LEITE, Aline Gouvêa. **Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes.** 2018. 167 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A iluminação dos espaços é observada há milênios, desde a utilização do fogo até as mais novas tecnologias em iluminação. Iluminar ambientes procurando, cada vez mais, a eficiência e a economia de energia vem sendo motivo de investigação constante dos pesquisadores. Atualmente, o grande problema enfrentado pela iluminação artificial é o custo da energia elétrica e por isso vários pesquisadores têm procurado soluções alternativas. O presente trabalho realizou um estudo sobre a viabilidade técnica e o desempenho de um equipamento (patenteado como Girassol®) que emprega a fibra óptica para iluminação natural em ambientes que não recebem luz direta, ainda no formato de um protótipo. O aspecto da sustentabilidade visando a economia de energia através da captação solar e condução da luz através dos cabos de fibra óptica até a célula-teste foi analisado. A questão principal a ser observada foi quão eficiente pode ser o sistema de iluminação com fibra óptica utilizando a captação de luz solar. Para isso foram feitos testes do equipamento em um ambiente previamente construído, denominado célula teste, com área aproximada de 4 m². Foi medida a quantidade de luminância e iluminâncias que chegam ao ambiente da célula-teste. Esta pesquisa visou conhecer a tecnologia atual existente no mercado comercial nacional e internacional e a tecnologia do equipamento desenvolvido no Brasil. A pesquisa considerou como a hipótese de que a correta captação de luz solar aliada à correta condução através dos cabos de fibra óptica, que permite com que a iluminação em ambientes iluminados somente com luz artificial passem a ser iluminados com a luz natural conduzida pelos cabos de fibra óptica, pode colaborar para a qualidade da luz para seus usuários e para a eficiência energética da edificação. A metodologia desenvolvida foi através de medições uma vez por semana, durante um ano, três vezes ao dia (às 9, 12 e 15 horas) comprovando a eficiência do equipamento na diversidade de situações impostas por intempéries. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade técnica e o bom desempenho do equipamento confirmando sua potencialidade de contribuição para a eficiência energética quando implantado. Este estudo contribuiu para a comunidade acadêmica por sua interdisciplinaridade e por apresentar avanço em conhecimentos técnicos e teóricos sobre o melhor aproveitamento da luz natural para obtenção de eficiência energética, tema de grande interesse frente a questões estéticas, ambientais e de saúde."

Palavras-chave: Fibra óptica. Eficiência energética. Coletor solar.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

ALINE GOUVÊA LEITE

Orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
Coorientador: Prof. Dr. Emiliano Rezende Martins

Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes

SÃO CARLOS – SP
2018

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

ALINE GOUVÊA LEITE

Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes

São Carlos
2018

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L533e

Leite, Aline Gouvêa
Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes / Aline Gouvêa Leite; orientador Javier Mazariegos Pablos; co orientador Emiliano Rezende Martins São Carlos 2018.
-- São Carlos, 2018.
167 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2018.

1. Iluminação com fibra óptica. 2. Eficiência Energética. 3. Coletor solar com fibra óptica. 4. Luz natural em ambientes sem iluminação direta. 5. Arquitetura. I. Mazariegos Pablos, Javier , orient. II. Rezende Martins São Carlos 2018, Emiliano, co orient. III. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

ALINE GOUVÊA LEITE

Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de Concentração: Arquitetura, Tecnologia e Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

Coorientador: Prof. Dr. Emiliano Rezende Martins

São Carlos
2018

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Aline Gouvêa Leite**

Título da tese: **"Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes".**

Data da defesa: **25/10/2018**

Orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

Comissão Julgadora:	Resultado:
Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos (IAU/USP)	APROVADA
Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles (IAU/USP)	APROVADA
Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri (IAU/USP)	APROVADO
Prof. Dr. José Dirceu Vollet Filho (UNESP)	APROVADA
Prof. Dr. Érico Masiero (DeCiv/UFSCar)	APROVADA

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

Sempre tive luz em meus caminhos.
E, agora, tenho mais certeza que é ela, a luz,
que me guia e me guiará sempre.

AGRADECIMENTOS

À minha maior inspiração, Murilinho, meu filho que tornou cada segundo de desafio em um momento de entusiasmo.

Ao meu marido, Murillo, pelo apoio e estímulo em todos os momentos.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me incentivando a crescer sempre.

Aos meus familiares, pelo apoio.

Ao tio Dalton (*in memoriam*), por tantas contribuições em minha vida.

Ao Gilberto (*in memoriam*), por ser um dos maiores incentivadores à minha carreira acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos, por ter aberto caminhos e me guiado como um verdadeiro Mestre.

Aos professores do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, pelo aprendizado.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Emiliano Martins, por seus valiosos ensinamentos e orientações.

Aos técnicos dos laboratórios, em especial Paulo Prataviera, José Renato Dibo, Sérgio Trevelin e Pedro Mattia. Sem eles não seria possível executar o experimento.

Aos funcionários do Instituto LACTEC, em especial Carlos Ademar Purim e Felipe Heuer que possibilitaram os testes com o Girassol® e dividiram comigo seus conhecimentos.

Ao professor Wilson Salloutti, que sempre me estimulou no conhecimento sobre a fibra óptica.

Ao amigo Victor Baldam, que me apoiou desde o início dessa minha jornada.

Às amigas Caroline Scapol e Fabiana Andresa, que me ajudaram durante todo o período do experimento

A todos que colaboraram de alguma forma para esse trabalho com conhecimento, apoio ou incentivo.

E a Deus, por ter tornado meu sonho possível e colocado tantas pessoas iluminando meu caminho.

Muito obrigada.

Todos nós carregamos uma luz infinita dentro da gente.
Você tem a opção de fazer que brilhe,
ou deixar o interruptor desligado.
A escolha é sua.
Só vive no escuro quem quer.
(autor desconhecido)

RESUMO

LEITE, Aline Gouvêa. **Estudo sobre a viabilidade e o desempenho de um coletor solar com transmissão de luz em fibra óptica para a iluminação natural em ambientes**. 2018. 167 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A iluminação dos espaços é observada há milênios, desde a utilização do fogo até as mais novas tecnologias em iluminação. Iluminar ambientes procurando, cada vez mais, a eficiência e a economia de energia vem sendo motivo de investigação constante dos pesquisadores. Atualmente, o grande problema enfrentado pela iluminação artificial é o custo da energia elétrica e por isso vários pesquisadores têm procurado soluções alternativas. O presente trabalho realizou um estudo sobre a viabilidade técnica e o desempenho de um equipamento (patenteado como Girassol®) que emprega a fibra óptica para iluminação natural em ambientes que não recebem luz direta, ainda no formato de um protótipo. O aspecto da sustentabilidade visando a economia de energia através da captação solar e condução da luz através dos cabos de fibra óptica até a célula-teste foi analisado. A questão principal a ser observada foi quão eficiente pode ser o sistema de iluminação com fibra óptica utilizando a captação de luz solar. Para isso foram feitos testes do equipamento em um ambiente previamente construído, denominado célula teste, com área aproximada de 4 m². Foi medida a quantidade de luminância e iluminâncias que chegam ao ambiente da célula-teste. Esta pesquisa visou conhecer a tecnologia atual existente no mercado comercial nacional e internacional e a tecnologia do equipamento desenvolvido no Brasil. A pesquisa considerou como a hipótese de que a correta captação de luz solar aliada à correta condução através dos cabos de fibra óptica, que permite com que a iluminação em ambientes iluminados somente com luz artificial passem a ser iluminados com a luz natural conduzida pelos cabos de fibra óptica, pode colaborar para a qualidade da luz para seus usuários e para a eficiência energética da edificação. A metodologia desenvolvida foi através de medições uma vez por semana, durante um ano, três vezes ao dia (às 9, 12 e 15 horas) comprovando a eficiência do equipamento na diversidade de situações impostas por intempéries. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade técnica e o bom desempenho do equipamento confirmando sua potencialidade de contribuição para a eficiência energética quando implantado. Este estudo contribuiu para a comunidade acadêmica por sua interdisciplinaridade e por apresentar avanço em conhecimentos técnicos e teóricos sobre o melhor aproveitamento da luz natural para obtenção de eficiência energética, tema de grande interesse frente a questões estéticas, ambientais e de saúde."

Palavras-chave: Fibra óptica. Eficiência energética. Coletor solar.

ABSTRACT

LEITE, Aline Gouvêa. **Study on the feasibility and performance of a solar collector with fiber optic light transmission for natural lighting in ambients**. 2018. 167 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The lighting of spaces has been observed for millennia, since the use of fire up the latest lighting technologies. Lighting environments increasingly looking for efficiency and energy being a reason for constant research of the researchers. Currently, the major problem faced by artificial lighting is the cost of electrical energy and that is why several researchers have sought solutions alternatives. The present work carried out a study on the viability technique and the performance of an equipment (patented as Girassol®) that fiber optics for natural lighting in receive direct light, still in the shape of a prototype. The sustainability to save energy through solar and conduction of light through fiber optic cables to the test cell It was analyzed. The main issue to note was how efficient can be the lighting system with fiber optics using the capture of sunlight. For this, equipment tests were performed in a previously constructed environment, called the test cell, with an approximate area of 4sqm. The amount of luminance and illuminances that reached the environment of the test cell. This research aimed to know the technology existing in the national and international commercial market and the equipment technology developed in Brazil. The research considered as the hypothesis that the correct capture of sunlight allied to the correct through fiber optic cables, which allows illuminated areas with only artificial light be illuminated with natural light led by fiber optic cables, can collaborate on the quality of light for its users and for the energy efficiency of the building. The methodology developed was through measurements once a week, for one year, three times (9 am, 12 pm, and 3 pm), demonstrating the efficiency of the equipment in the diversity of situations imposed by inclement weather. The obtained results proved the technical feasibility and good performance of the equipment confirming its potential contribution to efficiency when implanted. This study contributed to the its interdisciplinarity and to present advances in technicians and theorists about the best use of natural light to obtain energy efficiency, a subject of great interest in aesthetic, environmental and health matters.

