientes de uma universidade.

Tabela 3 – Iluminância mínima para diferentes ambientes de acordo com a NBRISO_CIE8995-1.

Tipo de Ambiente	Em (lux)	UGR_L	R_a
Escritórios			
Arquivamento, cópia, circulação etc.	300	19	80
Escrever, teclar, ler, processar dados	500	19	80
Desenho técnico	750	16	80
Estações de projeto assistido por computador	500	19	80
Salas de reunião e conferência	500	19	80
Recepção	300	22	80
Arquivos	200	25	80*
Bibliotecas			
Estantes	200	19	80
Área de leitura	500	19	80
Bibliotecárias	500	19	80
Construções Educacionais			
Salas de aula	300	19	80
Salas de aulas noturnas, classes e educação de adultos	500	19	80
Sala de leitura	500	19	80
Quadro negro	500	19	80
Mesa de demonstração	500	19	80
Salas de arte e artesanato	500	19	80
Salas de arte em escolas de arte	750	19	90
Sala de desenho técnico	750	16	80
Salas de aplicação e laboratórios	500	19	80
Oficina de ensino	500	19	80
Salas de ensino de música	300	19	80
Salas de ensino de computador	500	19	80
Laboratório linguístico	300	19	80
Salas de preparação e oficinas	500	22	80
Salas comuns de estudantes e salas de reunião	200	22	80
Salas de professores	300	22	80
Salas de esportes, ginásios e piscinas	300	22	80

Fonte: ABNT NBR NA/CIE 8995-1 (2013)

2.5 ILUMINAÇÃO NATURAL TUBULAR

Tubos solares são utilizados para canalizar e transmitir, através da reflexão, a luz natural para iluminar ambientes de edificações. Por se tratar de uma tecnologia que não utiliza energia elétrica, são equipamentos com baixo nível de agressão ao meio ambiente. Além disso, eles podem substituir a iluminação artificial durante o dia, resultando em uma economia de energia elétrica, que por sua vez, se utilizado em larga escala de consumidores, pode ajudar a reduzir a demanda de energia elétrica em todo país.

Também conhecidos em artigos científicos como *kaleidoscopes* ou comumente *mirror light pipes* (MLPs), os tubos solares são constituídos basicamente por 3 partes: domo, tubo reflexivo e difusor. O domo é um equipamento que fica na parte externa do edifício, recebendo os raios solares e protegendo o meio interno do externo. O tubo, geralmente com seção transversal circular, deve ser feito de um material com alto grau de reflectância, para transferir o máximo possível de luz natural para o difusor, que finalmente espalhará os raios solares iluminando o ambiente.

Além da questão ecológica, os MLPs ao iluminarem ambientes trazem os inúmeros benefícios da luz natural, como conforto visual e térmico, além de interferir positivamente no sistema biológico humano. Também não trazem os problemas das janelas e aberturas, tradicionais formas de iluminação natural, de ofuscamento e perda de intensidade conforme penetração no ambiente.

No mercado mundial, existem algumas empresas que produzem esse tipo de tecnologia. A maioria delas utiliza um tubo feito de alumínio com tecnologia de espelhamento patenteada e de alto grau de reflectância. No entanto, por ser uma tecnologia nova e utilizar materiais como a prata, que normalmente compõe as tecnologias reflexivas patenteadas, os MLPs são equipamentos com elevado custo para a maioria das pessoas e são poucos difundidos no Brasil.

Atualmente, no Brasil, duas empresas são conhecidas por produzir e comercializar MLPs, a TuboLuz e a Confort Lux. Também existem empresas que apenas comercializam a tecnologia estrangeira, a exemplo da Efilux que comercializa produtos da Solatube australiana. Empresas como a Chatron de Portugal, Monodraught da Inglaterra, Solarspot da Itália, Natural light tubular skylights dos EUA, Solatube da Austrália e Espacio Solar (Espanha) são exemplos de fabricantes estrangeiros. A figura 8 traz uma representação do produto vendido pela Monodraught.

Figura 8 – Sistema SUNPIPE.



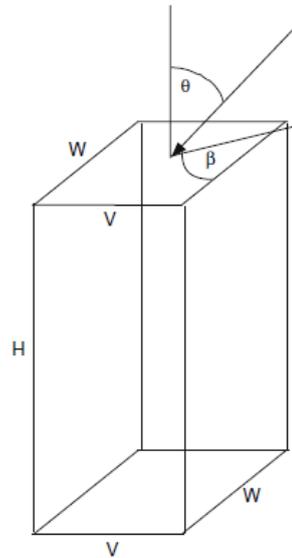
Fonte: Monodraught (2018).

O desempenho de um MLP é determinado principalmente pela transmissão ou transmitância de luz, que pode ser expressada pela equação 4, onde R é a reflectância do material que forma o tubo e N é o número de reflexões da luz no tubo. A transmissão depende exponencialmente de N e N depende fortemente do comprimento ou altura do tubo, seção transversal e direção de entrada da luz.

$$T = R^N \quad (4)$$

A direção de entrada da luz é geralmente especificada em termos de um ângulo de incidência (θ) e um ângulo de rotação (β) (EDMONDS, 2010), como pode ser visto na figura 9.

Figura 9 - Geometria especificando parâmetros de um MLP retangular e a direção luz.



Fonte: Edmonds (2010).

A maioria das produções científicas relacionadas aos tubos solares referem-se a busca por mensurar a performance e estudar a influência de variáveis como tipo de seção transversal e tamanho do tubo. No entanto a obra que será abordada na sequência se mostrou muito completa, pois trata da iluminação direta e difusa, aborda diversas formas de seção transversal e também apresenta uma equação para calcular iluminação de interiores. Além disso, os resultados deste trabalho ao serem comparados com outros, apresenta resultados iguais ou semelhantes.

Na obra intitulada “*Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section*”, Edmonds (2010) desenvolveu equações para obter o número médio de reflexões, que é o expoente da equação da transmitância, através da superposição de matrizes de linhas paralelas em diferentes ângulos para todas as seções transversais de interesse, das quais algumas, em função do ângulo de incidência e com altura \$H\$, serão mencionadas na tabela 4.

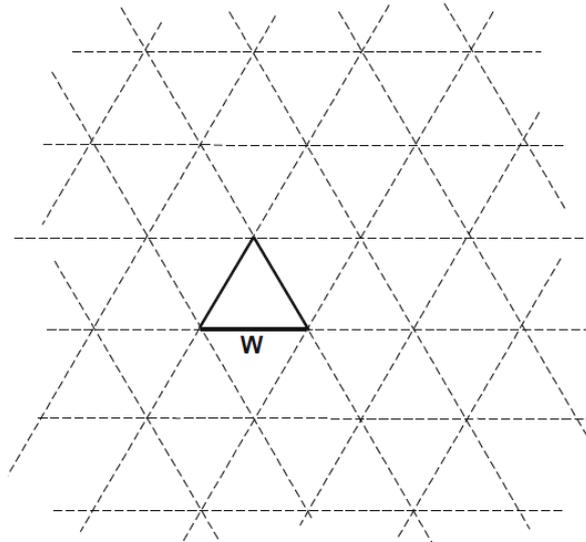
Tabela 4 – Equações da transmitância para várias seções de MLPs.

Seção retangular com lados \$W\$ e \$V\$:	$N(\theta) = 2/\pi * H * \tan(\theta) * (1/V + 1/W)$
Seção triangular equilátera com base \$W\$:	$N(\theta) = 2.205 * H * \tan \theta/W$
Seção em forma de triângulo retângulo de hipotenusa \$W\$:	$N(\theta) = 3.074 * H * \tan \theta/W$
Seção hexagonal de lado \$W\$:	$N(\theta) = 0.735 * H * \tan \theta/W$

Fonte: Edmonds (2010).

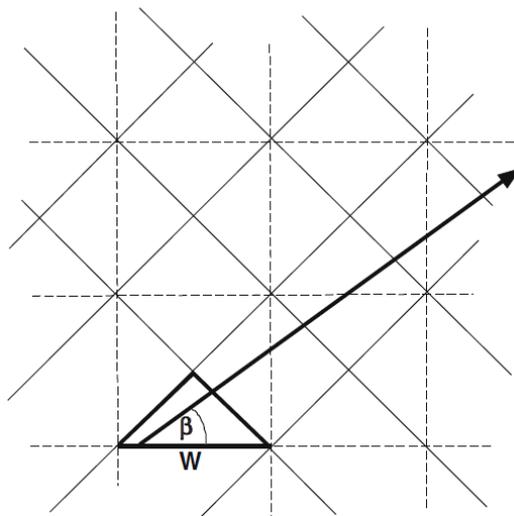
As seções triangulares mencionadas anteriormente são representadas nas imagens 10 e 11, para facilitar o entendimento do formato delas, pois existem diversos tipos de triângulos.

Figura 10 – Simetria reflexiva na seção transversal de um triângulo equilátero de lado W .



Fonte: Edmonds (2010).

Figura 11 – Simetria reflexiva de uma seção transversal de um triângulo retângulo de hipotenusa W .



Fonte: Edmonds (2010).

Com as equações do número de reflexões, fica facilitada a tarefa de determinar a transmitância das diferentes formas de tubos. No entanto, é necessário avaliar também a iluminação difusa em dias nublados.

Seguindo o mesmo trabalho de Edmonds (2010), o fluxo luminoso difuso, que entra na abertura de um MLP com um alcance angular $d\theta$ no ângulo θ , é dado pela equação 5.

$$dF_D = 2 * A * \pi * L(\theta) * \sin \theta - \cos \theta * d\theta \quad (5)$$

Onde A é a área da seção transversal e $L(\theta)$ é dado pela equação 6.

$$L(\theta) = \frac{L_0 * (1 + 2 * \cos \theta)}{3} \quad (6)$$

O fluxo luminoso, da abertura de saída, é dado pela equação 7.

$$dF_0 = R^{N(\theta)} * dF_D \quad (7)$$

Onde R é a reflectância do MLP e $N(\theta)$ é o número médio de reflexões da luz incidente no tubo no ângulo θ . Após integração numérica dessas expressões de $\theta=0$ a $\theta=90^\circ$ tem-se o fluxo luminoso de entrada (F_D) e o de saída (F_0). Dessa forma, a equação 8 resulta na transmitância de um MLP para luz difusa (EDMONDS, 2010).

$$T_d = \frac{F_0}{F_D} \quad (8)$$

No artigo chamado “*An analysis of light-pipe system via full-scale measurements*”, foi descrito um modelo para determinar a transmitância de tubos de luz, com 2,8 m de altura, 250 mm de diâmetro e refletividade de 98 %, instalados no corredor de um escritório. A medição interna foi feita por vários sensores de iluminância devidamente calibrados, com a distribuição mostrada na figura, e a medição externa foi feita por outro sensor colocado horizontalmente em lugar em cima do domo livre de obstrução (LI, TSANG, CHEUNG, & TAM, 2010). A equação 9 expressa a transmitância do tubo, como descrito em (CALLOW, 2003).

$$\tau = \frac{F_{sai}}{F_{entra}} \quad (9)$$

Onde F_{sai} é o fluxo luminoso que sai e F_{entra} é o fluxo que entra no tubo de luz, expressos pelas equações 10 e 11:

$$F_{entra} = \pi * r^2 * E_{ex} \quad (10)$$

$$F_{sai} = \pi * [E_0 * r_0^2 + \left(\frac{E_1 + E_2 + E_3}{3}\right) * (r_1^2 + r_0^2) + \left(\frac{E_4 + E_5 + E_6}{3}\right) * (r_2^2 + r_1^2)] \quad (11)$$

Onde E_{ex} é a iluminância externa entrando no tubo (lx), r é o raio do domo do tubo solar (m), E_i é a iluminância registrada pelo receptor i (lx) e r_i é o raio do círculo i (m).

Também existem publicações relacionadas ao material da estrutura do tubo e do revestimento reflexivo, a exemplo da obra “Desenvolvimento de Tubos Solares Aplicados em Iluminação de Interiores a Partir de Materiais Poliméricos Metalizados”, Spacek (2017) propôs a substituição do tubo de alumínio com revestimento de prata, por um tubo de polímero ABS metalizado através do processo de metalização por deposição iônica pela evaporação no vácuo. Esse equipamento teve um rendimento 35% menor que o tubo referência comercializado por uma marca líder de mercado mundial, porém com um custo 50% menor. Da mesma forma, este trabalho de conclusão de curso (TCC) buscará substituir os materiais já utilizados comercialmente por espelhos convencionais, para talvez alcançar resultados aceitáveis com redução dos custos.

2.8 ESPELHOS

Os espelhos convencionais, são aqueles utilizados nas residências e lojas, para decoração ou embutido em móveis. Possuem reflexão especular, ou seja, o ângulo de incidência do raio é igual ao ângulo de saída. Normalmente são feitos com deposição de prata ou cromo em um vidro polido, com rugosidade mínima, depois recebe aplicação de tinta protetora, para evitar danos e corrosão na película metálica. Por ter uma superfície com baixa rugosidade e um coeficiente de refletividade elevado, quando posicionado um objeto na frente do espelho é possível ver uma imagem com perfeita reflexão.

Existem várias empresas que fabricam espelhos no Brasil, eles são comercializados em larga escala, sendo que praticamente todas as casas e edifícios

possuem algum tipo de espelho. No entanto é muito difícil encontrar algum dado técnico a respeito do grau de reflexão desses produtos, talvez por não serem empregados em aplicações que necessitem de tal informação. Serão comentados na sequência, algumas informações de fabricantes referentes aos seus tipos de espelhos.

Os espelhos Mirage, esquematizado na figura 12, são fabricados pela empresa Cebrace e possui vidro *float* que são metalizados à base de prata e recebem dupla camada de tinta protetora, que aumenta a resistência à umidade dificultando o aparecimento de manchas. Essas características proporcionam maior vida útil e fidelidade de imagem mantida por muito mais tempo, de acordo com a fabricante. São indicados para indústria moveleira, arquitetura e decoração (CEBRACE, 2018). O vidro *float* é um vidro comum, composto por sílica, potássio, alumina, sódio, magnésio e cálcio, com transparência, durabilidade, resistência química, facilidade de manuseio e baixo custo (ABRAVIDRO, 2018).

Figura 12 - Camadas de proteção do espelho Mirage.