Keywords: Fibre optics. Energy efficiency. Solar collector.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Base de lâmpada E27. 26
Figura 2 – Características da onda..... 29
Figura 3 – Frente e raio de onda plana 30
Figura 4 – Frente e raio de onda plana em representação plana 31
Figura 5 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética 32
Figura 6 – Representação do fenômeno da polarização 33
Figura 7: Tipos de reflexão..... 35
Figura 8 – A Lei da reflexão..... Figura 9 – Refração..... 35
Figura 10 – Reflexão e refração 36
Figura 11 – Representação dos fenômenos de reflexão e refração em três casos..... 37
Figura 12 – Representação do fenômeno de reflexão interna total..... 38
Figura 13 – Refração de luz emitida dentro da água 38
Figura 14 – Tipos de lentes 39
Figura 15 – Comportamento convergente..... Figura 16 – Comportamento divergente 40
Figura 17 – Esquema para explicar o funcionamento de uma Lente de Fresnel 40
Figura 18 – Espectro eletromagnético completo 41
Figura 19 – Dispersão da luz por um prisma formando o espectro colorido da luz visível 42
Figura 20 – Experimento de Colladon..... 43
Figura 21 – Raios de luz se propagando na fibra óptica..... 44
Figura 22 – Distribuição espectral da radiação solar..... 45
Figura 23 – Fluxo luminoso 47
Figura 24 – Representação de ângulo sólido 47
Figura 25 – Representação da intensidade luminosa de uma fonte de luz 48
Figura 26 – Representação da luminância..... 48
Figura 27 – Representação de luminância..... 49
Figura 28 – A diferença entre luminância e iluminância..... 50
Figura 29 – Temperatura de cor de acordo com a cor da fonte de luz artificial 51
Figura 30 – Modelos para céu claro, parcialmente encoberto e encoberto..... 60
Figura 31 – Fonte de iluminação e cabo de fibra óptica..... 66
Figura 32 – Exemplo de difusor 67
Figura 33 – Sistema Endlight 67
Figura 34 – Efeito “céu estrelado” com cristais lapidados 68
Figura 35 – Iluminação de piscina..... 68
Figura 36 – Sistema *side light* ou perimetral..... 69
Figura 37 – Cortina de fibra óptica em ambiente habitacional..... 69
Figura 38 – Cabo de fibra óptica com vários fios e encapamento transparente 70
Figura 39 – Luminária com chuva de luz..... 70
Figura 40 – Esquema de captação de luz solar conduzida através de fibra óptica 72
Figura 41 – Captação e distribuição de luz solar em edificação..... 72

Figura 42 – Quadro comparativo entre coletores com lentes Fresnel e espelho parabólico 75
Figura 43 – Condução da luz através do fenômeno da reflexão total 77
Figura 44 – Sistema Parans P3 80
Figura 45 – Esquema de funcionamento do sistema Parans 81
Figura 46 – Luminária L1 instalada 82
Figura 47 – Luminária L2 instalada 82
Figura 48 – Luminária L3 instalada 83
Figura 49 – Iluminação no interior de edifício comercial, Espanha..... 84
Figura 50 – Sala de conferências da Universidade de Lund, Suécia..... 84
Figura 51 – Inserção de luz natural em ambiente fechado de hospital na Suécia 85
Figura 52 – Sala de estudos na Universidade de Uppsala na Suécia..... 86
Figura 53 – *Spotlight* em escritório de arquitetura no Japão 86
Figura 54 – Iluminação em residência com efeito de claraboia no Reino Unido..... 87
Figura 55 – Iluminação em cozinha de residência na França..... 87
Figura 56 – Colimação dos raios na lente Fresnel..... 88
Figura 57 – Coletor solar Himawari..... 89
Figura 58 – Alinhamento do coletor solar com a luz do sol..... 89
Figura 59 – Sistema de iluminação solar Himawari..... 90
Figura 60 – Coletor modelo XD-50S/12AS 90
Figura 61 – Coletor modelo XD100/36AS..... 91
Figura 62 – Estrutura do cabo óptico 91
Figura 63 – Conexão dos cabos ópticos com as lentes..... 92
Figura 64 – Emissão da luz solar por cabo óptico..... 92
Figura 65 – *Downlight* ND..... Figura 66 – *Downlight* NA……. Figura 67 – *Spotlight* 93
Figura 68 – Himawari Terrace 93
Figura 69 – Projetos da Himawari em residências 94
Figura 70 – Projeto executado em residências 94
Figura 71 – Projeto executado em escritórios 95
Figura 72 – Coletor solar Himawari..... 95
Figura 73 – Projeto executado em escritório..... 96
Figura 74 – Projeto executado em escritório..... 96
Figura 75 – Hall subterrâneo na cidade de Oakya, Japão 96
Figura 76 – Prefeitura de Hiroshima, Japão 97
Figura 77 – Estacionamento no Metropolitan Highway em Tóquio, Japão 97
Figura 78 – Iluminação subterrânea em piscina..... 97
Figura 79 – Tanque de vida marinha em aquário..... 98
Figura 80 – Sistema esquemático de iluminação HSL..... 98
Figura 81 – Luminária híbrida GT8 99
Figura 82 – Elemento de dispersão da luz para saídas diretas do cabo óptico 99
Figura 83 – Coletor HSL..... 100
Figura 84 – Luminária HSL 100
Figura 85 – Instalação do sistema HSL..... 101

Figura 86 – Coletor solar instalado no NTRC 101
Figura 87 – Luminária híbrida instalada no NTRC 102
Figura 88 – Coletor solar Solros 104
Figura 89 – Luminária Solros 104
Figura 90 – Esquema de solução para radiação infravermelha e ultravioleta 108
Figura 91 – Ajuste do foco com cremalheira 109
Figura 92 – Esquema de montagem da fibra óptica no sistema de dissipação de calor 110
Figura 93 – Dissipador térmico..... Figura 94 – Ilustração do protótipo 2 110
Figura 95 – Direção do fluxo luminoso no protótipo 2 111
Figura 96 – Ponto de luz na entrada das fibras do protótipo 2 111
Figura 97 – Esquema de método de medida da iluminância 112
Figura 98 – Transmissão coroa-eixo sem fim 113
Figura 99 – Protótipo 3 114
Figura 100 – Conjunto de acoplamento óptico 114
Figura 101 – Inserção das fibras nos bujões 115
Figura 102 – Protótipo 3 115
Figura 103 – Modelagem da luminária 116
Figura 104 – Localização da área das células teste e da célula teste 11 120
Figura 105 – Célula teste 11 construída para instalação do equipamento 120
Figura 106 – Interior da célula teste 11 121
Figura 107 – Estrutura montada para a instalação do Girassol® 121
Figura 108 – Coletor solar Girassol® instalado na base de concreto em fase de calibração 122
Figura 109 – Detalhe dos cabos de fibra óptica acoplados ao coletor 122
Figura 110 – Espaço na célula teste para instalação da iluminária 123
Figura 111 – Luminária projetada pelo LACTEC para a instalação dos cabos de fibra óptica 123
Figura 112 – Instalação dos cabos de fibra óptica na luminária 123
Figura 113 – Luminária instalada na célula teste 11 124
Figura 114 – Esquema em planta baixa da instalação completa do Girassol® 124
Figura 115 – Espectrofotômetro USB2000 125
Figura 116 – Luminancímetro LS 100 125
Figura 117 – Luxímetro Panlux Electronic 2P 125
Figura 118 – Representação da parede em que foi projetada a luz 126
Figura 119 – Esquema do posicionamento dos pontos de medição na parede da célula teste na parede em que a luz foi projetada. 127
Figura 120 – Planta esquemática da célula teste 11 e da instalação do Girassol® 127
Figura 121 – Esquema da parede da célula teste 11 que foi projetada a luz com os pontos referenciais para a medição 127
Figura 122 – Vista da área iluminada 128
Figura 123 – Água acumulada nas lentes do coletor Girassol® 128
Figura 124 – Tambor utilizado para proteção do Girassol® 129
Figura 125 – Raios de luz sendo orientados para os pontos de fibra óptica 129

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação entre os comprimentos de onda de todas as lâmpadas, a luz natural e a luz natural transmitida pelo Girassol® 133
Gráfico 2 – Intensidade de luz x comprimento de onda de luz de iluminação solar direta (vermelho) e da iluminação após ter passado pelo Girassol® (azul) 134
Gráfico 3 - Média das várias captações de luz da lâmpada incandescente refletora Concentra Øsram 60 W – spot 135
Gráfico 4 – Média das várias captações de luz da lâmpada fluorescente compacta 23 W branca neutra Øsram 135
Gráfico 5 – Média das várias captações de luz lâmpada de LED 9-60 W clara fria Philips 6500 136
Gráfico 6 – Média das várias captações de luz lâmpada de LED 6 W branca fria Superled 60 Ourolux 136
Gráfico 7 – Média das várias captações de luz lâmpada fluorescente compacta econômica 18 W luz branca intensa – FLC 137
Gráfico 8 – Média das várias captações de luz lâmpada fluorescente compacta econômica 15 W luz branca – FLC 137
Gráfico 9 – Média das várias captações de luz lâmpada fluorescente compacta econômica 15 W – FLC – Luz morna 138
Gráfico 10 – Média das várias captações de luz natural solar sem passar pelo Girassol® 138
Gráfico 11 – Média das várias captações de luz natural solar transmitida pelo Girassol® 139
Gráfico 12 – Comparação do espectro de luz da Lâmpada incandescente refletora Concentra Øsram 60 W – spot com a luz solar natural emitida pelo sol 139
Gráfico 13 – Comparação entre os comprimentos de ondas das lâmpadas fluorescentes e a luz solar natural 140
Gráfico 14 – Comparação entre os comprimentos de ondas das lâmpadas de LED e a luz solar natural 141
Gráfico 15 – Experimento LUMENS: (9h/12h/15h) × Valores Fixos 142
Gráfico 16 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALOES FIXOS: CENTRO 145
Gráfico 17 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 35cm 146
Gráfico 18 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 70cm 147
Gráfico 19 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 98cm 148
Gráfico 20 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: CENTRO 150
Gráfico 21 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: CENTRO 151
Gráfico 22 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 70cm 152
Gráfico 23 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 98cm 153
Gráfico 24 – Experimento LUX: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: CENTRO 155
Gráfico 25 – Experimento LUX: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 35cm 156
Gráfico 26 – Experimento LUX: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 70cm 157
Gráfico 27 – Experimento Lux: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 98cm 158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de eficiência energética 24
Tabela 2 – Planejamento dos ambientes, tarefas e atividades com a especificação da luminância, limitação de ofuscamento e qualidade da cor 53
Tabela 3: Especificações do coletor Parans 79
Tabela 4 – Comparativo entre os modelos de coletor solar Himawari 91
Tabela 5 – Emissão da luz solar por cabo óptico com base em uma iluminância de 98.000 lux 92
Tabela 6 – Quadro comparativo das tecnologias apresentadas 103
Tabela 7 – Comparativo de fluxo por metro por fibra 117
Tabela 8 – Comparativo de equipamentos em lumens 117
Tabela 9 – Comparativo com lâmpada comercial 117
Tabela 10 – Resultados do experimento com fontes de luz artificiais e medição em lumens 131
Tabela 11 – Resultados do experimento com fontes de luz artificiais e medição em lux nos mesmos pontos onde serão feitas as medições com o Girassol® 131

SUMÁRIO

RESUMO 8
ABSTRACT 9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES 10
LISTA DE GRÁFICOS 13
LISTA DE TABELAS 14
1 INTRODUÇÃO 17
1.1 JUSTIFICATIVA DO PROJETO DE PESQUISA 20
1.2 OBJETIVOS 21
2 REVISÃO DE LITERATURA 22
2.1 HISTÓRIA DA ILUMINAÇÃO 22
2.1.1 Iluminação a gás 22
2.1.2 Iluminação elétrica 22
2.1.2.1 Lâmpadas incandescentes 23
2.1.2.2 Lâmpadas halógenas 24
2.1.2.3 Lâmpadas fluorescentes 25
2.1.2.4 LED 26
2.2 PROPRIEDADES DA LUZ 27
2.2.1 Parâmetros físicos 27
2.2.2 Propagação da luz em meio ópticos 34
2.2.2.1 Propagação da luz: reflexão e refração 34
2.2.2.2 Lentes 39
2.2.2.3 Fibra óptica (guia de onda) 42
2.3 CARACTERÍSTICAS LUMINOTÉCNICAS 45
2.3.1 Normas de iluminação 51
2.4 A LUZ NOS AMBIENTES 57
2.4.1 A luz solar 57
2.4.2 Iluminação artificial 60
2.5 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO COM FIBRA ÓPTICA 62
2.5.1 Sistema de iluminação com fibra óptica e fonte de luz artificial 66
2.5.2 Sistema de iluminação com fibra óptica e fonte de luz natural 71
2.5.3 Tecnologias disponíveis no mercado 75
2.5.3.1 PARANS 75
2.5.3.2 Himawari 88
2.5.3.3 HSL 98
2.5.3.4 Girassol® – protótipo desenvolvido no Brasil 107
3 METODOLOGIA 119
4 RESULTADOS E ANÁLISE 132

4.1 EXPERIMENTO COM ESPECTROFOTÔMETRO USB 2000 132
4.2 EXPERIMENTO COM LUMINANCÍMETRO 141
4.3 EXPERIMENTO COM LUXÍMETRO 143
5 CONSIDERAÇÕES 160
6 CONCLUSÃO 162
REFERÊNCIAS 163

1 INTRODUÇÃO

A luz é uma onda eletromagnética que conduz a energia irradiada diretamente pelo sol juntamente com outras ondas da mesma natureza. Somente a luz visível, pequena parte irradiada do espectro solar, é capaz de produzir sensações visuais nos seres humanos, influenciando-os em suas atividades, dependendo da forma como é aplicada no ambiente. A luz, por este motivo é a parte mais relevante desta pesquisa.

Para Schmid (2006), o conhecimento dos profissionais das áreas das engenharias e da arquitetura complementa o projeto de iluminação para que se adeque melhor à composição do ambiente. A luz projetada nos ambientes internos tem que propiciar claridade suficiente para atender às necessidades da visão do ser humano no local onde desenvolve suas atividades. Além da claridade, a luz natural oferece outras características para o bem-estar do ser humano e sua saúde como, por exemplo, a interferência no humor de acordo com os comprimentos de onda a que está submetido o ser humano, a síntese da vitamina D, a produção de melatonina (maior durante o sono), estado de alerta e vigília entre outros (WEBB, 2006). Estas características específicas a diferenciam da luz artificial. De acordo com o Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energia – IDAE (2005, p. 19) "a luz é uma referência temporal que provoca estímulos e interferências tanto no comportamento biológico quanto no psicológico".

O ser humano precisa da luz natural para controlar o relógio biológico que influencia o ciclo circadiano, período de aproximadamente 24 horas nas quais se completam as funções do organismo.

O ciclo circadiano depende da percepção do corpo aos sinais sensoriais percebidos pelos olhos e pela temperatura da pele para distinguir os horários do dia e da noite. A luz natural é a responsável por essas percepções sendo fundamental para a correta regularização de tal ciclo. A luz natural também regula os ritmos fisiológicos do corpo humano como: níveis hormonais, digestão, sono, crescimento e outros (CAMPOS, 2011).

A falta da luz natural direta é prejudicial ao ser humano. Sem o contato contínuo e constante com a luz natural direta (com suas variações de tonalidade e intensidade), o ciclo circadiano, por não perceber o horário da atividade (dia claro) e o horário do descanso (noite), fica prejudicado (CAMPOS, 2011). Por esse motivo, é importante pesquisar fontes de iluminação com características espectrais semelhantes às da luz solar, para que em ambientes onde não haja iluminação natural direta, ainda se possa perceber o passar das horas durante o dia.

Na pesquisa vencedora do prêmio Nobel de medicina de 2017, os americanos Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash e Michael W. Young foram premiados por comprovarem mecanismos moleculares dos seres humanos influenciados pelo ciclo circadiano (BAIMA, 2017). Os cientistas comprovaram que sua função principal é preparar o corpo para os acontecimentos vindouros (amanhecer e anoitecer). Anteriormente, pensava-se que o ser humano era apenas reativo aos estímulos externos. Com as pesquisas dos cientistas americanos comprovou-se que o relógio biológico controla e influencia na qualidade de vida. Segundo estas pesquisas, a influência da luz no funcionamento correto do ciclo circadiano é fundamental. É a única referência física para o corpo humano identificar e se preparar para o momento de descanso, o sono, principal responsável pela recomposição do corpo humano. Baima (2017) considera mais importante a preparação do corpo para reagir a uma circunstância do que simplesmente a reação involuntária diante da situação. O ciclo circadiano só consegue encontrar um equilíbrio saudável para o corpo humano com a luz natural (FREITAS, 2017). Sem esse controle o corpo humano não consegue se manter em equilíbrio. Um ser humano enclausurado, sem acesso à luz do dia, perde a regulação do ciclo circadiano, não conseguindo mais reproduzir ciclos constantes de 24 horas.

A desregulação do ciclo circadiano promove também problemas psicológicos. Os seres humanos são capazes de perceber a quantidade e a qualidade da luz natural que varia durante o dia. Essa percepção influencia nas suas emoções e no seu comportamento. O ser humano, que não tem contato direto com a luz natural durante sua rotina de trabalho, tende a ter mais problemas com sono e fadiga, além da redução de sua motivação e capacidade de trabalho (IDAE, 2005). Assim, é importante a utilização da luz natural nos ambientes de trabalho de uma forma adequada. Segundo o Instituto, essa influência é tão importante, que tem levado os fabricantes de lâmpadas a aperfeiçoá-las, com características cada vez mais semelhantes à luz natural e com possibilidade de reciclagem.

Farias e Sellito (2011) desenvolveram um estudo que analisa o estudo da energia ao longo da história, o seu crescente consumo e as possibilidades de uso da luz solar para minimizar os danos causados pelo excesso do consumo de energia elétrica, tanto no uso da iluminação direta como os usos possíveis de serem desenvolvidos na condução da luz natural. Esta necessidade de gerar iluminação de maneira eficiente e renovável tem motivado intensa pesquisa em várias áreas como nos mostra os artigos de Pérez-Lombard et al. (2008), Dubois e Blomsterberg (2011), Allcott e Greenstone (2012) e Nardelli et al. ([s.d.]). Atualmente, em todos os continentes há cientistas buscando inovações que promovem o fornecimento desta energia a partir de fontes renováveis. A luz do sol, como fonte de iluminação direta ou através

de mecanismos que a utilizem, é alvo de investigação em todo o planeta. Eis a confirmação em Campos (2011) quando afirma que a luz natural do sol é a fonte de luz adequada ao organismo humano. A energia irradiada pelo sol através de ondas eletromagnéticas é distribuída de três formas: uma parte incide diretamente na superfície da Terra aquecendo-a e permitindo a existência da vida no planeta; outra parte é refletida pela atmosfera e retorna ao espaço, e, uma terceira parte chega à superfície terrestre de forma difusa devido a obstáculos encontrados no caminho: nuvem, água. Outros trabalhos como os de Wang et al. (2010), Sapia (2013) e Vu e Shin (2016), também comprovam como a pesquisa do uso da luz do sol para iluminação direta tem sido tema de pesquisa.

O calor que o sol emite em direção à Terra produz o aquecimento necessário à existência da vida no planeta e promove a formação de padrões climáticos diversificados, como o aquecimento dos mares e a formação de correntes oceânicas.

Em um ano, a radiação solar que chega à Terra e pode ser transformada em energia elétrica é cerca de 35 vezes maior do que a energia produzida pelas reservas mundiais de petróleo, carvão, gás natural e urânio somadas (LUIZ, 2013). A energia da luz solar recebida pela Terra chega a ser cerca de 5 mil vezes maior do que o consumo mundial de eletricidade e energia térmica somados. Em um ano, o sol é capaz de produzir quatro vezes a quantidade de energia que a humanidade consome. Seriam necessárias 10 bilhões de Hidrelétricas como a de Itaipu para produzir a mesma quantidade de energia. Outro exemplo comparativo é que cada metro quadrado da Terra recebe do sol 1.400 watts (energia/segundo), o equivalente a 14 lâmpadas de 100 watts (LUIZ, 2013). Da energia consumida no Brasil, no âmbito residencial, 14% é consumida pela iluminação (BASTOS, 2011). Estes dados fundamentam esta pesquisa que propõe a substituição da fonte de iluminação tradicional por fontes alternativas. O uso de lâmpadas mais econômicas colaborou com a economia de energia, mas não é suficiente por não oferecer todas as características da luz natural necessários à saúde do ser humano.

Considerando a luz natural como primordial para a iluminação de espaços ocupados pelos seres humanos, este trabalho propõe o estudo da eficácia de um equipamento denominado Girassol®: um protótipo de coletor solar com transmissão da luz através de fibras ópticas para ambientes sem iluminação natural direta. O Girassol® é composto por um conjunto de sete lentes, com mecanismo de movimentação automático ao longo do dia, que as mantêm sempre perpendiculares aos raios solares. Cada uma das lentes concentra a luz visível na extremidade de um cabo de fibra óptica plástica de 1 mm de diâmetro e comprimento de 10 metros. Com essa proposta, a luz é transmitida para o ambiente interno através dos cabos desta fibra óptica. Este protótipo foi desenvolvido pelos Institutos Lactec para a empresa de energia Enel do estado

do Rio de Janeiro utilizando recursos do Programa de P&D Aneel regulamentados pela Lei nº 9.991/2000.

Esta pesquisa apresenta, no capítulo dois, a revisão bibliográfica com um resumo da história da iluminação com foco na eficiência energética. Também são apresentadas características físicas da luz e seus comportamentos. A luz é analisada dentro dos parâmetros luminotécnicos atuais. A seguir são apresentadas as fontes de energia natural e artificial com foco na luz solar e nas lâmpadas que serão utilizadas para análise comparativa com o Girassol®. A fibra óptica como condutor de luz é também estudada neste capítulo, levando-se em consideração sistemas de iluminação já existentes. No capítulo três há a exposição da metodologia do trabalho. Em seguida é apresentada a realização do experimento em campo e a análise dos seus resultados e conclusões.