Fonte: Cebrace.

O espelho Optimirror Plus, também produzido pela Cebrace, é 10 vezes mais resistente que os espelhos convencionais. Fabricado com tecnologia *cooper-free*, que preserva o meio ambiente dos resíduos de cobre e chumbo, além de tornar o espelho mais resistente à umidade e corrosão. Recebe também uma camada protetora adicional de resina curada por exposição a luz ultravioleta, que protege o espelho contra riscos durante as operações de corte e beneficiamento. De acordo com

a empresa, esse é um espelho de última geração, com perfeita reflexão de imagens, ampliando a sensação de espaço e proporciona maior luminosidade. Por ser mais resistente a manchas e oxidação, é ideal para locais sujeitos a umidade e à maresia, como banheiros, saunas, academias e edificações a beira mar (CEBRACE, 2018).

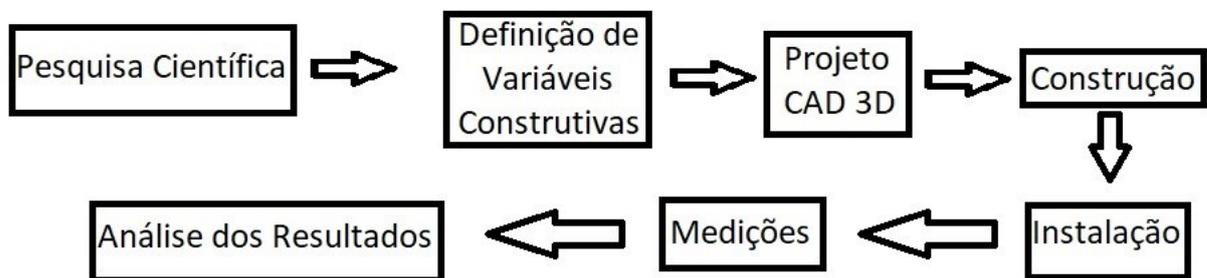
O espelho Mirox Premium, é produzido no Brasil pela AGC. Reconhecido por arquitetos, designers e vidraceiros como o melhor espelho do mundo, possui resistência superior e é eco-amigável (AGC-VIDROS DECORATIVOS, 2018).

Os espelhos Guardian, fabricados pela Guardian do Brasil, são sustentáveis, duráveis, com excelente reflexão de imagens sendo sinônimo de qualidade. Possuem camada de prata aplicada, protegida por várias camadas de tintas especiais e resistentes, o que evita o processo de oxidação, responsáveis pelas manchas escuras. É ideal para ambientes como banheiros, salas, quartos, paredes decorativas, móveis, entre outros. A Guardian também possui responsabilidade social, por produzir uma linha de espelhos livre de metais pesados que não agridem ao meio ambiente. São fabricados utilizando o processo *cooper-free*, que retira da produção o zinco, o cobre e as pinturas com altos teores de chumbo (GUARDIAN GLASS, 2018).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho seguiu o fluxograma exibido na figura 13. Dessa forma, com base nas referências bibliográficas, as definições construtivas de um tubo solar foram definidas, um projeto CAD 3D foi desenvolvido, para então ser construído e instalado. Após essas etapas foi possível fazer as medições de iluminação e definir a respeito do desempenho do equipamento.

Figura 13 – Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Autoria Própria.

Como o foco deste trabalho é apenas o tubo reflexivo, o domo e o difusor utilizados fazem parte de outro equipamento disponível comercialmente.

3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS E PROJETO DE CONSTRUÇÃO

Para construir um tubo solar, é necessário definir algumas variáveis construtivas. Sendo assim, foram definidos os materiais da parte interna reflexiva e a externa estrutural, altura do tubo, tipo e tamanho de seção transversal, juntamente com a escolha do local de testes.

Também foi preciso definir os materiais. Dessa forma, o material reflexivo utilizado no Tubo Solar Hexagonal é o espelho convencional, feito de vidro e película prateada que garante alta reflexão e é abundante no comércio. Além disso, para a estrutura foi definido o material MDF a ser colado na parte externa dos espelhos e proporcionar a sustentação das placas e facilitar a fixação no forro. O Medium-Density Fiberboard (MDF), é um material fabricado através da aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e outros aditivos, muito utilizado na indústria moveleira. Apesar do peso elevado, o motivo principal da escolha deste material na

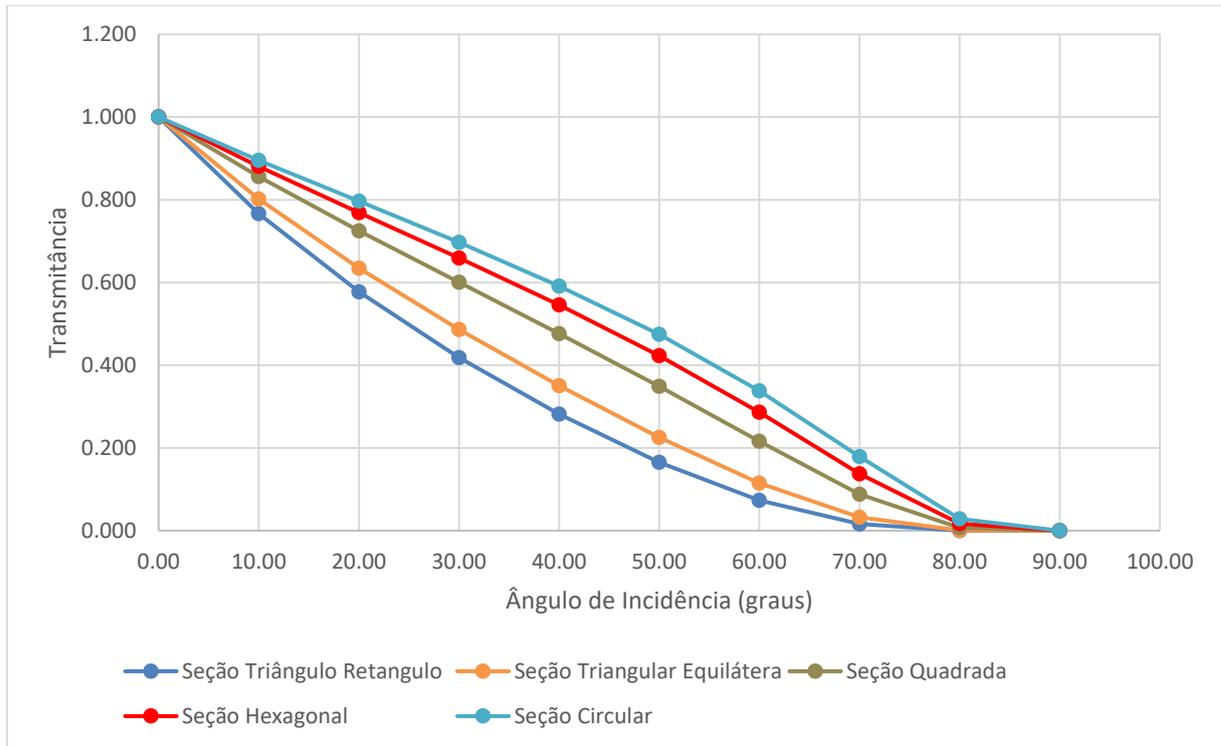
estrutura foi a disponibilidade de recursos, uma vez que a marcenaria da UTFPR pode oferecer.

A altura do tubo normalmente depende da distância do teto do ambiente até o telhado, sendo que, quanto maior a altura do tubo, maiores são as perdas e menor a eficiência. Sendo assim, baseado na altura da sala de testes, ela foi definida como 1 metro.

O tipo de seção transversal foi definida primeiramente pela análise da transmitância obtida pelas equações elaboradas por Edmonds (2010) no artigo "*Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section*". Foram escolhidas as equações para as seções transversais quadrada, triangular equilátera, triângulo retângulo, hexagonal e circular, sendo esta última escolhida apenas para servir de comparação, pois é a seção mais utilizada em todos os MLPs.

Dessa forma, para escolher as dimensões de cada seção, foi determinada uma mesma área para todas as seções, onde as medidas dos seus lados foram inseridas nas equações e os gráficos foram plotados para análise. Além disso, como é desconhecida a reflectância dos espelhos, para essa simulação ela foi definida com o valor de 0,85, onde o gráfico da figura 14 ilustra os resultados.

Figura 14 – Gráfico da transmitância em função do ângulo de incidência, obtido pelas equações de Edmonds (2010).

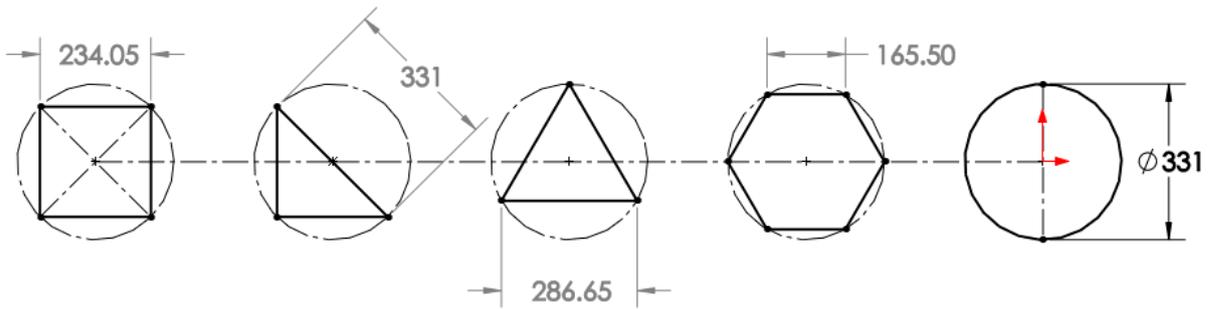


Fonte: Autoria própria.

É possível identificar na figura 14 a superioridade da transmitância para um tubo de seção triangular circular, fato que evidencia o motivo deste ser muito utilizado nos produtos que já existem no mercado.

Como o foco deste trabalho é apenas o tubo, o domo e o difusor que serão utilizados são de outro equipamento comercial em que o tubo é circular, sendo assim, para melhor aproveitá-los, qualquer seção transversal escolhida deve estar inscrita na circunferência da lente do difusor (331 mm de diâmetro), que é menor que a do domo (406 mm de diâmetro). A figura 15 ilustra o desenho com as dimensões das seções transversais inscritas na circunferência da lente difusora comercial, que mede 331 mm de diâmetro, juntamente com as medidas W de cada seção.

Figura 15 – Desenho das seções transversais inscritas na circunferência da lente difusora comercial.



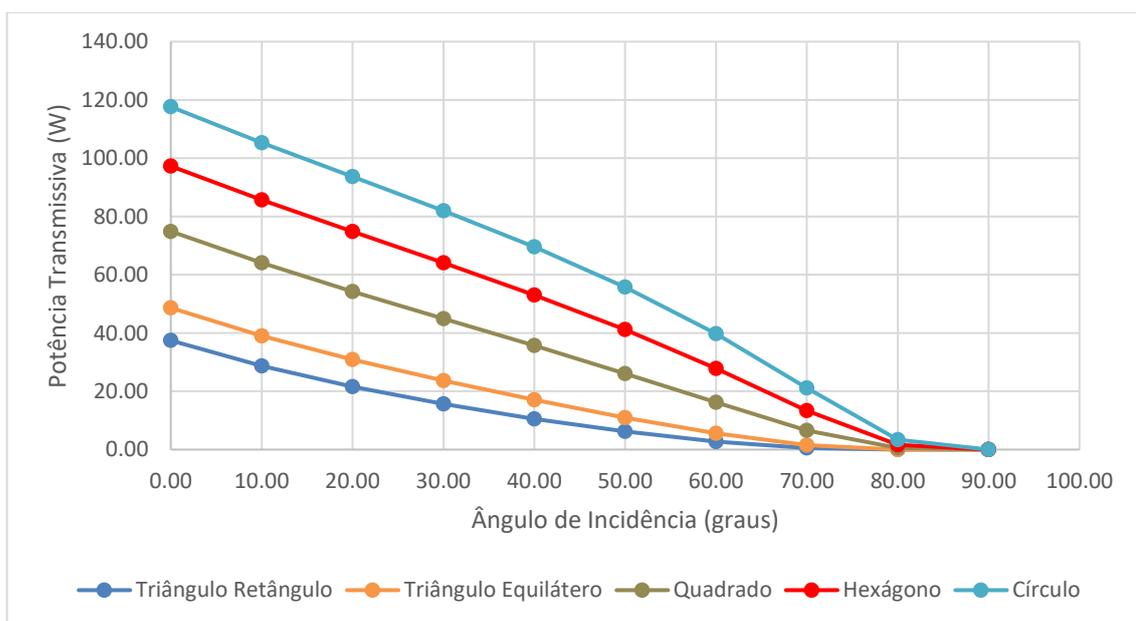
Fonte: Autoria Própria.

Como a área das seções inscritas da figura 15 são diferentes, a quantidade de radiação em cada tubo também não será a mesma, sendo assim, uma segunda análise, baseada na potência para cada área de seção transversal, foi realizada a partir da equação 12, onde foi possível obter as curvas do gráfico ilustrado na figura 16.

$$P = G * A * T \quad (W) \quad 12$$

Onde P é a potência transmissiva (W), G é a constante solar (1367 W/m^2), A é a área da seção transversal (m^2) e T é a transmitância (adimensional) calculada para cada ângulo de incidência.