1.1 JUSTIFICATIVA DO PROJETO DE PESQUISA

A luz solar vem se tornando cada vez mais valorizada devido à escassez de recursos naturais do planeta. Outras fontes de energia alternativa têm sido cada vez mais investigadas para se tentar amenizar os danos ambientais. A maioria dos estudos foca na conversão da luz solar em energia elétrica. Há uma lacuna no aproveitamento da luz solar diretamente em iluminação mesmo essa sendo a fonte de luz mais adequada ao organismo humano (CAMPOS, 2011).

A iluminação direta traz diversas vantagens, não apenas pela possibilidade de economia de energia elétrica, mas também por questões fisiológicas. Como já dito, a luz natural permite melhor desempenho em atividades visuais e maior conforto visual aos usuários. A interrupção da percepção do ciclo circadiano no ser humano produz efeitos prejudiciais à saúde como: doenças cardiovasculares, gastrointestinais e psicológicos (WEBB, 2006).

No contexto da arquitetura atual, a luz solar somente é aproveitada em ambientes com abertura direta para o exterior: janelas, claraboias e tetos solares. No entanto, nem sempre isto é possível, devido à densidade de construções e também porque nem todos os ambientes são contemplados com a luz natural direta. Além disso, há outros fatores que dificultam a iluminação direta como, por exemplo, o calor da radiação solar e o risco de ofuscamento no olho humano. Assim, mesmo quando as circunstâncias permitem a incidência da luz solar diretamente no ambiente, frequentemente recorre-se ao uso da iluminação artificial (GANSLANDT; HOFMANN, 1992).

Quando a luz solar chega às edificações somente através de suas aberturas, a variação de intensidade durante o dia é muito grande, como é grande também o desconforto. Além de gerar uma iluminação não uniforme (ULLAH; WHANG, 2015).

Com base nestes argumentos, esta pesquisa se propõe a testar um sistema capaz de utilizar os benefícios da iluminação solar natural. O Girassol® é uma promissora solução para iluminação de ambientes com luz natural pois é uma tecnologia que já é utilizada na Suécia, Estados Unidos e Japão. O potencial do Girassol® é o mesmo das demais tecnologias com a vantagem de poder ser desenvolvido e comercializado no Brasil. Os equipamentos desenvolvidos no exterior têm sua comercialização inviabilizada no Brasil devido ao alto custo da importação. Seu sistema consiste em um conjunto de lentes que capta a luz visível e a concentra em fibras ópticas para poder redistribuí-la de maneira controlada em ambientes fechados.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo principal:

- Verificar o desempenho e avaliar a viabilidade técnica do Girassol® em sua captação e transmissão da luz solar para um ambiente interno através da fibra óptica.

Objetivos específicos:

- Compreender o funcionamento do Girassol® e comparar seus resultados com os das lâmpadas propostas para análise em ambiente controlado nos índices de medição da iluminação no âmbito de lux, lúmen e emissão de comprimentos de onda no espectro visível da luz;
- Avaliar os resultados das lâmpadas propostas para comparação com os resultados do equipamento em ambiente controlado (célula teste) para verificar sua viabilidade e desempenho; e
- Comparar o Girassol® às tecnologias atuais semelhantes a ele (que ofereçam captação da iluminação natural através de coletor solar e condução da luz para o interior de ambientes através de cabos de fibra óptica) existentes no mercado seguindo parâmetros de medição de lux e lúmen.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRIA DA ILUMINAÇÃO

A luz artificial está presente na história da humanidade desde a época da condução de tochas para o interior das cavernas. Esta foi a primeira fonte de luz a ser controlada pelo homem, proporcionando claridade e calor aos ambientes. Com o tempo, chegou-se até a tecnologia de diodos[1] emissores de luz (*Light Emitting Diodes* – LED), visando sempre o conforto do ser humano e a economia de energia. Em edificações a falta de luz natural ou iluminação inadequada (seja natural ou artificial) tem sido foco de pesquisa na procura pelo bem-estar do homem e da economia no consumo de energia (FARIA, 2014). Neste capítulo, as principais tecnologias estudadas foram: iluminação a gás, lâmpadas incandescentes, halógenas, fluorescentes e LEDs.

2.1.1 Iluminação a gás

A iluminação a gás foi a primeira forma de iluminação artificial. Sobrepondo-se à iluminação com fogo, foi uma das grandes inovações para a história da civilização. A partir da invenção da iluminação artificial, a humanidade passou a ter mais horas tanto para se dedicar ao trabalho quanto ao lazer, não dependendo mais somente da luz natural. No início do século XIX, foi primeiramente utilizada para iluminação pública nas ruas. Em relação à iluminação à óleo, apresentava a vantagem de proporcionar iluminação mais intensa (a iluminação de um candelabro a gás equivalia à 12 velas). Além disso, a iluminação a gás trouxe outros benefícios como a regulagem da intensidade e a estabilidade nos fachos de luz. Em contrapartida, tinha cheiro desagradável e causava sonolência pela intoxicação com o gás. Produzia muita fuligem e era perigosa por causar explosões e incêndios (RONCAYOLO, 1999).

2.1.2 Iluminação elétrica

O crescimento na utilização da energia elétrica deve-se à facilidade e segurança em seu transporte. Nos países industrializados, seu consumo duplica a cada dez anos (GANSLANDT;

[1] O diodo é um material componente de um circuito elétrico capaz de conduzir corrente elétrica em um sentido único. Quando em condução, permite a passagem de energia e, dependendo do semicondutor utilizado, emite luz. Não é como as demais lâmpadas que necessitam de filamentos ou gases.

HOFMANN, 1992). Com o advento da eletricidade as possibilidades de iluminação se tornaram inúmeras com lâmpadas e luminárias de modelos diversificados. A lâmpada incandescente foi sendo aperfeiçoada, possibilitando o surgimento de novas tecnologias em iluminação. A evolução da lâmpada, entretanto, não se restringe à incandescente. Pelo contrário, hoje, existem diferentes fontes de luz artificiais. A seguir serão apresentadas algumas das lâmpadas mais relevantes em conformidade com a proposta desta pesquisa.

2.1.2.1 Lâmpadas incandescentes

A primeira lâmpada incandescente foi desenvolvida com fios de bambu carbonizados inseridos em um bulbo de vidro após a retirada de todo o ar do seu interior. Conectada a uma bateria, a lâmpada passou a ser utilizada para iluminação (BASTOS, 2011). As lâmpadas incandescentes possuem um filamento de tungstênio. A corrente elétrica passa por esse filamento e causa sua incandescência[2]. O aquecimento do filamento dentro do bulbo transforma parte da energia recebida em luz e a outra parte em energia térmica e em função desta dissipação do calor, a lâmpada incandescente foi utilizada em outras aplicações além da iluminação. A lâmpada de Thomas Edison foi a primeira a ser produzida em escala industrial, uma modernização na tecnologia de iluminação até então existente (SILVA, 2009).

Praticamente todos os filamentos evoluíram, sendo desenvolvidos com tungstênio e enrolados em forma de espiral, pois, dessa forma, diminui-se a perda de calor e aumenta-se a eficiência da lâmpada. Ainda assim, há uma grande dissipação de calor nesse tipo de lâmpada, o que configura desperdício de energia. O interior do bulbo, que inicialmente abrigava o filamento no vácuo, passa a ser preenchido com gases (argônio, nitrogênio ou criptônio) que auxiliam na eficiência da lâmpada, diminuindo ainda mais a transformação da energia em calor dissipado e aumentando a transformação de energia em luz (BASTOS, 2011).

As lâmpadas incandescentes comuns são as mais conhecidas, podendo ter os bulbos transparentes ou leitosos. Segundo especificação de alguns fabricantes e do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO (PBE), o tempo de vida útil médio de uma lâmpada incandescente é de 1.000 horas. Mesmo considerando o baixo custo aquisitivo dessa lâmpada, o custo final é alto em função da necessidade de manutenção constante (troca de lâmpadas frequentemente). Somente 5% do seu consumo de energia é transformado em luz visível

[2] Incandescência refere-se ao processo pelo qual luz é obtida termicamente. No caso das lâmpadas incandescentes, o filamento é aquecido com a passagem da corrente elétrica de forma que a energia elétrica se transforma em calor e luz.

(BASTOS, 2011). Entretanto, os estudos com as lâmpadas incandescentes evoluíram e foram criadas as lâmpadas halógenas. "Em 2008, o Deputado Federal Arnon Bezerra propôs o projeto de Lei nº 3.652 que proibiria a partir de janeiro de 2013, em todo país, a comercialização para uso em território nacional de lâmpadas incandescentes comuns de rosca Edson – E27." (BASTOS, 2011). Assim, as lâmpadas incandescentes foram retiradas do mercado gradualmente.

2.1.2.2 Lâmpadas halógenas

As lâmpadas halógenas são lâmpadas incandescentes com uma construção especial, visando evitar o escurecimento da lâmpada, aumentar a sua vida mediana e a sua eficiência luminosa. São feitas de quartzo em vez de vidro. Em seu interior, além dos gases tradicionais, é colocado um gás halógeno[3] que combinado com o filamento de tungstênio gera a luz. (LAMBERTS et al., 2004).

As lâmpadas halógenas foram desenvolvidas em diversos formatos e têm detalhes específicos que as diferenciam entre si. Além de melhorarem o desempenho da iluminação no ambiente residencial, também proporcionam o uso em outras aplicações: fachadas, áreas de lazer e outros (BASTOS, 2011).

As lâmpadas halógenas podem possuir refletores que absorvem parte da radiação infravermelha (que é transformada em calor) e refletem a luz visível, diminuindo o calor emitido para o ambiente. Mesmo tendo evoluído em relação às lâmpadas incandescentes tradicionais, as lâmpadas halógenas ainda apresentam baixa eficiência energética quando comparadas com outras tecnologias como, por exemplo, as lâmpadas fluorescentes (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparativo de eficiência energética

Tipo de Lâmpada	**Comum**	**Halógena**	**Fluorescente compacta**	**LED**
Comparação no consumo (Energia/Segundo) quando ligadas na mesma potência	40 W	25 W	8 W	4 W
	60 W	42 W	12 W	6 W
	75 W	53 W	15 W	8 W
	100 W	70 W	20 W	10 W
Durabilidade	1 ano	1 a 3 anos	6 a 10 anos	15 a 25 anos
Economia	x	até 30%	até 90%	até 95%

Em cada linha da tabela, a potência consumida refere-se proporcionalmente à luminosidade produzida. Por exemplo, uma lâmpada comum de 40 W possui a mesma luminosidade de uma lâmpada LED de 4 W.
Fonte: adaptada de Santos et al. (2015).

[3] São considerados gases halógenos os gases derivados dos elementos do grupo de halogênios da tabela periódica (flúor, cloro, bromo, iodo e astato).

2.1.2.3 Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes surgiram como forma de economizar energia. Apesar de o bulbo ter um maior custo em sua fabricação, a economia de energia compensa o maior custo do produto. A lâmpada fluorescente compacta foi desenvolvida, principalmente, para atingir o mercado residencial, procurando economia na substituição das lâmpadas incandescentes e halógenas.

O bulbo da lâmpada fluorescente recebe uma pintura interna com fósforo em sua composição. Em seu interior é colocado gás de mercúrio junto com outros gases. O mercúrio, ao ser aquecido pela passagem de corrente elétrica, vinda de um reator, provoca uma interação entre elétrons dentro do bulbo da lâmpada que origina a emissão de UV pelo gás, transformando-o em luz visível quando em contato com o fósforo utilizado na pintura da lâmpada (SANTOS, 2015).

Esse tipo de lâmpada pode reduzir em até 80% o consumo de energia em relação ao consumo da lâmpada incandescente, sem perda do nível de iluminação. Alguns modelos já possuem o reator incorporado e proporcionam grande economia, maior conforto visual (em relação ao olho humano) e vida útil mais longa.

Existem várias vantagens das lâmpadas fluorescentes sobre as incandescentes e halógenas, como: maior vida média em sua utilização e maior produção de luz com menos energia (Tabela 1). Também podem ter a base E27 (Figura 1), que é a base de lâmpada de rosca mais comumente utilizada. O inconveniente dessa fonte de luz no momento de seu descarte é que em seu interior há mercúrio, e este é considerado um material tóxico, acarretando a necessidade de implementação de um programa de coleta para que seus resíduos não contaminem os lençóis freáticos (PINTO, 2014).

Figura 1 – Base de lâmpada E27.

Fonte: Santos (2018), modificada pela autora.

Atualmente, as lâmpadas fluorescentes são muito utilizadas em residências em virtude da economia de energia. No entanto, por não existir um programa de coleta especial, em seu descarte, contraria os conceitos de sustentabilidade. Além disso, têm como desvantagem, o tempo de acendimento: normalmente levam de 30 s a 3 min para aquecer e produzir o máximo de luz para a qual a lâmpada foi projetada. Devido a estas questões, outras fontes de iluminação continuaram aparecendo no mercado, como o LED.

2.1.2.4 LED

O LED é um componente bipolar, possui dois polos: ânodo e cátodo que têm a propriedade de transformar energia elétrica em luz. A passagem de energia elétrica através desses dois polos gera a luz. A lâmpada de LED é fabricada com material semicondutor e por isso, quando é percorrido com energia elétrica, emite luz. Um benefício da lâmpada de LED é que a maior parte da energia gasta para seu funcionamento é transformada em luz, diminuindo a transformação a parte transformada em calor que aquece a lâmpada e assim aumentando a sua eficiência energética (SANTOS, 2015).

Há pouco tempo, eram utilizados apenas como sinalizadores devido à sua baixa intensidade luminosa. Com o desenvolvimento científico e tecnológico foi possível melhorar seu rendimento luminoso passando-se a utilizá-lo até para iluminação geral, especialmente depois que foi desenvolvido o LED branco. A grande vantagem dessa fonte de luz é

efetivamente sua economia de energia. Até hoje é a fonte de luz artificial mais econômica. (SANTOS, 2015).

Atualmente os modelos de lâmpadas de LED são semelhantes aos outros tipos de lâmpadas existentes no mercado, o que facilita a sua aceitação e sua comercialização. Além disso, elas ainda proporcionam novas possibilidades de design, graças à sua variedade de cores e à reduzida necessidade de manutenção, além de possibilitar a instalação em locais de difícil acesso.

Mesmo tendo a seu favor a economia de energia, as características de cada lâmpada dependem de sua fabricação, o que exige um alto controle de qualidade. Qualquer componente de sua composição que tenha um mínimo de alteração, resultará em uma cor diferente do padrão. Isso prejudica o projeto luminotécnico podendo incomodar a percepção do olho humano (SILVA, 2009).

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as lâmpadas apresentadas neste capítulo e estabelece uma relação entra a potência, durabilidade, luminosidade e economia de energia em cada tecnologia.

2.2 PROPRIEDADES DA LUZ

Por ser a luz uma onda eletromagnética, torna-se importante conhecer as teorias que a descrevem: a clássica e a quântica. A teoria quântica é a mais fundamental, mas, para este trabalho, por se tratar de um texto focado em iluminação, a teoria clássica é suficiente para a descrição de quase todos os fenômenos envolvidos, com exceção dos processos de emissão e absorção. O principal objetivo desta seção é apresentar um resumo das propriedades clássicas da luz relevantes para esta pesquisa. Apesar do enfoque ser na teoria clássica, alguns conceitos associados à teoria quântica, pertinentes para descrever os processos de absorção e emissão, também serão abordados.

2.2.1 Parâmetros físicos

Sendo a luz uma onda, a sua descrição clássica deve começar por considerações básicas de ondulatória. Uma onda é uma perturbação que oscila no espaço e no tempo. Existem vários tipos de ondas, mas praticamente todas as formas de ondas podem ser expressas como um somatório de ondas planas monocromáticas. Como ondas planas são mais simples, é conveniente focar a atenção nesse tipo específico de onda.

Uma onda, quando colocada em gráfico, apresenta quatro elementos básicos: a direção da propagação, o comprimento, a amplitude e a frequência. A direção é geralmente representada pelo eixo x. O comprimento é determinado pela distância entre dois pontos idênticos e sucessivos na onda. A amplitude é a distância entre o ponto médio da vibração e a crista (ou vale) da onda. A frequência é o número de repetições em que ocorre uma oscilação completa da onda por unidade de tempo

Uma onda plana monocromática ψ que se propaga na direção x positiva é expressa matematicamente por (equação 1),

$$\psi\,(x,t) = A\cos(\omega t - kx) \tag{1}$$

em que A é a amplitude da onda, ω é a frequência em radianos por segundo e k é a constante de propagação da onda. A Figura 2 ilustra a distribuição espacial de uma onda plana monocromática em um determinado instante de tempo. A constante de propagação depende do comprimento de onda. A expressão $\omega t - kx$ representa a fase da onda. Portanto, a diferença de fase entre dois pontos separados por um comprimento de onda é 2π. Assim, temos (equação 2),

$$\kappa\lambda = 2\pi \tag{2}$$

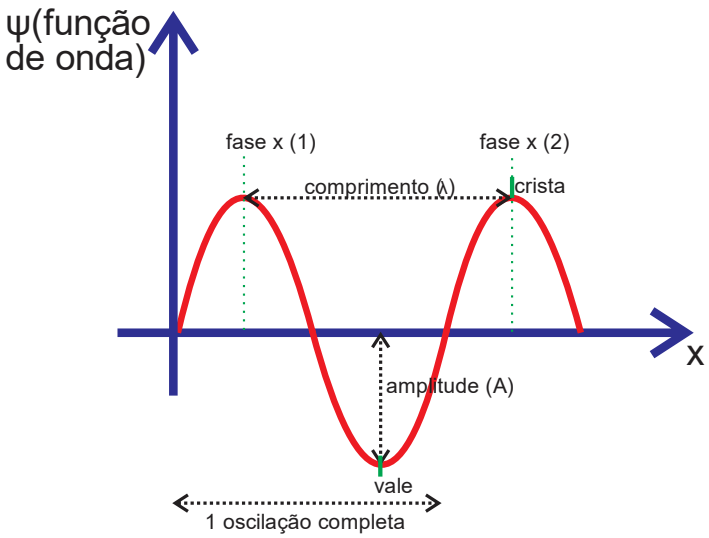
em que λ é o comprimento de onda.

O comprimento de onda da luz depende do meio no qual ela se propaga: quanto maior for o índice de refração do meio, menor será o comprimento de onda para uma mesma frequência. É conveniente expressar o comprimento de onda em um meio com índice de refração n em relação ao comprimento de onda no vácuo (para a mesma frequência). Assim, denotando o comprimento de onda no vácuo por λ_0, o comprimento de onda em um meio com índice de refração n será (equação 3)

$$\lambda = \lambda_{\circ}/n \tag{3}$$

Como exposto pela relação da equação 3, o índice de refração do vácuo é $n = 1$. A não ser que seja explicitamente mencionado, em outro contexto, o termo “comprimento de onda” será utilizado para denotar o comprimento de onda da luz no vácuo daqui em diante.

Figura 2 – Características da onda



Fonte: adaptada de Villas Boas (2012).

A frequência angular (ω) possui unidades de radianos por segundo (rad/s) e expressa a taxa de oscilação da onda em um ponto fixo do espaço. Mais especificamente considerando o intervalo de tempo necessário para uma oscilação completa em um ponto fixo do espaço como T, então ter-se-á f oscilações por segundo, onde (equação 4)

$$f = \frac{1}{T} \tag{4}$$

Este intervalo de tempo (T) é chamado de período da onda e é usualmente expresso em segundos. A frequência f possui unidades de Hertz ($1/s$) e está relacionada à frequência ω por (equação 5):

$$\omega = 2\pi f \tag{5}$$

Um parâmetro importante é a velocidade da onda. A velocidade é determinada pelo tempo em que uma fase demora para se deslocar na onda promovendo uma oscilação completa desta. Em termos matemáticos é determinada por (equação 6)

$$v = \frac{\omega}{k} = f\lambda \tag{6}$$

em que λ representa o comprimento de onda no meio em que se propaga. Como para uma mesma frequência o comprimento de onda depende do meio, fica aparente pela equação 6 que a velocidade de fase também depende do material. É conveniente expressar a velocidade de

fase em termos da velocidade de fase no vácuo. Denotando a velocidade de fase no vácuo como c, temos (equação 7):

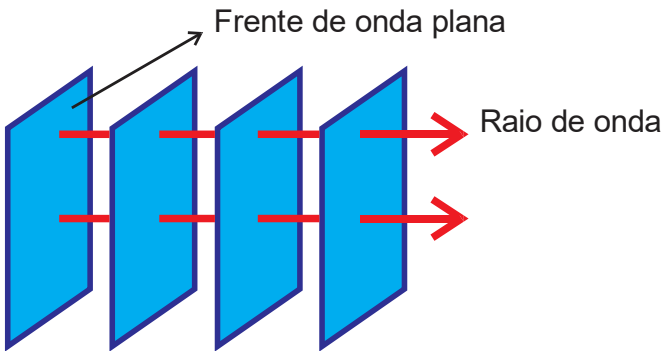
$$v = f\lambda = \frac{f\lambda 0}{n} = \frac{c}{n} \tag{7}$$

Assim, a velocidade da onda é dada pela relação entre a velocidade da onda no vácuo (c) e o índice de refração do meio onde a onda está se propagando (equação 7).