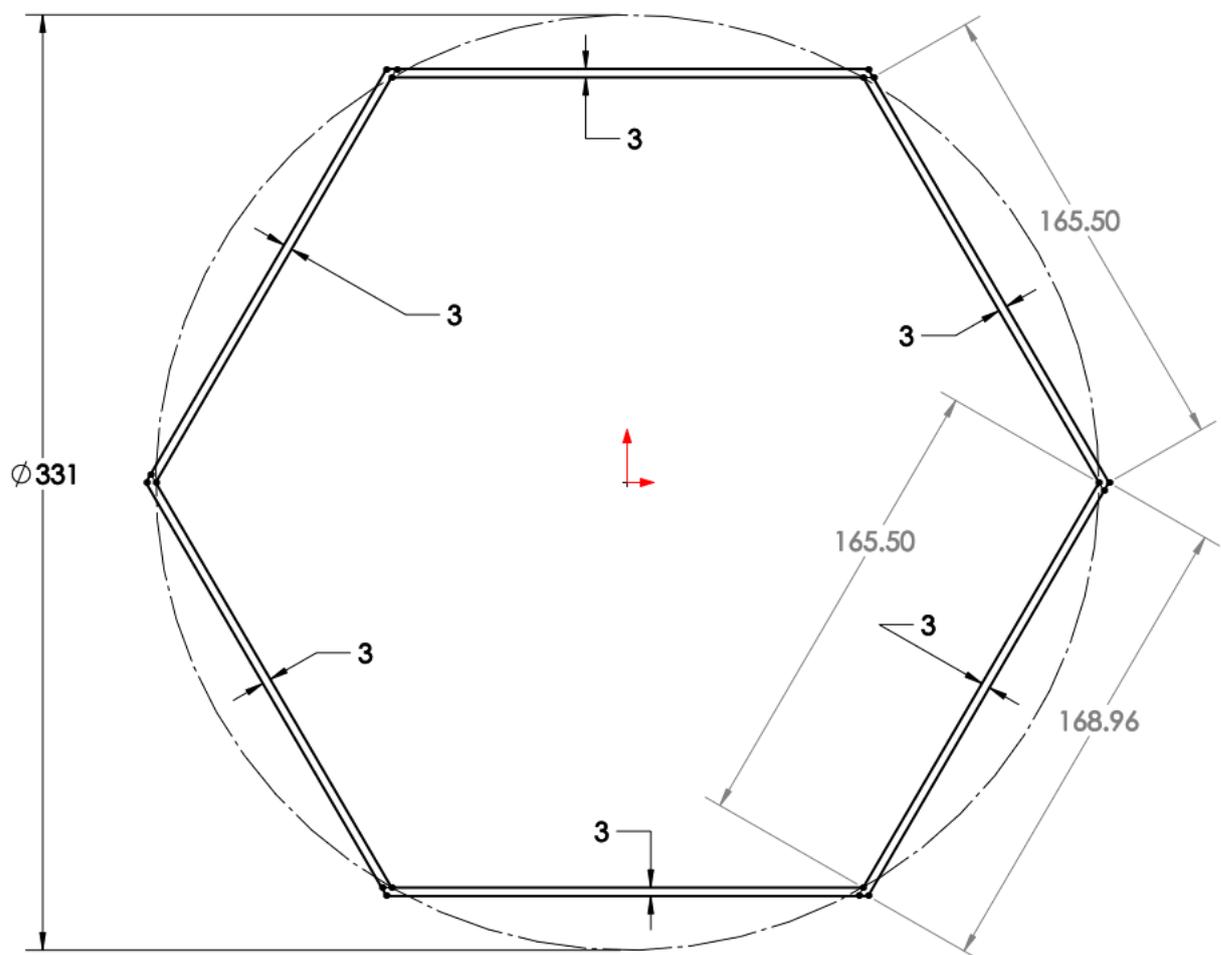
Figura 16 – Gráfico da Potência Transmissiva x Ângulo de Incidência



Fonte: Autoria própria.

Como é possível observar no gráfico da figura 16, logo abaixo da seção circular a hexagonal é apresentada com um maior potencial diante dos parâmetros disponíveis para este projeto. Dessa forma, a sequência do trabalho será dada com essa seção, representada na figura 17, com espessura de 3 mm (espessura do espelho), inscrita na circunferência base da lente do difusor medindo 331 mm de diâmetro.

Figura 17 – Desenho da seção transversal hexagonal do tubo de espelhos.



Fonte: Autoria Própria.

A tabela 5 mostra os parâmetros do tubo, juntamente com os resultados calculados nas equações de Edmonds (2010), sendo R a reflectância, $N(\theta)$ o número de reflexões e T a transmitância.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados na equação de Edmonds (2010) para a seção hexagonal.

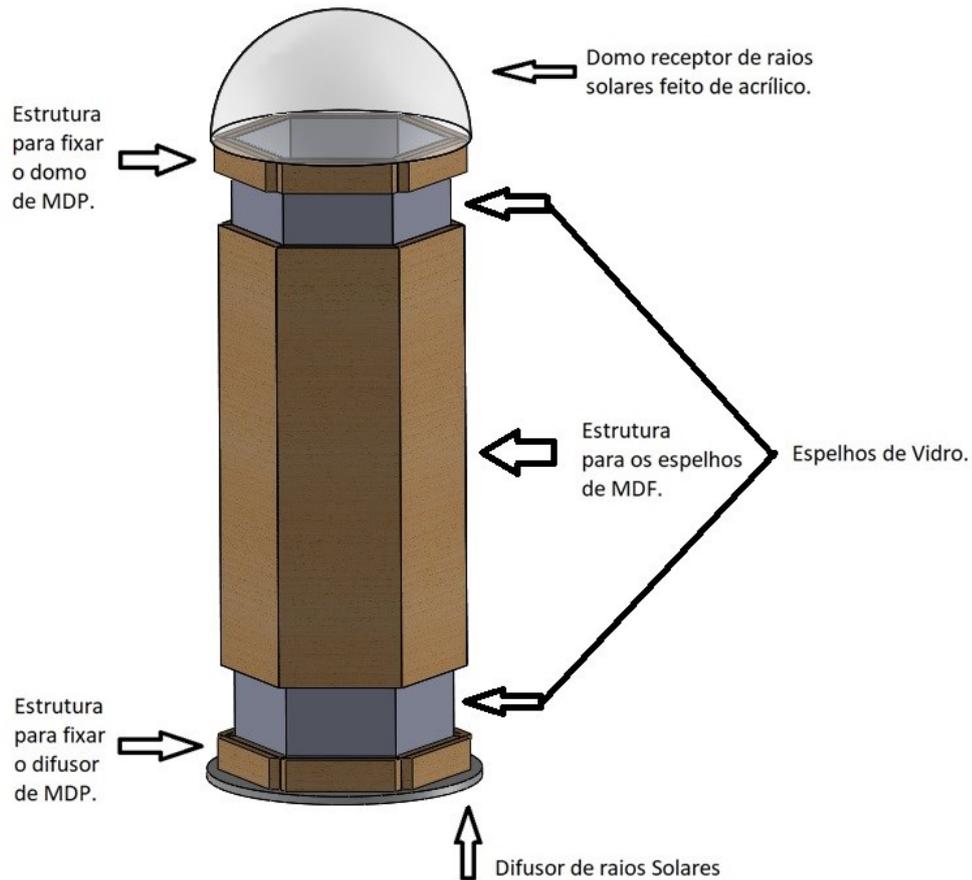
Lado W (mm):	165,50	
Área A (mm ²):	71161,96	
Perímetro (mm):	993	
Altura H (mm):	1000,00	
R =	0,85	
θ (graus)	N(θ)	T
0,00	0,000	1,000
10,00	0,783	0,880
20,00	1,617	0,769
30,00	2,565	0,659
40,00	3,727	0,546
50,00	5,294	0,423
60,00	7,694	0,286
70,00	12,205	0,138
80,00	25,193	0,017
90,00	72516308525997900,000	0,000

Fonte: Autoria Própria.

O local de testes escolhido foi um depósito dentro do campus da UTFPR em Pato Branco com 2.5 m de altura, 3.5 m de comprimento e 2.7 m de largura, localizado na latitude -26.19 e longitude -52.69, onde o local foi completamente isolado contra entrada de luz.

Com as variáveis definidas, desenvolveu-se o projeto no software CAD 3D SolidWorks onde a figura 18 ilustra o resultado final, juntamente com a representação do domo e difusor não desenvolvidos neste trabalho.

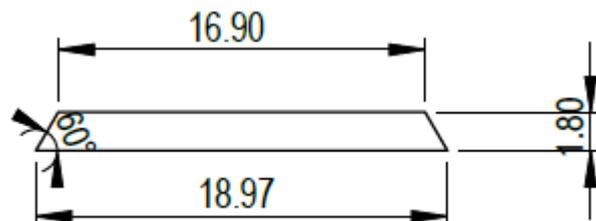
Figura 18 – Desenho CAD 3D do Tubo Solar Hexagonal feito com paredes de espelhos convencionais.



Fonte: Autoria Própria.

A estrutura de MDF é composta por 3 partes, superior, inferior e central, sendo que as duas primeiras são iguais. Dessa forma, as 6 peças centrais possuem a altura medindo 700 mm e a seção transversal é definida de acordo com a figura 19.

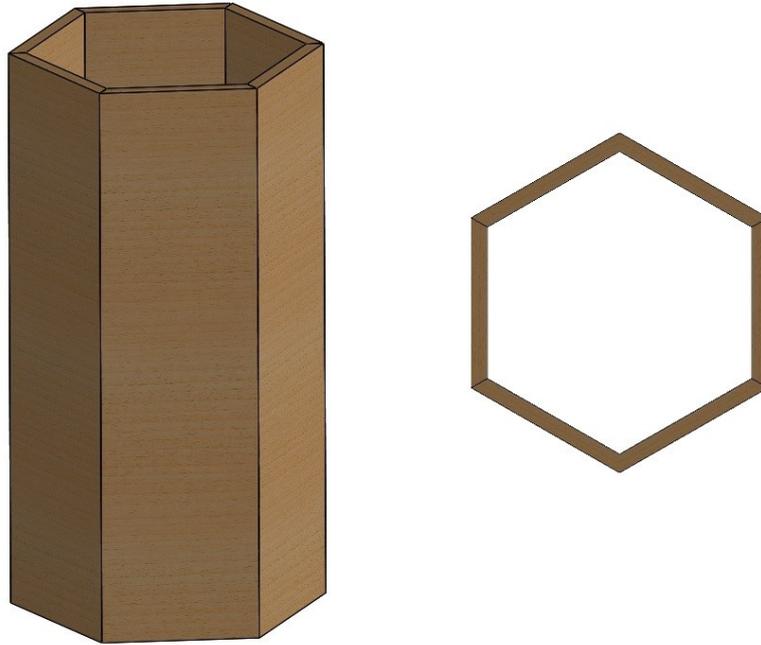
Figura 19 – Representação da seção transversal das peças em MDF utilizadas na estrutura de sustentação do Tubo Solar Hexagonal.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 20 ilustra a montagem da estrutura central juntamente com a representação da seção transversal.

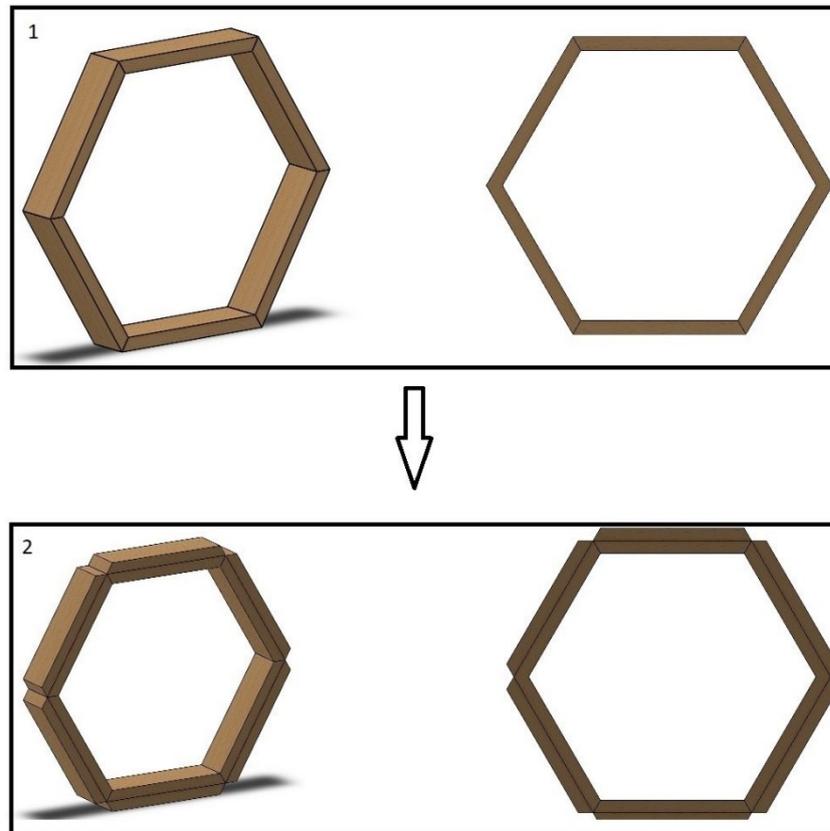
Figura 20 – Representação da estrutura central e sua seção transversal.



Fonte: Autoria Própria.

Nas extremidades, são 24 peças (12 em cima e 12 em baixo) com altura de 50 mm, possuindo a mesma seção transversal da figura 19, onde cada par de peças são coladas de forma que fiquem espelhadas por um plano central. O objetivo dessas peças é auxiliar a fixação do domo e difusor, sendo que suas dimensões são baseadas nas dimensões da face exterior dos espelhos. A figura 21 ilustra sua montagem e seção transversal.

Figura 21 – Representação da montagem da estrutura que compõe as extremidades e sua seção transversal.



Fonte: Autoria Própria.

3.2 CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DO TUBO SOLAR

Na tabela 6 é exibida a lista de materiais utilizados para construção do Tubo Solar Hexagonal.

Tabela 6 – Lista de materiais para construção do Tubo Solar Hexagonal.

Material	Quantidade	Descrição e Dimensões (A,C,L)
Chapas de MDF	6	70x190x18
Chapas de MDF	24	50x190x18
Chapas de Espelhos de Vidro	6	1000x170x3 mm
Chapa de Zinco	1	500x500 x0,5 mm
Rebites	18	
Rebitadeira	1	
Massa Junta de Dilatação	1	280 g
Embalagem Plástica Impermeável	1	400x1000 mm
Cola Silicone	1	280 g

Fonte: Autoria Própria.

A chapa de madeira foi escolhida para compor a estrutura, pelo fato de facilitar a fixação no forro da sala e ser facilmente usinada, além disso, a escolha do MDF não teve um objetivo específico, mas sim pelo o fato da obtenção gratuita para a pesquisa na universidade. Dessa forma, para inserir no cálculo dos custos, foi levantado, junto a um fornecedor, que a chapa em questão é vendida nas dimensões 185x275x18 cm, com peso de aproximadamente 13 kg/m², custando em Pato Branco por volta de 230 reais, sendo que com uma chapa é possível construir 4 estruturas para o equipamento deste estudo.