Portanto, a velocidade de fase é inversamente proporcional ao índice de refração. A velocidade de fase das ondas eletromagnéticas no vácuo é $c = 2{,}99792458 \times 10^8$ m/s. Portanto, a velocidade de propagação em qualquer outro meio é sempre com valor inferior.

Uma onda plana pode ser convenientemente representada por uma Frente de Onda. A frente de onda é uma região com fase fixa. Em uma onda plana essa região forma um plano. A frente de onda de uma onda plana é formada por planos perpendiculares ao eixo de propagação. Portanto, a direção de propagação da onda plana pode ser representada por raios perpendiculares à frente de onda, como ilustrado na Figura 3.

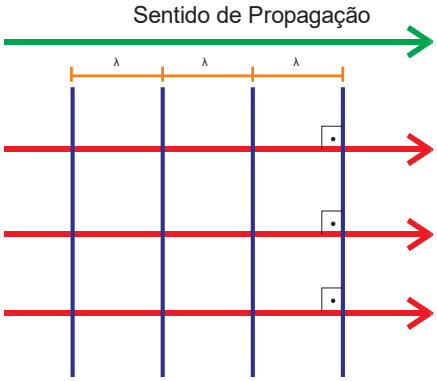
Figura 3 – Frente e raio de onda plana



Fonte: adaptada de Young e Freedman (2016).

Uma representação plana dessa imagem elucida o conceito e por sua simplicidade será utilizada adiante facilitando assim a compreensão do conteúdo deste estudo (Figura 4).

Figura 4 – Frente e raio de onda plana em representação plana



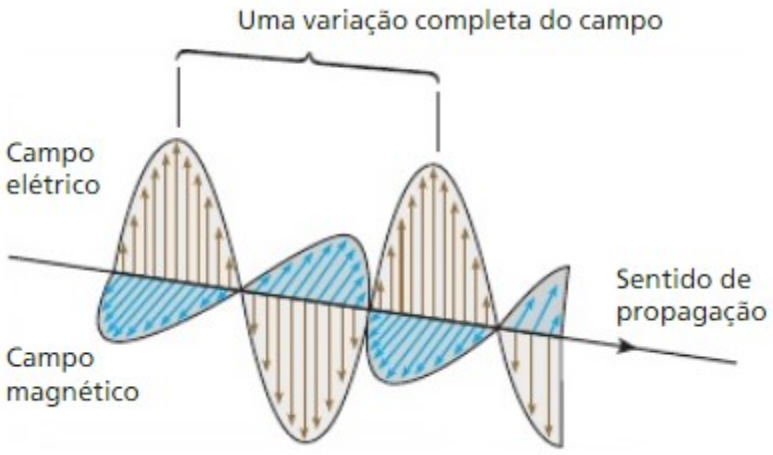
Fonte: adaptada de Villas Boas (2012).

A onda plana monocromática tratada na equação 1 é uma onda escalar. Ondas eletromagnéticas, entretanto, são ondas vetoriais. Este tópico trata de aspectos de ondulatória vetorial que são peculiares às ondas eletromagnéticas.

Toda a teoria clássica do eletromagnetismo está condensada nas Equações de Maxwell. De acordo com as equações de Maxwell, um campo magnético variável $\vec{B}$ funciona como fonte para um campo elétrico variável $\vec{E}$ e vice-versa. Assim, tornou-se possível concluir que uma onda eletromagnética é formada por um campo elétrico $\vec{E}$ e um campo magnético $\vec{B}$ que se sustentam mutuamente e que propagam no espaço. As ondas eletromagnéticas não precisam de um meio material para propagarem, elas podem propagar no vácuo.

Uma onda plana eletromagnética é descrita por três vetores: o vetor k define a direção de propagação da onda, o vetor E define a direção de oscilação do campo elétrico e o vetor B define a direção de oscilação do campo magnético. Entretanto, esses três vetores não são independentes. Os campos elétricos e magnéticos oscilam em um plano perpendicular ao vetor k e perpendiculares entre si. Portanto, para uma determinada direção de propagação, a direção de oscilação do campo elétrico (e magnético) pode ser descrita por dois vetores unitário, perpendiculares a k. A direção de oscilação de E e B define o estado de polarização da onda, mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética



Fonte: Villas Boas (2012, p. 366).

As equações que representam *E* e *B* são:

$$E_{(x,t)} = \hat{j}\ E_{máx} \cos(kx + \omega t) \text{ e } B_{(x,t)} = \hat{k}\ B_{máx} \cos(kx + \omega t)$$

em que

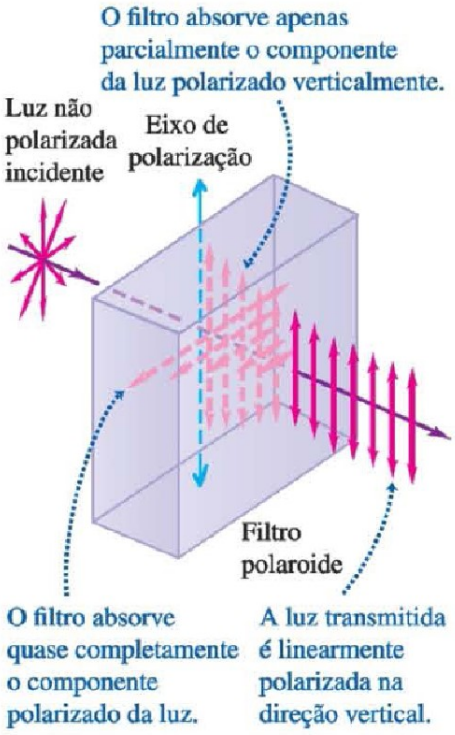
$E_{(x,t)}$ = vetor campo elétrico linearmente polarizado ao longo do eixo y;

$B_{(x,t)}$ = vetor campo magnético linearmente polarizado ao longo do eixo z; e

$\hat{j}$ e $\hat{k}$ = vetores unitários (vetor de módulo 1) que indicam a direção dos campos.

O fenômeno da polarização acontece quando é colocado um filtro polarizador (uma lente, por exemplo) interceptando a luz incidente. O filtro é responsável por filtrar a luz e permitir a passagem somente da luz que vibrar na mesma direção determinada pelo polarizador, como visto na Figura 6.

Figura 6 – Representação do fenômeno da polarização



Fonte: Young e Freedman (2016, p. 17).

As ondas eletromagnéticas transportam energia de uma região a outra. Os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são responsáveis por transportar essa energia em sua propagação. Esse transporte de energia pode ser definido como energia transferida por unidade de tempo e por unidade de área (potencia por unidade de área), considerando uma área perpendicular à direção do deslocamento da onda. A grandeza vetorial que descreve o módulo, a direção e o sentido desse fluxo de potência é chamado de Vetor de Poynting (equação 8):

$$S = \frac{1}{\mu 0}\ E\ x\ B\ (\frac{W}{m^2}) \tag{8}$$

em que

S é o vetor de fluxo de energia e μ0 a constante de permeabilidade magnética.

No vácuo,

$$\mu 0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}$$

em que

T = unidade do campo magnético o SI, tesla;

m = unidade de medida, metro;

A = unidade de corrente elétrica no SI, ampére; e

E × B - produto vetorial entre os vetores do campo elétrico e do campo magnético.

Como *E* e *B* são perpendiculares, o módulo de S é dado por (Equação 9):

$$S = \frac{EB}{\mu 0} \tag{9}$$

No sistema internacional de unidades, S é medido em J/s.m² ou W/s.m².

2.2.2 Propagação da luz em meio ópticos

Para esta proposta é necessária a compreensão de dois elementos: lentes e guias de onda. A lente, por ser responsável pela captação da luz solar até o início da guia de onda. E a guia de orientação de onda, no caso a fibra óptica, por ser responsável na condução da luz até o ambiente em que será analisada no experimento.

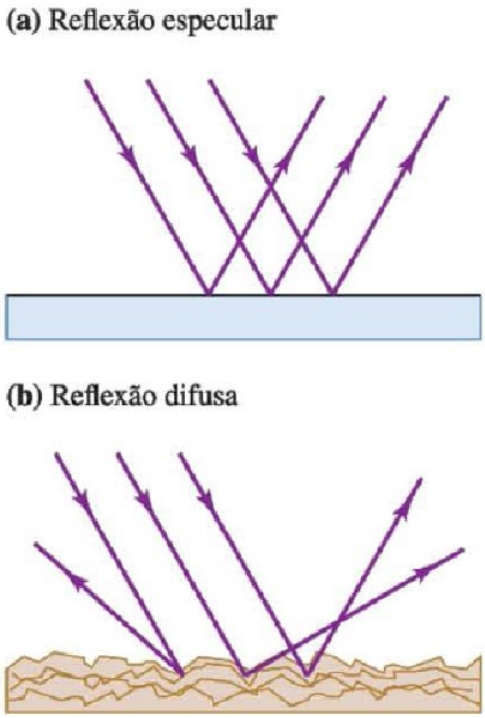
Para compreender esses elementos, é necessário conhecer dois fenômenos ópticos que explicam o funcionamento da lente e do guia de onda: reflexão e refração.

2.2.2.1 Propagação da luz: reflexão e refração

A maior parte das coisas que vemos não possui luz própria. Elas são possíveis de serem vistas porque reemitem a luz que recebem. Todo objeto iluminado por uma fonte de luz reflete, refrata e/ou absorve a mesma. Reflete a luz tornando possível ser visto, refrata a luz (quando transparente ou translúcido) e absorve (quando opaco) transformando a luz em energia térmica.

Reflexão da luz é o fenômeno que ocorre quando a luz retorna sua propagação para o meio de sua origem. A reflexão será especular ou difusa dependendo da superfície da incidência, como mostrado na Figura 7.

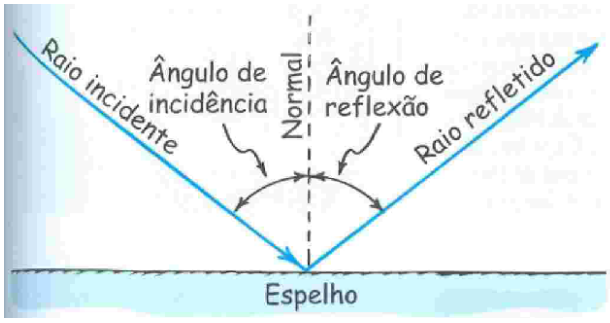
Figura 7 – Tipos de reflexão



Legenda: (a) reflexão especular; (b) reflexão difusa.
Fonte: Young e Freedman (2016, p. 5).

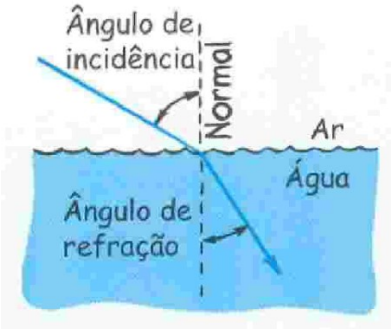
No caso de reflexão especular, o ângulo de incidência sempre é igual ao ângulo de reflexão, como visto na Figura 8. Refração da luz é o fenômeno que ocorre quando a luz muda de meio em sua propagação, como visto na Figura 9.

Figura 8 – A Lei da reflexão



Fonte: Hewitt (2015, p. 471).

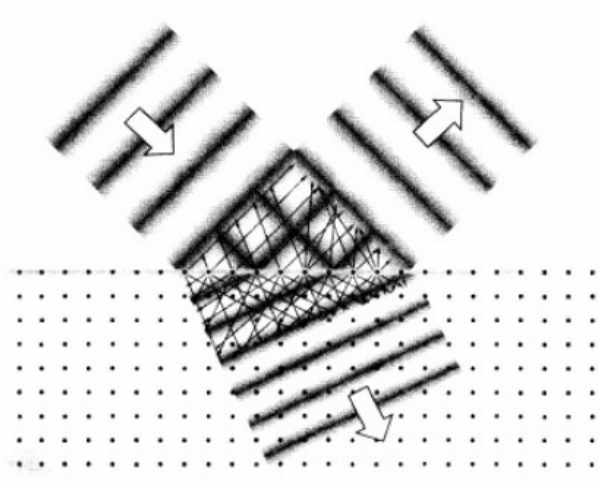
Figura 9 – Refração



Fonte: Hewitt (2015, p. 474).

Os fenômenos de reflexão e refração podem ocorrer simultaneamente, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Reflexão e refração



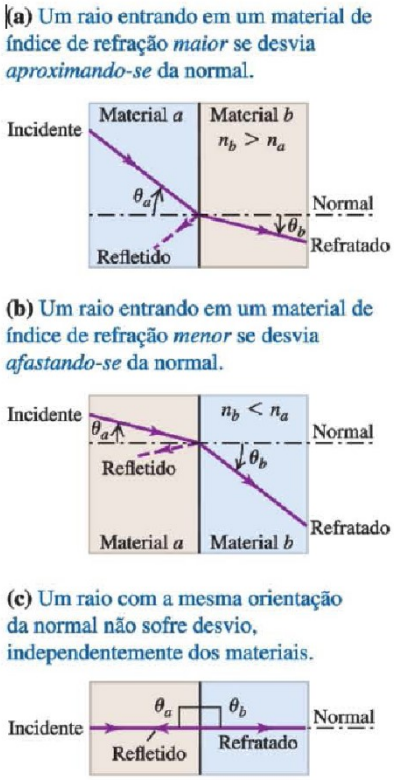
Um feixe de ondas de plano incidente sobre uma distribuição de moléculas que constituem um pedaço de vidro transparente ou plástico. Parte da luz incidente é refletida e parte é parcialmente refratada.
Fonte: Hecht (1999, p. 97).

No caso da refração é importante salientar a Lei de Snell, que estabelece que a razão entre os senos dos ângulos de incidência e de refração é igual ao inverso da razão entre os dois índices de refração dos meios de propagação envolvidos (equação 10).

$$\frac{sen\theta_{\mathrm{a}}}{sen\theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \rightarrow n_{\mathrm{a}}\, sen\theta_{\mathrm{a}} = n_b\, sen\theta_b \qquad (10)$$

A Figura 11 ilustra as condições da Lei de Snell em condições de variação dos índices de refração.

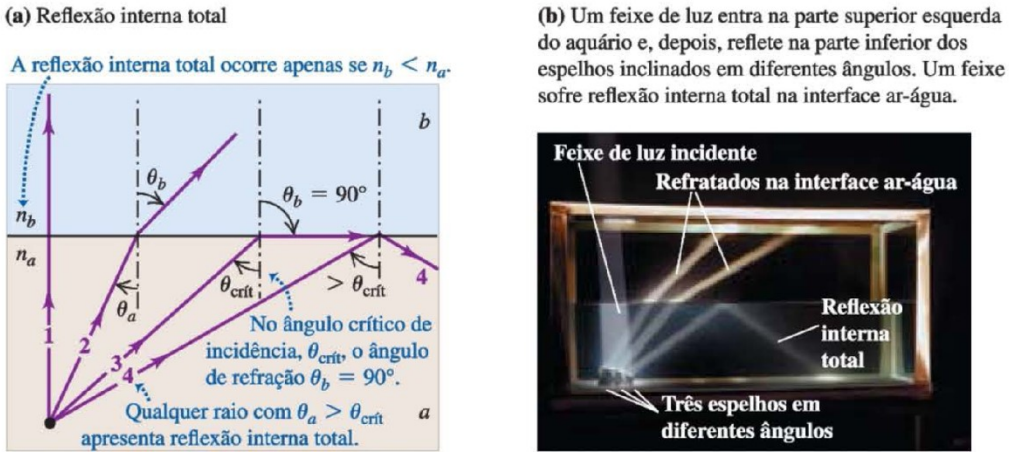
Figura 11 – Representação dos fenômenos de reflexão e refração em três casos



Legenda: (a) o material b possui índice de refração maior que o material a; (b) o material b possui índice de refração menor que o material a; (c) o raio luminoso incidente é normal à interface entre os materiais.
Fonte: Young e Freedman (2016, p. 6).

Para este trabalho é importante conhecer o fenômeno de reflexão interna total, que é utilizado adiante em guia de onda. A luz incidente é parcialmente refletida e parcialmente refratada na mudança de meio de propagação. No entanto, há a possibilidade de a luz ser totalmente refletida quando o índice de refração do meio incidente é maior que o índice de refração do segundo meio de propagação. Nesse caso, como mostra a Figura 12, quando o ângulo de incidência provoca um raio refratado que tangencia a superfície (formando um ângulo de 90º com a normal), significa que na incidência foi criado um ângulo crítico. Quanto maior for a aproximação do ângulo de incidência com o valor do ângulo crítico, menor será a refração.

Figura 12 – Representação do fenômeno de reflexão interna total



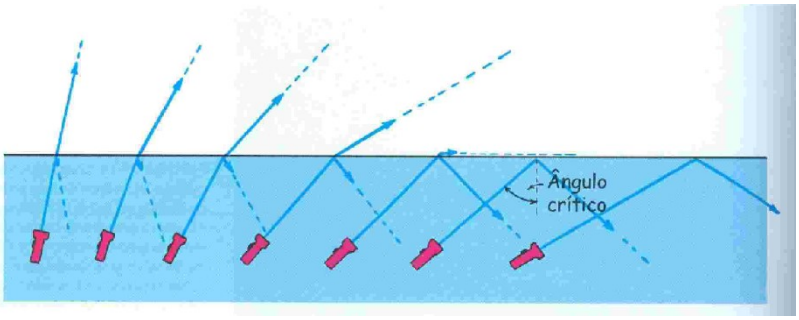
Fonte: Young e Freedman (2016, p. 10).

Aplicando a Lei de Snell obtém-se (equação 11):

$$sen\ \Theta b = \frac{n_a}{nb} sen\ \Theta_a \tag{11}$$

Como $\frac{n_a}{nb}$ é maior do que 1, *sen* Θb é maior que *sen* Θ_a. Assim, o raio é desviado e se afasta da normal. Logo, deve existir algum valor de Θ_2 menor do que 90º para que a Lei de Snell possa fornecer sen $\Theta_b = 1$ e $\Theta_b = 90º$. Na Figura 10, é possível observar isso no raio 3 mostrado no diagrama, que ao ser refratado tangencia a superfície entre os dois meios de propagação com um ângulo de refração de 90º. A situação pode ser vista na prática na Figura 13.

Figura 13 – Refração de luz emitida dentro da água

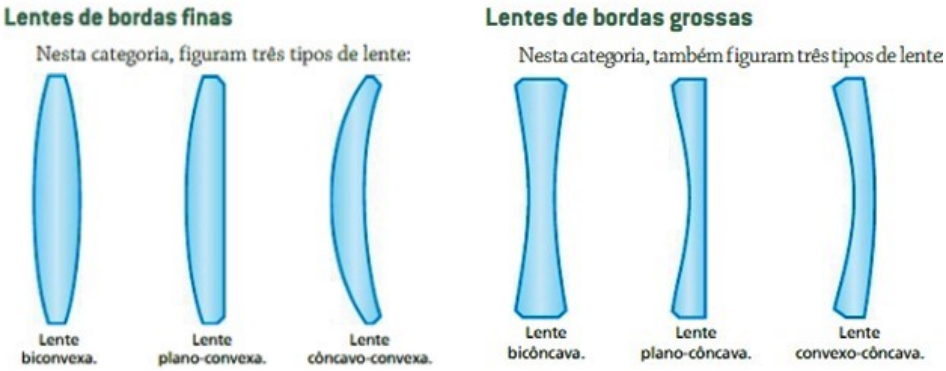


A luz emitida de dentro da água é parcialmente refratada e parcialmente refletida na superfície. O tracejado em azul indica a direção da propagação da luz e o comprimento das setas as proporções de luz refratada e refletida. Acima do ângulo crítico, o feixe é totalmente refletido para dentro.
Fonte: Hewitt (2015, p. 482).

2.2.2.2 Lentes

São denominadas lentes, determinados dispositivos ópticos com duas superfícies refratoras, sendo, pelo menos, uma delas curva (VILLAS BOAS, 2012). Existem lentes de bordas finas e de bordas espessas, vistas na Figura 14. São classificadas como convergentes ou divergentes, dependendo da forma como refratam os raios que nelas incidem. O comportamento das lentes varia se a lente é mais ou é menos refringente que o meio externo. Aqui, será adotada a situação em que a lente é sempre mais refringente que o meio externo, ou seja, o índice de refração da lente é maior que o índice de refração do meio.

Figura 14 – Tipos de lentes

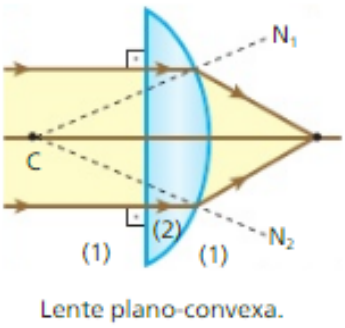


Fonte: adaptada de Villas Boas (2012, p. 412).