As chapas de MDF, foram então usinadas em uma marcenaria particular da cidade, com o objetivo de obter a seção transversal exibida na figura 19, porém por limitações nos métodos de fabricação, não foi possível obter as dimensões exatas, tornando a junção das peças assimétrica.

O corte, colagem e junção dos espelhos foram feitas em uma vidraçaria, onde ocorreram os mesmos problemas devido as limitações de fabricação, ou seja, a falta de precisão nos equipamentos para fazer as angulações necessárias. Dessa forma o tubo não ficou com as dimensões perfeitas de um hexágono e nas junções houveram falhas que permitem que a luz não seja refletida e escape. As figuras 22, 23, 24 e 25 mostram, em sequência, registros da construção do equipamento até a finalização.

Figura 22 – Etapa de colagem dos espelhos convencionais e a estrutura.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 – Finalizada a etapa de colagem dos espelhos de vidro.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 24 – Tubo Solar Hexagonal finalizado.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 – Fotografia da seção transversal do Tubo Solar Hexagonal.



Fonte: Autoria Própria.

O resultado, mostrado nas imagens anteriores, é um equipamento robusto pesando 20.4 kg, sendo que aproximadamente 7.5 kg são devido aos espelhos de 3 mm e o restante é correspondente à estrutura de MDF.

A sequência se deu com a instalação, feita no depósito em frente ao Bloco J1 da UTFPR Campus Pato Branco, onde o Tubo Hexagonal foi posicionado no furo passante do forro até o telhado, dessa forma uma chapa de zinco foi cortada nas dimensões da seção do tubo e foi rebitada no telhado para impedir a rotação do equipamento. Além disso uma junta de dilatação foi passada nas frestas entre equipamento e chapa, para finalmente uma embalagem plástica ser fixada em volta, com o objetivo de impedir a entrada de chuva. Nas figuras 26 e 27 é possível observar o resultado.

Figura 26 – Resultado da instalação do Tubo Solar Hexagonal.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 27 – Depósito em frente ao bloco J1 da UTFPR Campus Pato Branco, onde o Tubo Solar Hexagonal foi instalado.



Fonte: Autoria Própria.

3.3 MEDIÇÕES

Inicialmente, para avaliar os níveis de iluminação oferecidos pelo Tubo Solar Hexagonal, foram utilizados dois luxímetros que estavam disponíveis na universidade, um para medir a iluminação interna (altura de trabalho 0,75 m) e um para aferir externamente próximo ao domo, onde a tabela 7 apresenta os equipamentos.

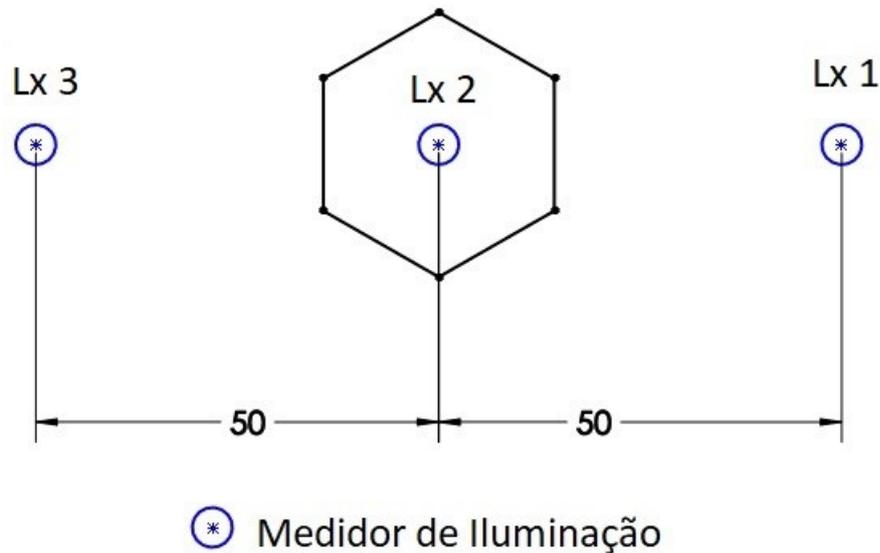
Tabela 7 - Luxímetros utilizados no método de medição 1.

Marca	Modelo	Precisão
Extech	Heavy Duty Meter Model 407026	$\pm 4 \%$
Tenmars	TM-202	$\pm 6 \%$

Fonte: Seus respectivos manuais encontrados na internet.

A imagem 28 ilustra a disposição interna dos medidores para o primeiro método, onde os sensores estão separados por 50 cm.

Figura 28 – Esquema da distribuição interna dos sensores de iluminância do primeiro método.



Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, as medições foram feitas em instantes diferentes, sendo que ao medir cada ponto interno, uma aferição era feita na parte externa, totalizando 3 medições externas e 3 internas em instantes diferentes.

Com o objetivo de aprimorar o primeiro método de medições, foram feitos empréstimos de luxímetros em diversas empresas da cidade de Pato Branco, e no segundo método foram feitas aferições com o auxílio de 8 luxímetros, sendo 7 distribuídos internamente, e 1 na parte exterior avaliando a iluminância incidente no domo, permitindo que as coletas fossem feitas de todos os luxímetros ao mesmo tempo. A tabela 8 apresenta os luxímetros utilizados no segundo método de medições.

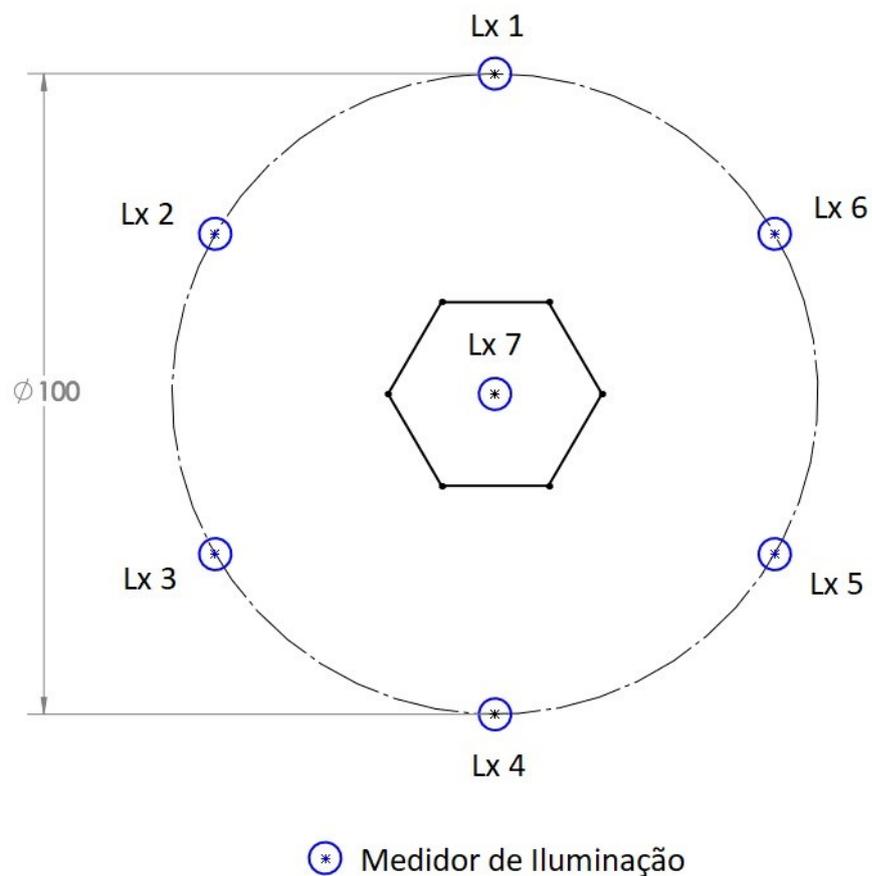
Tabela 8 - Luxímetros utilizados no método de medição 2.

Marca	Modelo	Precisão
Extech	Heavy Duty Meter Model 407026	± 4 %
Extech	Heavy Duty Meter Model 407026	± 4 %
Tenmars	TM-202	± 6 %
Criffer	CR - 8	± 3 %
Minipa	MLM - 1011	± 5 %
Icel	LD - 500	± 5 %
Amprobe	LM - 100	± 6 %

Fonte: Seus respectivos manuais encontrados na internet.

A figura 29 ilustra a disposição dos sensores de iluminância, distribuídos radialmente, um para cada lado do Tubo Hexagonal, em um raio de 50 cm, e um no centro.

Figura 29 – Distribuição dos sensores de iluminância para o segundo método.



Fonte: Autoria Própria.

3.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS DADOS

A metodologia de análise é baseada em Spacek (2017) e se dará com o cálculo do fluxo luminoso gerado pelo tubo solar, avaliação dos níveis de iluminância de acordo com a norma NBRISO_CIE8995-1, cálculo do fluxo faltante para atingir o nível mínimo, bem como o cálculo da potência salva com a iluminação natural. Sendo assim, a iluminância referência considerada nestas análises será 300 lux para uma sala de aula.

Ademais, será apresentado a comparação do Tubo Solar Hexagonal com a lâmpada Osram - LED Parathom Classic A DIM, que se apresenta eficiente e moderna, sendo que a tabela 9 mostra algumas de suas especificações técnicas. Também será apontado a potência de iluminação artificial necessária para compensar a baixa luminosidade nos momentos nublados, bem como o tempo de retorno do dinheiro investido.

Tabela 9 - Informações técnicas da lâmpada de comparação.

Marca:	Osram
Modelo:	LED Parathom Classic A DIM
Potência:	9 W
Fluxo Luminoso:	806 lumens
Vida:	25000 horas
Dimerizável:	Sim

Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções 4.1 e 4.2 serão apresentadas as informações para cada dia de coleta em sequência, como mostra a tabela 10.

Tabela 10 – Informações sobre as coletas.

Dia	Tempo	Método de Medição
05/10/2018	Predominantemente nublado	1
07/11/2018	Ensolarado	2
08/11/2018	Ensolarado	2

Fonte: Autoria Própria.

A figura 30 mostra uma fotografia do equipamento em ação no dia 08/11/2018 às 10:00.

Figura 30 – Tubo Solar Hexagonal em ação.



Fonte: Autoria Própria

A tabela 11 mostra as informações básicas do equipamento desenvolvido neste trabalho.

Tabela 11 – Informações do equipamento desenvolvido.

Peso:	20.4 kg
Estrutura:	MDF
Material Reflexivo:	Espelhos de Vidro
Comprimento:	1 m
Seção Transversal:	Hexagonal

Fonte: Autoria Própria.

4.1 APRESENTAÇÃO DAS INFORMAÇÕES COLETADAS

Nesta seção serão apresentadas as informações adquiridas durante os três dias de medições, sendo elas iluminância (lux) para cada ponto de medição interna e externa, média delas, juntamente com os gráficos correspondentes. Além disso, é apresentado o posicionamento solar para cada tempo de medição e o horário solar.

4.1.1 Primeira Coleta

A primeira coleta foi 05/10/2018, um dia predominantemente nublado, mas com alguns períodos ensolarados. As medições seguiram o primeiro método descrito na seção 3.3, onde a coleta de dados de iluminamento foi feita a cada 30 minutos, como mostra a Tabela 12.

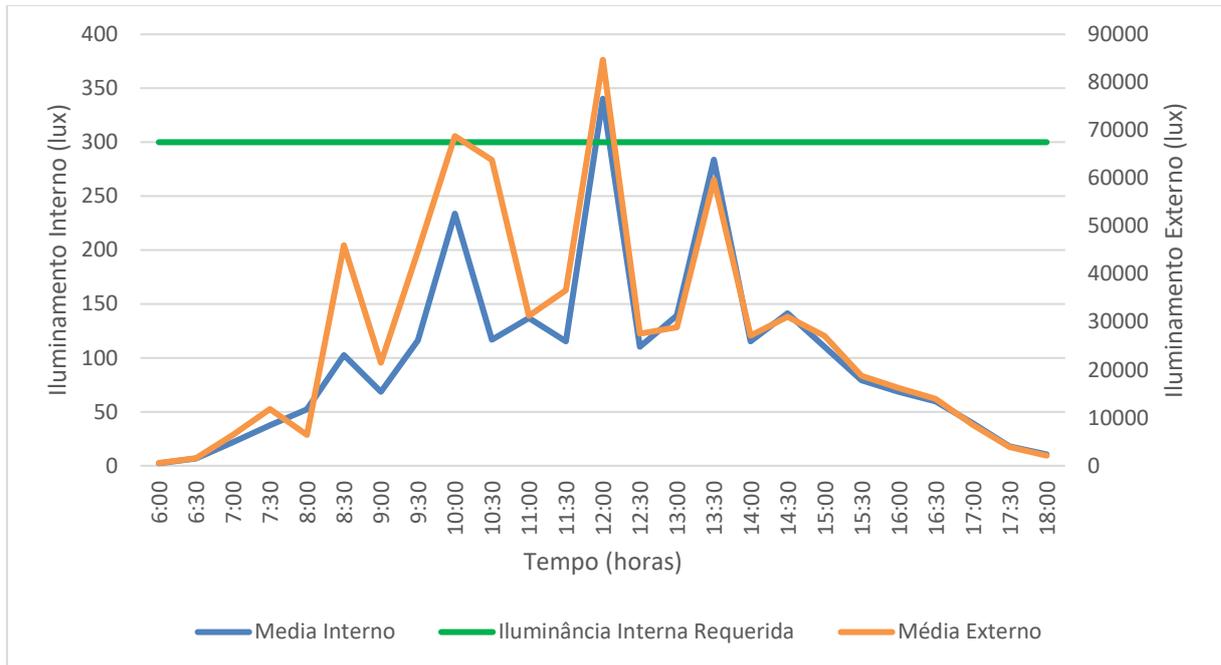
Tabela 12 – Dados de Iluminamento Interno e Externo do dia 05/10/2018.

Hora	Lx 1 (lux)	Lx 2 (lux)	Lx 3 (lux)	Média Interno (lux)	Média Externo (lux)
6:00	2	4	2	2	583
6:30	5	11	4	7	1550
7:00	17	30	18	22	6433
7:30	31	52	29	38	11827
8:00	40	77	40	52	6433
8:30	94	140	74	103	46000
9:00	63	102	40	68	21500
9:30	103	140	106	116	44733
10:00	330	270	101	234	68800
10:30	140	61	150	117	63767
11:00	100	221	90	137	31300
11:30	92	175	79	115	36600
12:00	381	466	174	340	84700
12:30	80	184	67	110	27567
13:00	88	244	86	139	28867
13:30	290	432	129	284	59667
14:00	95	171	80	115	27167
14:30	94	244	86	141	31067
15:00	80	184	67	110	27067
15:30	51	126	61	79	18757
16:00	54	105	47	69	16223
16:30	44	94	41	60	14000
17:00	28	65	26	40	8543
17:30	16	26	12	18	3897
18:00	9	16	7	11	2133

Fonte: Autoria Própria.

Além disso, a figura 31 ilustra o gráfico da média de iluminância interna para cada horário registrado. Destaca-se que a iluminância interna varia muito nos diferentes pontos da sala, pois o difusor não espalha a luz uniformemente, gerando raios de luz concentrados. Dessa forma, a média de iluminância que está sendo utilizada neste trabalho, não se aplica a todo o ambiente, sendo utilizada apenas como parâmetro para avaliar o equipamento.

Figura 31 – Gráfico da média da Iluminância interna e externa, medidos de acordo com o primeiro método no dia 05/10/2018.

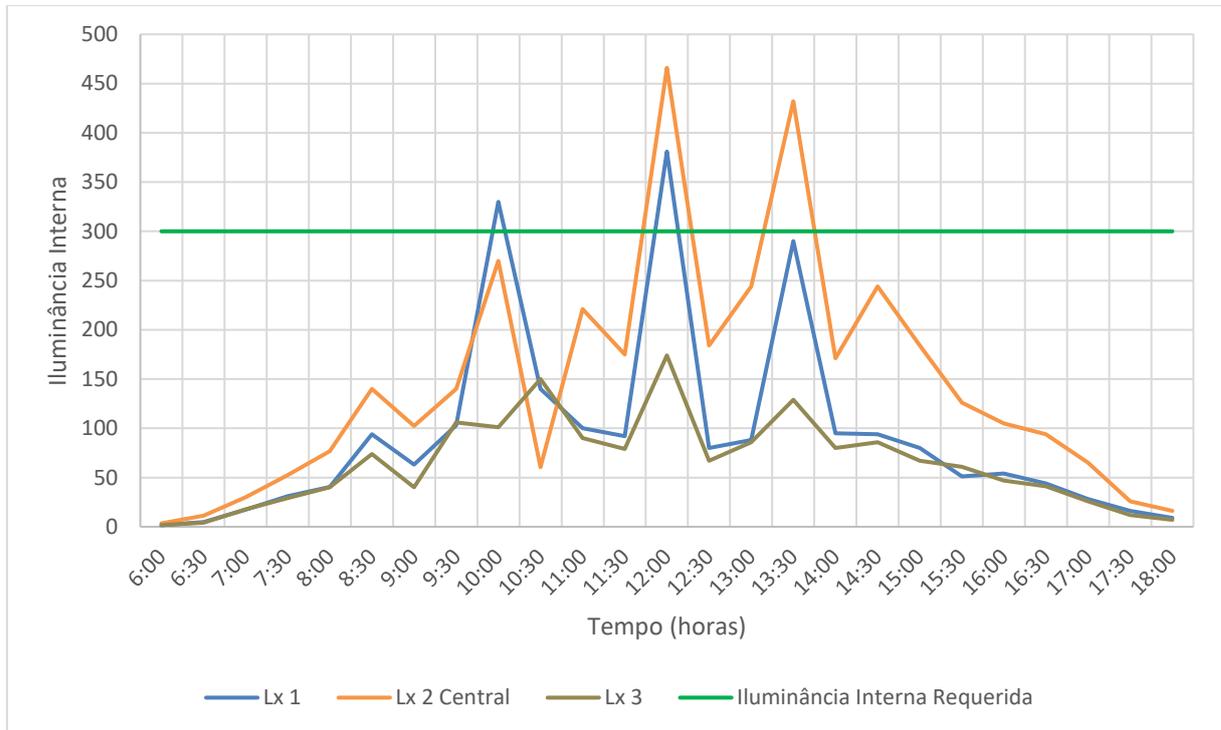


Fonte: Autoria Própria.

Na figura 31 é possível observar que os níveis de iluminação interna acompanham os externos. Além disso, por se tratar de um dia predominantemente nublado com momentos ensolarados, os registros variam bruscamente, sendo que o único momento em que o nível médio atingiu o limite mínimo foi às 12:00 horas.

Já na figura 32, tem-se o gráfico da iluminância para cada ponto de medição, juntamente com a média externa, onde é possível observar diferenças significativas entre os pontos, que podem ser causadas pelos problemas dos luxímetros e também pela distribuição irregular de luz na parte interna.

Figura 32 – Gráfico da Iluminância interna, para cada ponto de medição medidos de acordo com o primeiro método no dia 05/10/2018.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, para cada horário local de medição, foram calculados a hora solar, o ângulo de zênite, a altitude solar e o azimute solar, juntamente com a declinação solar, mostrados da Tabela 13.

Tabela 13 – Posicionamento Solar 05/10/2018.

DATA:	05-Oct	Declinação (graus):		-4,46
Hora Local	Hora Solar	Ângulo de Zênite (graus)	Altitude Solar (graus)	Azimute Solar (graus)
7:00	6:40	78,87	11,13	89,53
7:30	7:10	72,15	17,85	86,15
8:00	7:40	65,45	24,55	82,58
8:30	8:10	58,81	31,19	78,68
9:00	8:40	52,27	37,73	74,29
9:30	9:10	45,88	44,12	69,14
10:00	9:40	39,73	50,27	62,87
10:30	10:10	33,96	56,04	54,91
11:00	10:40	28,82	61,18	44,45
11:30	11:10	24,7	65,3	30,52
12:00	11:40	22,2	67,8	12,73
12:30	12:10	21,88	68,12	7,27
13:00	12:40	23,82	66,18	25,95
13:30	13:10	27,55	62,45	40,97
14:00	13:40	32,46	57,54	52,3
14:30	14:10	38,08	51,92	60,86
15:00	14:40	44,15	45,85	67,54
15:30	15:10	50,48	39,52	72,95
16:00	15:40	56,99	33,01	77,52
16:30	16:10	63,61	26,39	81,54
17:00	16:40	70,29	19,71	85,18
17:30	17:10	77,01	12,99	88,6

Fonte: SUNEARTHTOOLS.COM e HELIODON.COM.BR.

4.1.2 Segunda Coleta

Em 07/11/2018, um dia ensolarado, as medições seguiram o segundo método descrito na seção 3.3, onde a coleta de dados de iluminamento foi feita a cada 30 minutos, como mostra a Tabela 14.

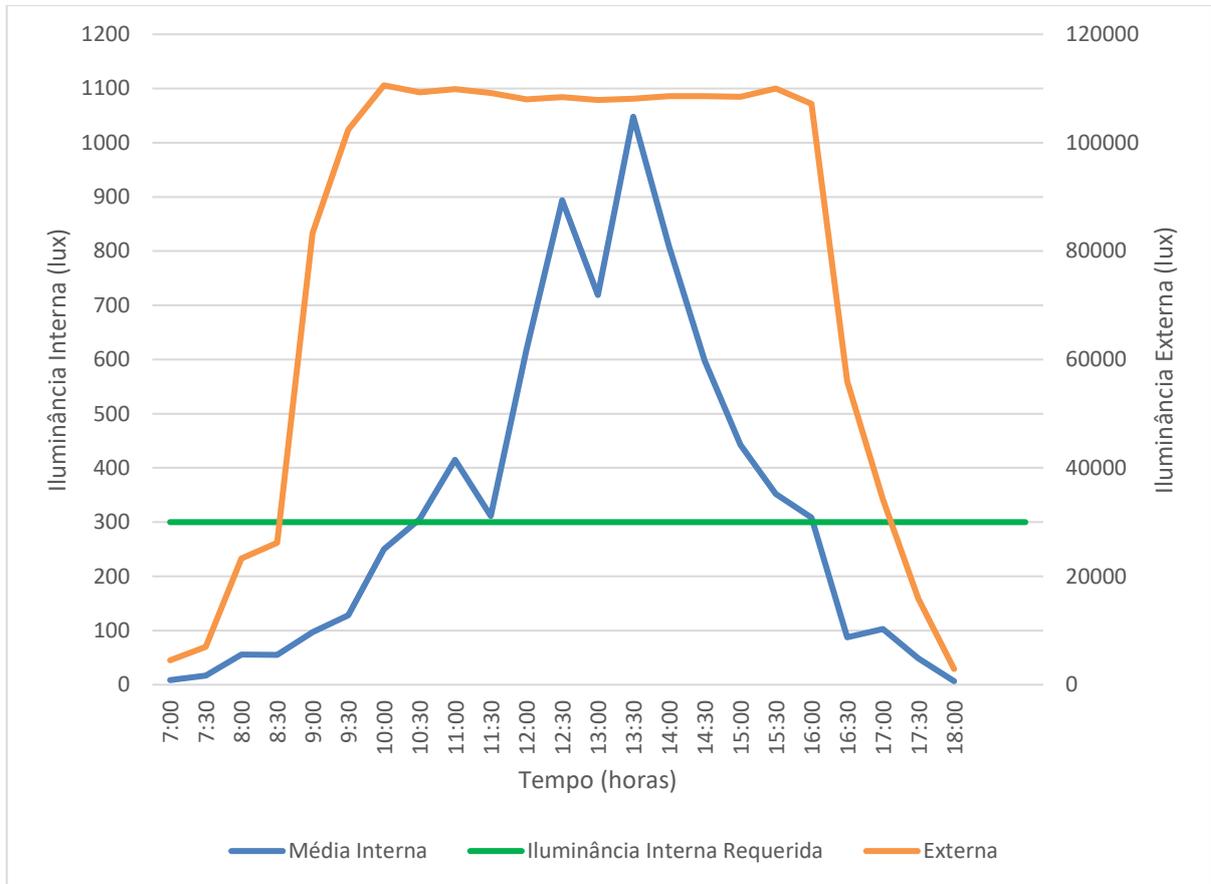
Tabela 14 – Dados de Iluminamento Interno e Externo do dia 07/11/2018.

Horário	Lx 1 (Lux)	Lx 2 (Lux)	Lx 3 (Lux)	Lx 4 (Lux)	Lx 5 (Lux)	Lx 6 (Lux)	Lx 7 Central (Lux)	Lx 8 Externo (Lux)	Media Interna (lux)
7:00	7,8	8,6	8,9	9	6	8,6	11,4	4490	8,6
7:30	15	15,5	16	17	16,5	16	20	7000	16,6
8:00	48,7	54,3	52,3	50	56	50,8	76,4	23300	55,5
8:30	47,7	52,8	50,9	57	54	51	73,5	26200	55,3
9:00	86,8	109,2	78,9	87	85	130	101	83300	96,8
9:30	34,6	205	125,7	122	134	117,6	158,4	102400	128,2
10:00	245	199	157,1	260	277	274	337	110600	249,9
10:30	317	372	251	278	215	273	433	109300	305,6
11:00	245	1017	368	272	272	254	479	109900	415,3
11:30	237	220	247	448	261	334	434	109200	311,6
12:00	433	588	702	353	348	1073	829	108000	618,0
12:30	1022	624	797	375	1080	1005	1354	108400	893,9
13:00	617	576	449	1010	641	402	1337	107900	718,9
13:30	1210	1066	740	1009	360	771	2180	108100	1048,0
14:00	352	1028	763	478	500	934	1608	108600	809,0
14:30	902	961	383	501	679	297	459	108600	597,4
15:00	297	694	459	436	346	427	438	108500	442,4
15:30	287	387	292	321	367	329	481	110000	352,0
16:00	267	294	258	316	303	268	452	107200	308,3
16:30	58,6	63,7	61,7	60	57	221	88,7	56000	87,2
17:00	93,5	99,1	98,5	99	93	89,4	146,1	34200	102,7
17:30	43,6	45,6	47,5	48	44	42,8	69	15900	48,6
18:00	6,7	6,9	6,3	6	6	5,8	8,5	2900	6,6

Fonte: Aatoria Própria.

Além disso, a figura 33 ilustra o gráfico da média de iluminância interna para cada horário registrado.

Figura 33 – Gráfico da média da Iluminamento interna e externa, medidos de acordo com o segundo método no dia 07/11/2018.

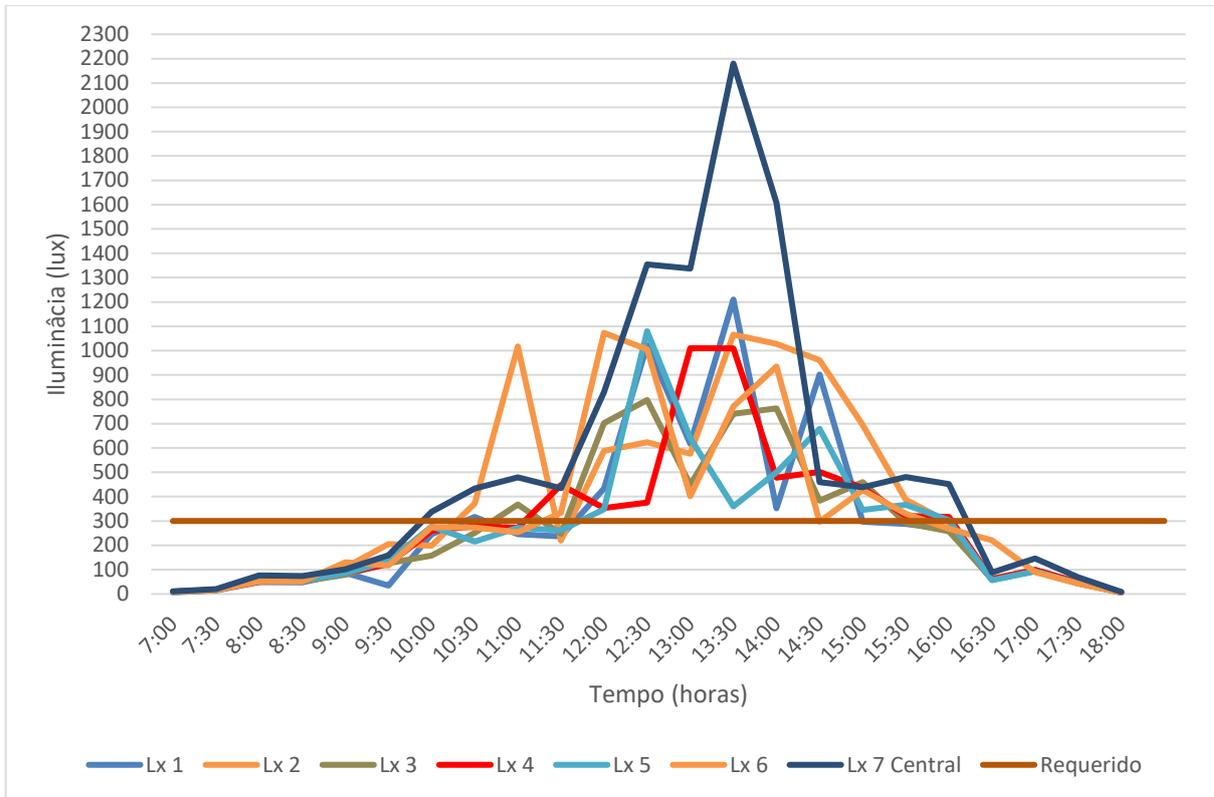


Fonte: Autoria Própria.

No gráfico da figura 33, é possível observar que os níveis de iluminância externa tiveram um padrão constante entre 10:00 e 16:00, fato que aconteceu devido aos níveis ultrapassarem os 100000 lux, excedendo o limite máximo de leitura do luxímetro digital Minipa MLM-1011. Além disso, nota-se que entre 10:30 e 16:30 a iluminância média interna excedeu o limite mínimo, significando economia total de energia elétrica em uma aplicação.

Já na figura 34, tem-se o gráfico da iluminância para cada ponto de medição, juntamente com a média externa, onde é possível observar diferenças significativas entre os pontos, que apesar dos problemas de calibração, evidenciam a distribuição luminosa interna irregular, percebida também visualmente.

Figura 34 – Gráfico da Iluminância interna, para cada ponto de medição medidos de acordo com o segundo método no dia 07/11/2018.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, para cada horário local de medição, foram calculados a hora solar, o ângulo de zênite, a altitude solar e o azimute solar, juntamente com a declinação, mostrados da Tabela 15.

Tabela 15 – Posicionamento Solar 07/11/2018.

DATA:	07-Nov	Declinação (graus):		-16,095
Hora Local	Hora Solar	Ângulo de Zênite (graus)	Altitude Solar (graus)	Azimute Solar (graus)
7:00	6:45	72,86	17,14	99,93
7:30	7:15	66,21	23,79	96,98
8:00	7:45	59,52	30,48	94,00
8:30	8:15	52,8	37,2	90,88
9:00	8:45	46,07	43,93	87,48
9:30	9:15	39,36	50,64	83,60
10:00	9:45	32,7	57,3	78,88
10:30	10:15	26,16	63,84	72,64
11:00	10:45	19,88	70,12	63,43
11:30	11:15	14,23	75,77	47,83
12:00	11:45	10,36	79,64	19,02
12:30	12:15	10,45	79,55	20,61
13:00	12:45	14,43	75,57	48,72
13:30	13:15	20,11	69,89	63,93
14:00	13:45	26,41	63,59	72,96
14:30	14:15	32,95	57,05	79,11
15:00	14:45	39,62	50,38	83,78
15:30	15:15	46,33	43,67	87,63
16:00	15:45	53,06	36,94	91,02
16:30	16:15	59,78	30,22	94,13
17:00	16:45	66,47	23,53	97,11
17:30	17:15	73,12	16,88	100,06
18:00	17:45	79,71	10,29	103,05

Fonte: SUNEARTHTOOLS.COM e HELIODON.COM.BR.

4.1.3 Terceira Coleta

Finalmente, 08/11/2018, um dia predominantemente ensolarado, as medições seguiram o segundo método descrito na seção 3.3, onde a coleta de dados de iluminação foi feita a cada 30 minutos, como mostra a Tabela 16.

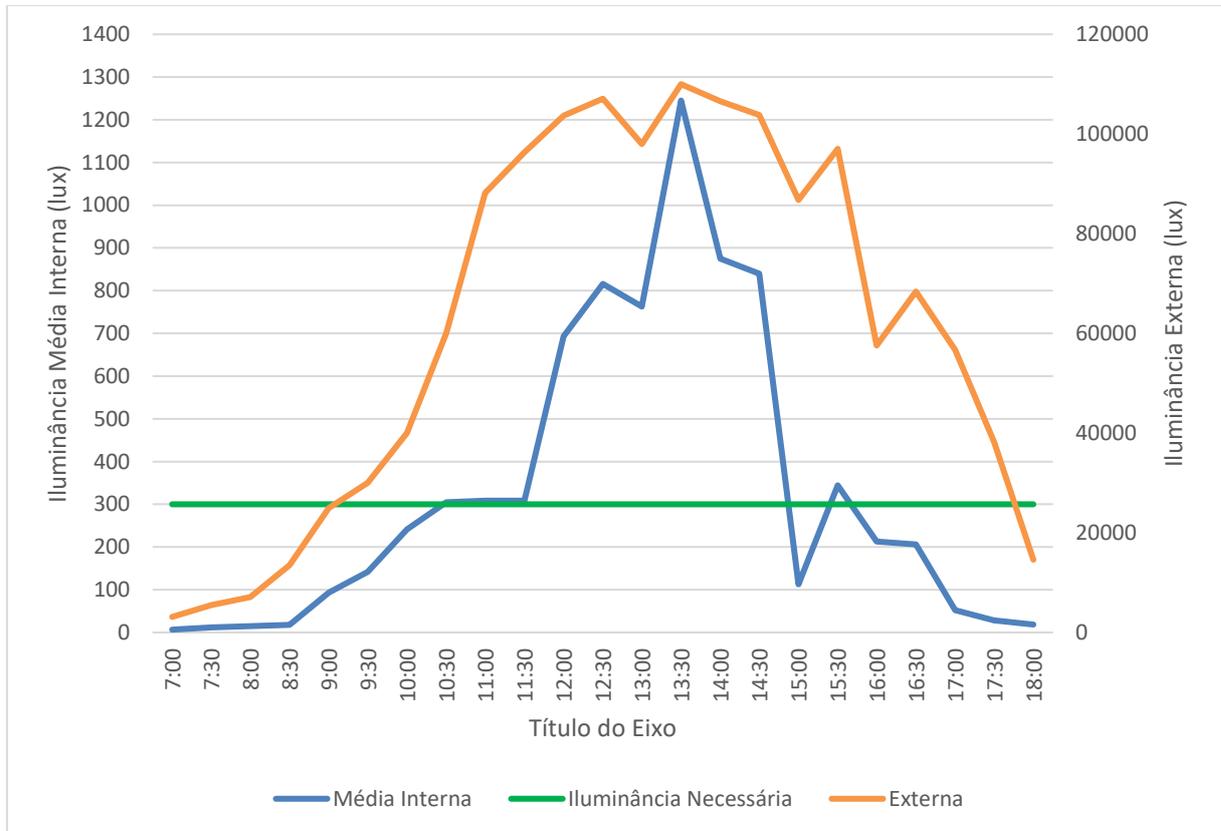
Tabela 16 – Dados de Iluminamento Interno e Externo do dia 08/11/2018.

Horário	Lx 1 (Lux)	Lx 2 (Lux)	Lx 3 (Lux)	Lx 4 (Lux)	Lx 5 (Lux)	Lx 6 (Lux)	Lx 7 Central (Lux)	Lx 8 Externo (Lux)	Media Interna (lux)
7:00	5,9	6,5	6,2	6	7	6,4	8,2	3120	6,60
7:30	10,3	11,7	11,5	11	12	11,5	14,8	5500	11,83
8:00	13,3	15,1	14,8	14	15	14,7	18,8	7080	15,10
8:30	15,9	18,3	17,5	16	18	17,5	22,2	13500	17,91
9:00	95,7	122,8	80,4	86	92	75,1	102,8	25000	93,54
9:30	134,3	213	125,9	114	130	120	153,1	30000	141,47
10:00	291	182,8	137,4	228	275	247	328	40000	241,31
10:30	360	240	218	254	394	253	415	60000	304,86
11:00	385	314	244	243	249	264	461	88200	308,57
11:30	243	237	259	250	271	493	406	96300	308,43
12:00	336	370	250	1219	536	1264	877	103700	693,14
12:30	679	601	732	361	989	923	1426	107100	815,86
13:00	534	596	448	1199	754	380	1429	98000	762,86
13:30	944	1151	1029	828	1655	1048	2060	110000	1245,00
14:00	359	1067	750	584	518	1092	1757	106600	875,29
14:30	2210	1697	550	360	404	250	406	103800	839,57
15:00	101	114,9	102	109	111,4	102	151	86800	113,04
15:30	326	313	298	298	388	299	487	97000	344,14
16:00	185	206	167	217	217	174	322	57600	212,57
16:30	179,4	233	201	288	173	129	239	68400	206,06
17:00	41,2	51,6	52,1	45	48	59	68,6	56700	52,21
17:30	24,7	27,8	29,4	26	25	26,7	36,9	38200	28,07
18:00	16,1	19,2	20,1	17	15	18,5	24,7	14600	18,66

Fonte: Autoria Própria.

Além disso, a figura 35 ilustra o gráfico da média de iluminância interna para cada horário registrado.

Figura 35 – Gráfico da média da Iluminamento interna e externa, medidos de acordo com o segundo método no dia 08/11/2018.



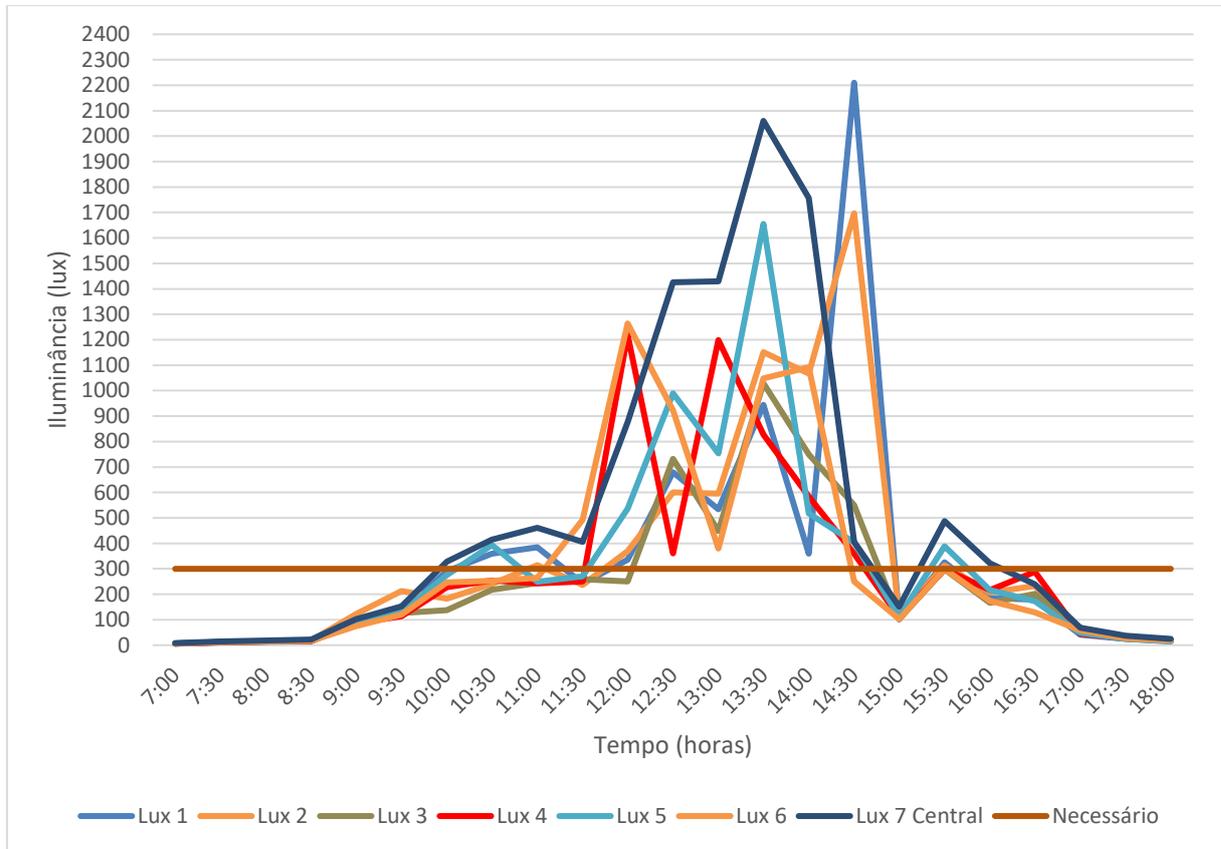
Fonte: Autoria Própria.

No gráfico da figura 35, é possível observar que o luxímetro externo foi substituído, porém este não possui boa precisão acima de 50000 lux, tornando os dados externos entre 10:00 e 17:00 infieis. Além disso, nota-se que entre 10:30 e 14:30 horas a iluminância média interna excedeu o limite mínimo, significando economia total de energia elétrica em uma aplicação.

Deve ser destacado também um fato que foi observado durante este dia, que por obstrução de árvores ao redor da sala de testes, os raios solares incidiram diretamente o domo entre as 9:00 e 17:00.

Já na figura 36, tem-se o gráfico da iluminância para cada ponto de medição, juntamente com a média externa, onde é possível observar diferenças significativas entre os pontos, que apesar dos problemas de calibração, evidenciam a distribuição luminosa interna irregular, percebida também visualmente.

Figura 36 – Gráfico da Iluminância interna, para cada ponto de medição medidos de acordo com o segundo método no dia 08/11/2018.



Fonte: Autoria Própria.

Além do mais, para cada horário local de medição, foram calculados a hora solar, o ângulo de zênite, a altitude solar e o azimute solar, juntamente com a declinação, mostrados da Tabela 17.

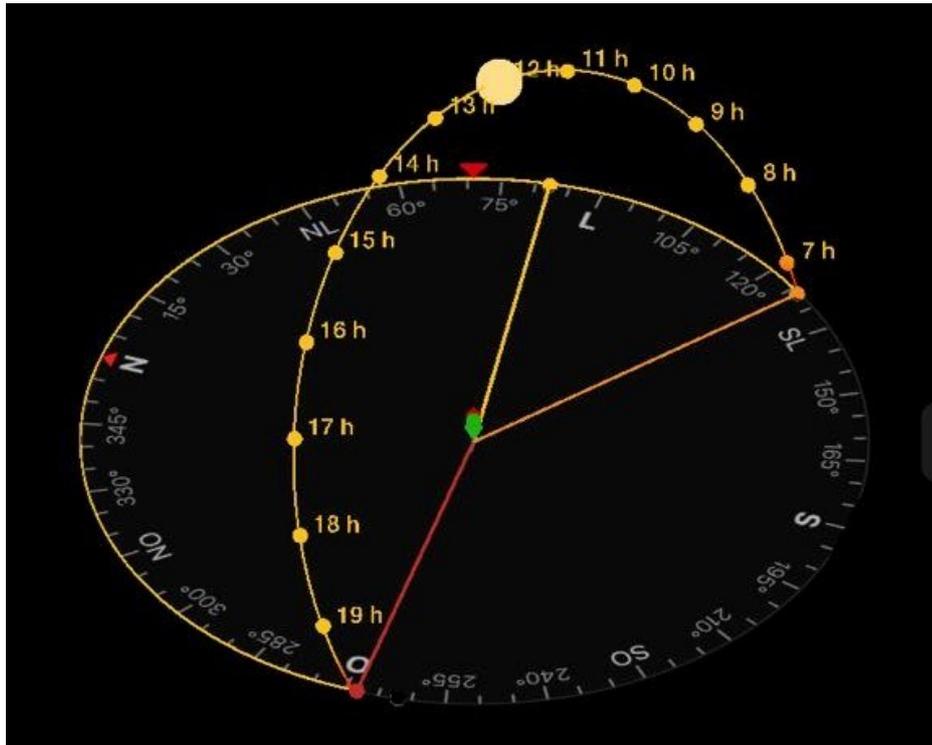
Tabela 17 – Posicionamento Solar 08/11/2018.

DATA:	08-Nov	Declinação:		-16,391
Hora Local	Hora Solar	Ângulo de Zênite (graus)	Altitude Solar (graus)	Azimute (graus)
7:00	6:45	72,86	17,14	100,22
7:30	7:15	66,21	23,79	97,29
8:00	7:45	59,52	30,48	94,32
8:30	8:15	52,8	37,2	91,23
9:00	8:45	46,07	43,93	87,87
9:30	9:15	39,36	50,64	84,04
10:00	9:45	32,7	57,3	79,39
10:30	10:15	26,16	63,84	73,25
11:00	10:45	19,88	70,12	64,18
11:30	11:15	14,23	75,77	48,71
12:00	11:45	10,36	79,64	19,6
12:30	12:15	10,45	79,55	21,07
13:00	12:45	14,43	75,57	49,51
13:30	13:15	20,11	69,89	64,62
14:00	13:45	26,41	63,59	73,54
14:30	14:15	32,95	57,05	79,6
15:00	14:45	39,62	50,38	84,2
15:30	15:15	46,33	43,67	88,01
16:00	15:45	53,06	36,94	91,35
16:30	16:15	59,78	30,22	94,44
17:00	16:45	66,47	23,53	97,4
17:30	17:15	73,12	16,88	100,34
18:00	17:45	79,71	10,29	103,32

Fonte: SUNEARTHTOOLS.COM e HELIODON.COM.BR.

Por fim, é ilustrado na figura 37, o trajeto solar obtido pelo aplicativo para smartphone SunSueyvor, onde o Sol se encontra ao meio dia local.

Figura 37 – Trajeto Solar no dia 08/11/2018.



Fonte: SunSurveyor.

4.2 ANÁLISE, COMPARAÇÃO E RESULTADOS

Nesta seção, será calculado o fluxo luminoso gerado pelo equipamento em discussão, por meio do método dos lumens descrito na seção 2.4.4, onde foram adotados empiricamente o fator de utilização do recinto F_u 0,46 e fator de depreciação da luminária F_{dl} 0,8. Também foi calculado, a partir das mesmas equações, o fluxo luminoso de 7580,6 lumens, necessário para atender a iluminância mínima de 300 lux.

Além do mais, será apresentada uma breve comparação entre a iluminação natural e artificial, onde essas etapas são divididas nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 para cada dia de medições.

4.2.1 Primeira Coleta

Primeiramente, para o dia 05/10/2018 é apresentado na tabela 18, o fluxo luminoso solar gerado pelo Tubo Solar Hexagonal, juntamente com o fluxo luminoso faltante para obter iluminância mínima de 300 lux na altura de trabalho (0,75 m), necessária para atender a norma NBRISO_CIE8995-1 em uma sala de aula.

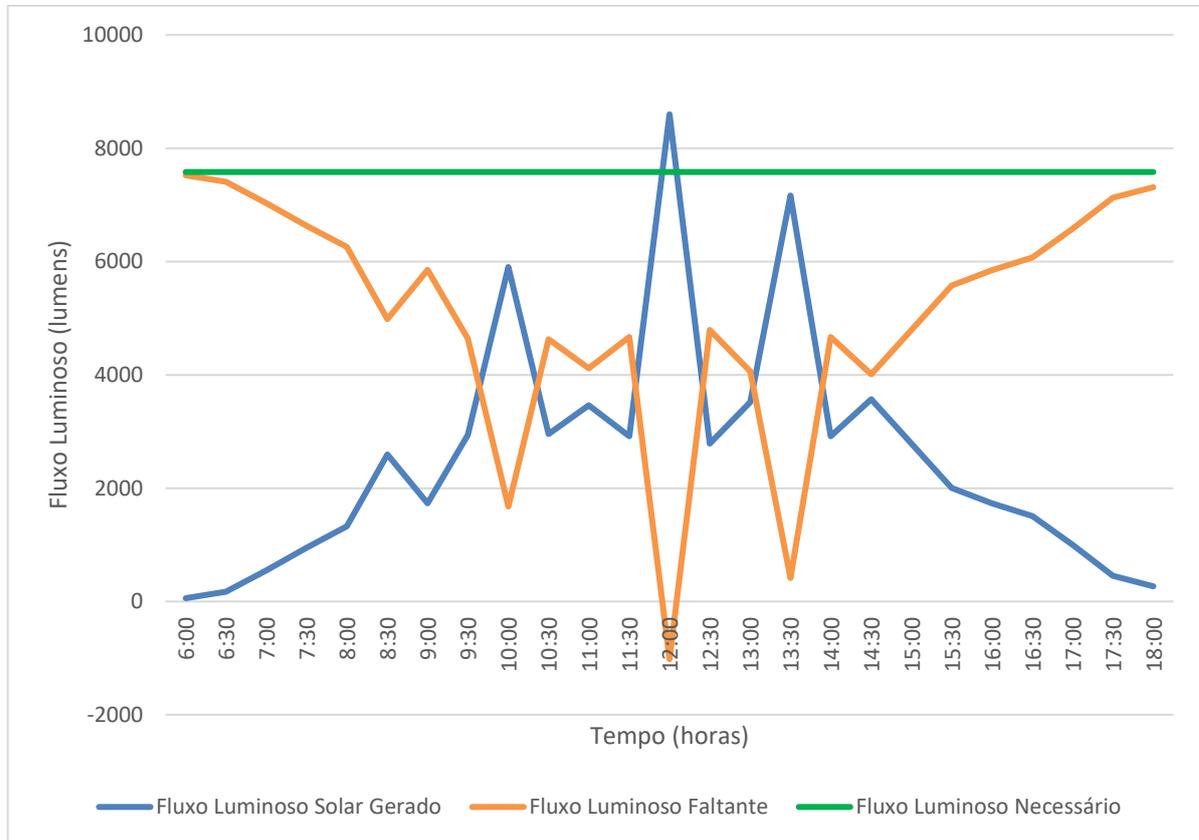
Tabela 18 – Fluxo Luminoso Solar Gerado e Faltante 05/10/2018.

Hora	Iluminância Média Interna (lux)	Fluxo Luminoso Solar Gerado (lumens)	Fluxo Luminoso Faltante (lumens)
6:00	2	58	7523
6:30	7	170	7411
7:00	22	549	7031
7:30	38	948	6632
8:00	52	1325	6256
8:30	103	2594	4986
9:00	68	1730	5851
9:30	116	2940	4641
10:00	234	5904	1676
10:30	117	2953	4628
11:00	137	3462	4119
11:30	115	2914	4666
12:00	340	8600	-1019
12:30	110	2789	4792
13:00	139	3521	4060
13:30	284	7168	413
14:00	115	2914	4666
14:30	141	3571	4009
15:00	110	2788	4793
15:30	79	2005	5576
16:00	69	1735	5846
16:30	60	1508	6073
17:00	40	1002	6578
17:30	18	455	7126
18:00	11	270	7311

Fonte: Autoria Própria.

A figura 38 ilustra o gráfico do fluxo luminoso solar gerado e o faltante, além de o fluxo necessário para atingir a iluminância mínima.

Figura 38 – Gráfico do Fluxo Luminoso Solar Gerado e Faltante 05/10/2018.



Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que conforme o fluxo luminoso solar aumenta, diminui o fluxo necessário de luz artificial para complementar. Além disso, por volta de 12 horas, nota-se que o fluxo luminoso solar excedeu o limite mínimo, não necessitando de luz artificial complementar.

Sendo assim, se o fluxo luminoso total gerado pelo Tubo Solar Hexagonal no dia da coleta foi de 63874 lumens, dividindo esse valor pelo número de medições 25, significa que a média horária foi de 2555 lumens. Além de tudo, como a potência do LED a ser comparado é 9 W, calcula-se que em 12 horas seriam necessários 342 Wh de luz artificial para gerar o mesmo iluminamento de luz natural.

4.2.2 Segunda Coleta

Para o dia 07/11/2018, a tabela 19 apresenta o fluxo luminoso solar gerado pelo Tubo Solar Hexagonal, juntamente com o fluxo luminoso faltante para obter iluminância mínima de 300 lux na altura de trabalho (0,75 m), necessária para atender a norma NBRISO_CIE8995-1 em uma sala de aula.

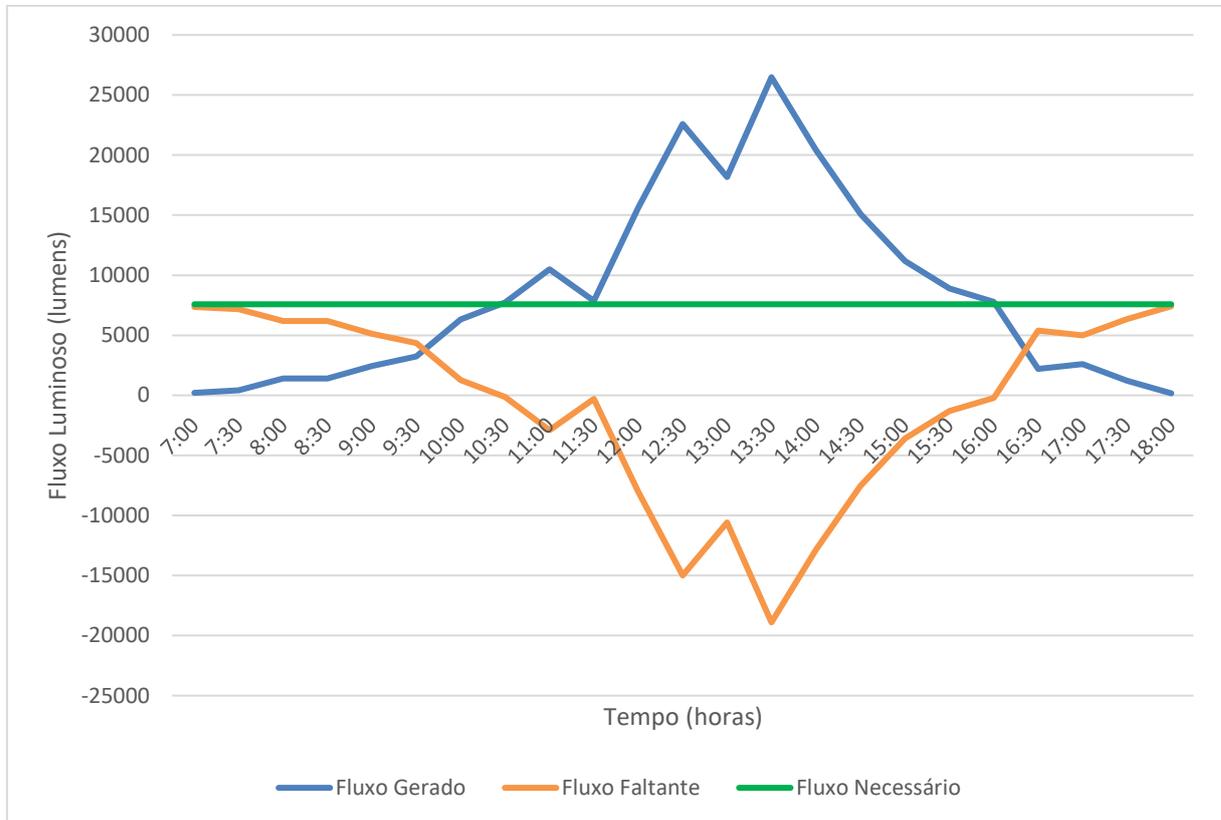
Tabela 19 – Fluxo Luminoso Solar Gerado e Faltante 07/11/2018.

Hora	Iluminância Média Interno (lux)	Fluxo Luminoso Solar Gerado (lumens)	Fluxo Luminoso Faltante (lumens)
7:00	9	218	7363
7:30	17	419	7162
8:00	56	1402	6178
8:30	55	1397	6184
9:00	97	2447	5134
9:30	128	3239	4342
10:00	250	6314	1267
10:30	306	7721	-141
11:00	415	10494	-2913
11:30	312	7873	-292
12:00	618	15616	-8035
12:30	894	22587	-15006
13:00	719	18165	-10584
13:30	1048	26482	-18901
14:00	809	20442	-12862
14:30	597	15096	-7516
15:00	442	11180	-3599
15:30	352	8895	-1314
16:00	308	7790	-209
16:30	87	2205	5376
17:00	103	2594	4987
17:30	49	1229	6351
18:00	7	167	7414

Fonte: Autoria Própria.

A figura 39 ilustra o gráfico do fluxo luminoso solar gerado e o faltante, além de o fluxo necessário para atingir a iluminância mínima.

Figura 39 – Gráfico do Fluxo Luminoso Solar Gerado e Faltante 07/11/2018.



Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que conforme o fluxo luminoso solar aumenta, diminui o fluxo necessário de luz artificial para complementar. Sendo que, por volta de 10:30 até 16:00 horas, nota-se que o fluxo luminoso solar excedeu o limite mínimo, não necessitando de luz artificial complementar.

Sendo assim, se o fluxo luminoso total gerado pelo Tubo Solar Hexagonal no dia da coleta foi de 193971 lumens, dividindo esse valor pelo número de medições 23, significa que a média horária foi de 8434 lumens. Além de tudo, como a potência do LED a ser comparado é 9 W, calcula-se que em 11 horas seriam necessários 1035 Wh de luz artificial para gerar o mesmo iluminamento de luz natural.

4.2.2 Terceira Coleta

Para o dia 08/11/2018, a tabela 20 apresenta o fluxo luminoso solar gerado pelo Tubo Solar Hexagonal, juntamente com o fluxo luminoso faltante para obter iluminância mínima de 300 lux na altura de trabalho (0,75 m), necessária para atender a norma NBRISO_CIE8995-1 em uma sala de aula.

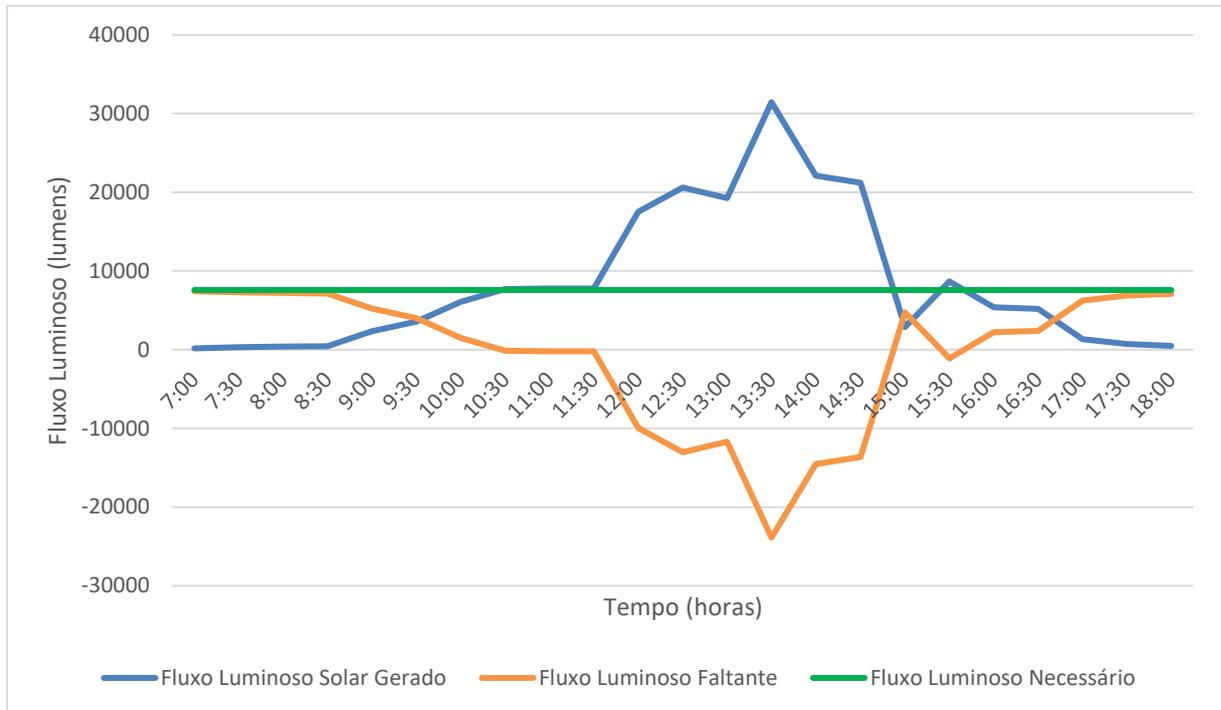
Tabela 20 – Fluxo Luminoso Solar Gerado e Faltante 08/11/2018.

Hora	Iluminância Média Interno (lux)	Fluxo Luminoso Solar Gerado (lumens)	Fluxo Luminoso Faltante (lumens)
7:00	7	167	7414
7:30	12	299	7282
8:00	15	382	7199
8:30	18	453	7128
9:00	94	2364	5217
9:30	141	3575	4006
10:00	241	6098	1483
10:30	305	7703	-123
11:00	309	7797	-217
11:30	308	7794	-213
12:00	693	17515	-9934
12:30	816	20616	-13035
13:00	763	19276	-11696
13:30	1245	31460	-23879
14:00	875	22117	-14537
14:30	840	21215	-13634
15:00	113	2856	4724
15:30	344	8696	-1115
16:00	213	5371	2209
16:30	206	5207	2374
17:00	52	1319	6261
17:30	28	709	6871
18:00	19	471	7109

Fonte: Autoria Própria.

A figura 40 ilustra o gráfico do fluxo luminoso solar gerado e o faltante, além de o fluxo necessário para atingir a iluminância mínima.

Figura 40 – Gráfico do Fluxo Luminoso Solar Gerado e Faltante 08/11/2018.



Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que conforme o fluxo luminoso solar aumenta, diminui o fluxo necessário de luz artificial para complementar. Sendo que, por volta de 10:30 até 15:00 horas, nota-se que o fluxo luminoso solar excedeu o limite mínimo, não necessitando de luz artificial complementar.

Sendo assim, se o fluxo luminoso total gerado pelo Tubo Solar Hexagonal no dia da coleta foi de 193461 lumens, dividindo esse valor pelo número de medições 23, significa que a média horária foi de 8411 lumens. Além de tudo, como a potência do LED a ser comparado é 9 W, calcula-se que em 11 horas seriam necessários 1127 Wh de luz artificial para gerar o mesmo iluminamento de luz natural.

4.2.3 Resultados

A tabela 21 apresenta o orçamento para o equipamento desenvolvido neste trabalho.

Tabela 21- Orçamento do Tubo Solar

Produto	Descrição	Quantidade	Preço (R\$)
Espelhos de Vidro	1000x165.5x3	6	150
Usinagem MDF			50
Mão de Obra			50
Chapas MDF	900x165.5x18	6	60
Outros			30
TOTAL			360

Fonte: Autoria Própria.

Como já discutido na metodologia, o material para a estrutura não precisa ser necessariamente o MDF. O ideal seria um material leve, fácil de colar no vidro e que facilite a fixação no telhado.

A tabela 22 mostra resumidamente os resultados obtidos nos dias de medições com o equipamento em estudo.

Tabela 22 – Resultados do Tubo Solar Hexagonal

Dia	Tempo	Fluxo Luminoso Horário Médio	Energia Solar Diária Gerada	Potência Salva
05/10/2018	Nublado	5323 lumens	342 Wh	702 Wh
07/11/2018	Ensolarado	16164 lumens	1035 Wh	1257 Wh
08/11/2018	Ensolarado	16122 lumens	1127 Wh	1173 Wh

Fonte: Autoria Própria.

Destaca-se novamente, que o fluxo luminoso horário médio que é relacionado a média de iluminância diária, representa uma estimativa, pois de fato a luz não se espalhou uniformemente no interior do ambiente, como mostram os registros das figuras 41 e 42.

Figura 41 - Fotografia da concentração de raios solares na sala de testes.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 42 - Fotografia da concentração de raios solares na parede.



Fonte: Autoria Própria.

Sendo assim, para avaliar com exatidão os níveis de iluminação deste equipamento, seria necessário redimensionar o difusor, para que a luz se espalhe da forma mais uniforme possível.

Com relação aos materiais utilizados no equipamento, apesar da escassez de informações técnicas, notou-se o alto poder reflexivo dos espelhos convencionais a partir das análises de iluminância. Além disso, o MDF da parte estrutural cumpriu o seu papel de manter a rigidez e facilitar o posicionamento no forro da sala. Porém notou-se o acréscimo de aproximadamente 12.5 kg com seu uso, tornando o equipamento relativamente pesado.

Sob a perspectiva da construção, um problema notável foi a usinagem das peças de vidro e MDF, que ocorreram devido a imprecisão dos equipamentos utilizados, ocasionando a má junção das peças de vidro e a imperfeição das dimensões do hexágono. A figura 43 registra as frestas que permitiram a passagem de luz pelos cantos do tubo solar.

Figura 43 - Fotografia das frestas causadas pelos problemas de usinagem e colagem.



Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apesar dos problemas de calibração dos equipamentos de medição, foi possível estimar os níveis médios de iluminação natural oferecidos pelo tubo desenvolvido. Sendo que, tais níveis foram satisfatórios, iluminando muitas vezes mais do que o necessário nos dias ensolarados.

É notório que em dias nublados, momentos de encobrimento por nuvens, no início e no fim do dia, os níveis de iluminação apresentam-se abaixo do recomendado. Dessa forma, para esses problemas, é possível considerar um sistema de dimerização, que terá a função de fazer a leitura da iluminação no ambiente e controlar a intensidade da iluminação artificial para adequar os níveis luminosos.

Também é possível tornar a iluminação completamente independente de energia elétrica não renovável, por meio da integração de um painel solar fotovoltaico e uma bateria. Dessa forma, enquanto o tubo solar ilumina durante o dia, os painéis convertem a energia fotovoltaica em elétrica, armazenando-a na bateria, para ser utilizada no período noturno ou nos momentos diários de baixa iluminação natural.

Sugere-se que em futuras pesquisas sejam trabalhados domo e difusor, pois ainda não foram encontradas soluções de baixo custo a boa disponibilidade, sendo que o último citado, necessita ser dimensionado especialmente para o equipamento deste estudo, devido ao problema do não espalhamento dos raios, já relatado anteriormente.

Também é necessário encontrar a melhor alternativa para usinagem e junção dos espelhos, para evitar problemas com frestas e escape de luz. Além disso, uma melhor alternativa de material para a estrutura precisa ser trabalhada, a fim de reduzir o peso do equipamento, sendo o material bambu uma alternativa a ser estudada.

Por fim, conclui-se que é viável a utilização do tubo solar feito de espelhos planos convencionais, pois os espelhos apresentaram-se com alta reflectância, permitindo ao tubo entregar de forma satisfatória a luz natural dentro da sala de testes.

REFERÊNCIAS

- ABILUX. (2015a). **Abilux aponta medidas para reduzir o consumo de energia.** Retrieved from http://www.abilux.com.br/portal/pdf/destaques/destaque_2015-02-12.pdf
- ABILUX. (2015b). **Vidro float - ABRAVIDRO.** Retrieved June 9, 2018, from <http://abravidro.org.br/vidros/vidro-float/>
- ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: **Iluminação de ambientes de trabalho, Parte 1: Interior.** ABNT, 54.
- AGC-VIDROS DECORATIVOS. (n.d.). **Mirox Premium | Vidros Decorativos.** Retrieved June 9, 2018, from <http://www.vidrosdecorativos.com/mirox-premium/>
- CALLOW, J. M. (2003). **Daylighting Using Tubular Light Guide Systems.** Retrieved from <http://eprints.nottingham.ac.uk/10026/>
- CEBRACE. (n.d.). **O espelho Mirage: resistência e durabilidade superior à dos espelhos convencionais.** Retrieved from https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/cebrace_mirage.pdf
- EDMONDS, I. (2010). **Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section.** *Solar Energy*, 84(6), 928–938. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.001>
- FILHO, J. M. (2002). **Instalacoes_Eletricas_Industriais_6a_ed_-_Mamede_-_LTC_2002.pdf.**
- GIORDANI, C. T. (2017). **Benefícios e estratégias da iluminação natural nos ambientes e seus usuários, 01, 1–17.**
- GUARDIAN GLASS. (n.d.). **Espelho Guardian.** Retrieved June 9, 2018, from <http://www.guardianbrasil.com.br/NossosProdutos/SolucoesInteriores/EspelhoGuardian/index.htm>
- LAFAY, JEAN-MARC. (2005). **Análise Energética De Sistemas De Aquecimento De Água Com Energia Solar E Gás.**

JORGE, CORDEIRO, ROSA, BIANCHI. (2018). **Vitamin D Deficiency and Cardiovascular Diseases. *International Journal of Cardiovascular Sciences, (AHEAD)***. <https://doi.org/10.5935/2359-4802.20180025>

LI, D. H. W., TSANG, E. K. W., CHEUNG, K. L., & TAM, C. O. (2010). **An analysis of light-pipe system via full-scale measurements. *Applied Energy, 87(3)***, 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.008>

MORAIS, L. C. DE. (2015). **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**, 128.

MOZART LUNA, E. (2018). **2018 começa com crise no setor energético | | 7Segundos**. Retrieved August 21, 2018, from <https://www.7segundos.com.br/blogs/mozart-luna/101714/2018-comeca-com-crise-no-setor-energetico.html>

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L. DE, & RÜTHER, R. (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 64. <https://doi.org/978-85-17-00030-0>

POTENCIAL SOLAR NO BRASIL - AMÉRICA DO SOL. (n.d.). Retrieved June 4, 2018, from <http://americadosol.org/potencial-solar-no-brasil/>

SPACEK, ANDERSON DIOGO. (2017). **Desenvolvimento De Tubos Solares Aplicados Em Iluminação De Interiores A Partir De Materiais Polimericos Metalizados**.

UFJF, E. I. (n.d.). **Especial: A crise energética brasileira – Energia Inteligente**. Retrieved August 21, 2018, from <http://energiainteligenteufjf.com/especial/especial-a-crise-energetica-brasileira/>