Nesta condição, as lentes convergentes se caracterizam por concentrarem os raios paralelos incidentes em sua superfície em um determinado ponto, mostrado na Figura 15. São mais espessas em sua parte central e mais finas nas extremidades. Na Figura 14 são as denominadas lentes de bordas finas.

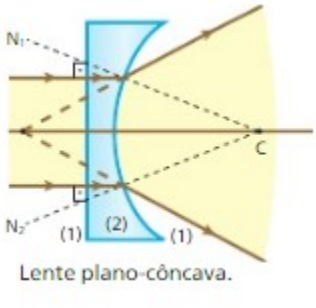
As lentes divergentes se caracterizam por dispersarem os raios paralelos incidentes em sua superfície, visto na Figura 15. São mais finas em sua parte central e mais espessas nas extremidades. Na Figura 16 são as denominadas lentes de bordas grossas.

Figura 15 – Comportamento convergente



Fonte: Villas Boas (2012, p. 413).

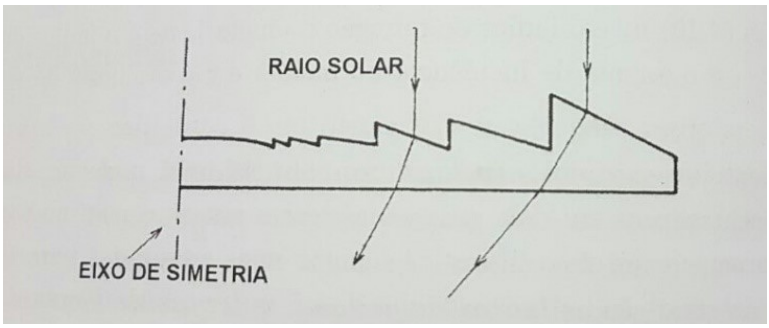
Figura 16 – Comportamento divergente



Fonte: Villas Boas (2012, p. 413).

Neste trabalho, a lente mais importante a ser estudada é a lente de Fresnell, pois foi a lente utilizada na construção do Girassol®. As lentes Fresnell são convergentes e construídas de forma a criar segmentos de curvatura e corte alinhados. Seu efeito óptico é como de lentes convergentes tradicionais. São consideradas mais leves e mais baratas. Sua performance pode ser explicada pelo seu formato. Como indicado na Figura 17, o lado inferior de uma lente Fresnell é um plano contínuo, enquanto a parte superior é serrilhada.

Figura 17 – Esquema para explicar o funcionamento de uma Lente de Fresnel

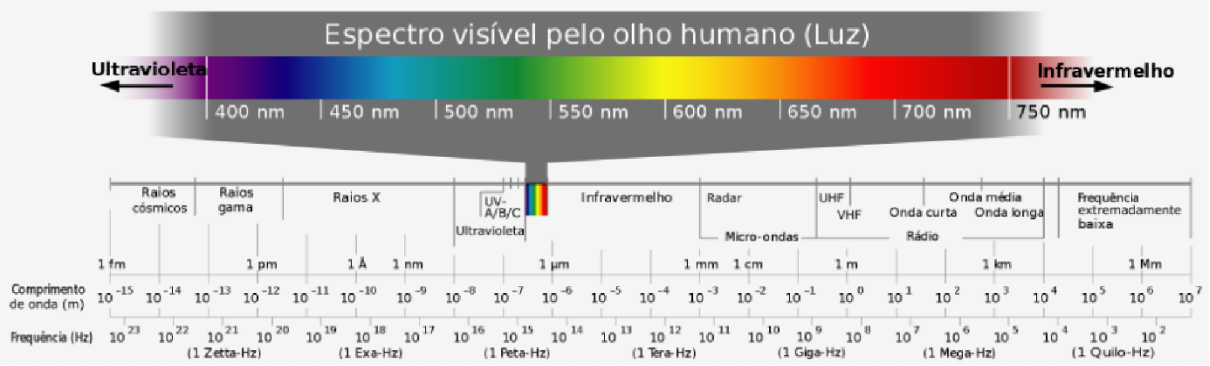


Fonte: Luiz (2013, p. 166).

Na Figura 17 são indicados dois raios que convergem para o centro da lente. Os ângulos entre cada segmento de corte e curva devem ser calculados aplicando a Lei de Snell para que todos os raios incidentes consigam convergir para um mesmo ponto. O tamanho da lente também influencia no seu comportamento. As lentes podem ser fabricadas em vidro ou plásticos (policarbonato) tendo, cada uma, suas vantagens e desvantagens. A lente em vidro tem maior durabilidade e não é danificada pelos raios UV. Já a lente em policarbonato é mais leve e o custo da fabricação é menor.

Nesse contexto é importante conhecer o fenômeno de dispersão na luz invisível, objeto de estudo deste trabalho. O espectro visível, a luz branca, é composta pela superposição de todas as ondas que compõem esse trecho do espectro eletromagnético, mostrado na Figura 18[4].

Figura 18 – Espectro eletromagnético completo



Fonte: disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel. Acesso em 23 nov. 2017.

A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os comprimentos de onda, mas em qualquer outro meio é variável. O fenômeno de dispersão demonstra como a velocidade da onda e o índice de refração variam de acordo com o comprimento de onda. Como (equação 12):

$$\lambda = \lambda_{\circ}/n \tag{12}$$

em que

λ = comprimento de onda no meio;

$\lambda_{\circ}$ = comprimento de onda no vácuo; e

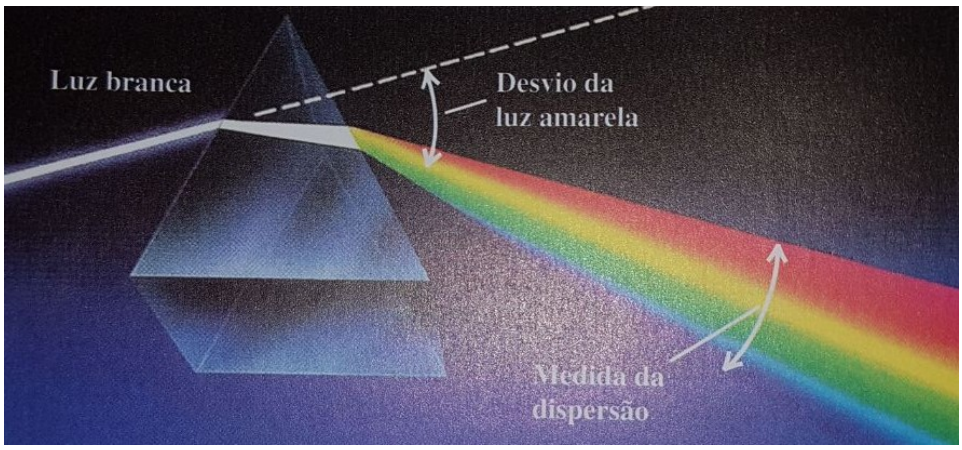
n = índice de refração. Assim, pode-se concluir que quanto maior o índice de refração, menor o comprimento de onda.

A Figura 19 mostra um feixe de luz branca incidindo sobre um prisma. A mudança de direção dos raios, ocasionada pelo prisma, aumenta de acordo com o aumento do índice de

[4] NT1 – Espectro eletromagnético é composto por toda radiação emitida pelo sol, através das ondas eletromagnéticas. A luz visível é uma pequena parte deste espectro. As radiações infravermelhas são responsáveis pela sensação de calor quando nos expomos ao sol. Ao serem reproduzidas em lâmpadas (com resistores aquecidos, normalmente), têm aplicações na medicina para ativamento de circulação, na indústria, para secagem de tintas e lacas, no lar, para aquecimento dos ambientes. As radiações ultravioletas são caracterizadas por elevada ação química que ataca tintas, vernizes e plásticos. Dependendo do comprimento de onda dessa radiação, pode ser maléfica à vida humana, provocando o câncer de pele. Um exemplo de uso que não prejudica o ser humano é sua utilização como luz negra. Nos bancos, também é utilizada para identificar o papel moeda. Importante ressaltar que todos os comprimentos de onda contidos no espectro eletromagnético, excetuando a luz visível, não são percebidos pelo olho humano.

refração e frequência e a diminuição do comprimento de onda. Assim, a luz violeta sofre maior desvio e a luz vermelha, o menor desvio. As demais variam entre esses dois extremos. Quando a luz branca sai do prisma, ocorre o fenômeno de dispersão, ou seja, as ondas que compõem a luz branca são separadas formando um espetro colorido.

Figura 19 – Dispersão da luz por um prisma formando o espectro colorido da luz visível



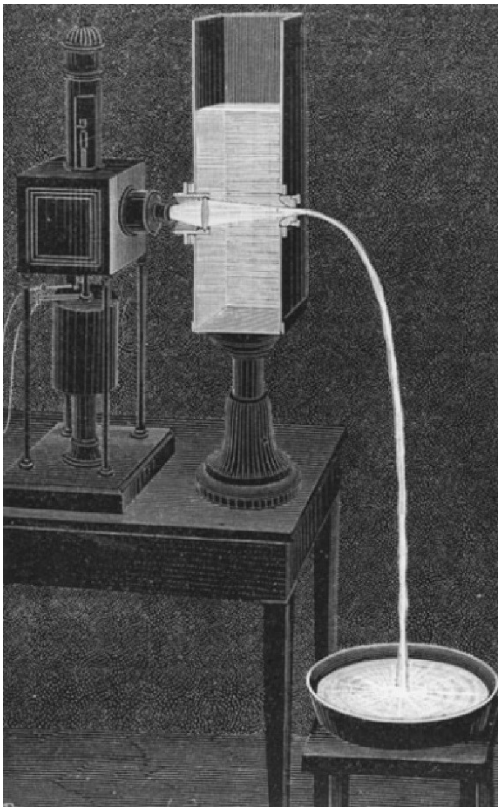
Fonte: Young e Freedman (2016, p. 13).

2.2.2.3 Fibra óptica (guia de onda)

A fibra óptica é classificada como guia de onda por ser capaz de conduzir luz de uma extremidade à outra. É um importante componente deste estudo por possibilitar a condução de luz natural para o interior de edificações após a captação feita pelos coletores.

Em 1941, um professor da Universidade de Genebra, Daniel Colladon, foi o responsável por demonstrar, pela primeira vez, como a luz poderia ser guiada. Em seu experimento, a luz solar foi captada e direcionada em tubo sobre uma mesa de palestras. Uma lente focalizou a luz através do reservatório de água e a conduziu ao longo de um jato de água. Foi possível observar a luz no jato de água e a explicação foi através do fenômeno da reflexão interna total. Quando os raios de luz atingiam a borda da água não refratavam para o ar, refletiam novamente para o jato de água. Assim, a luz seguiu o curso do jato de água, mostrado na Figura 20 (SALLOUTI, 2011).

Figura 20 – Experimento de Colladon



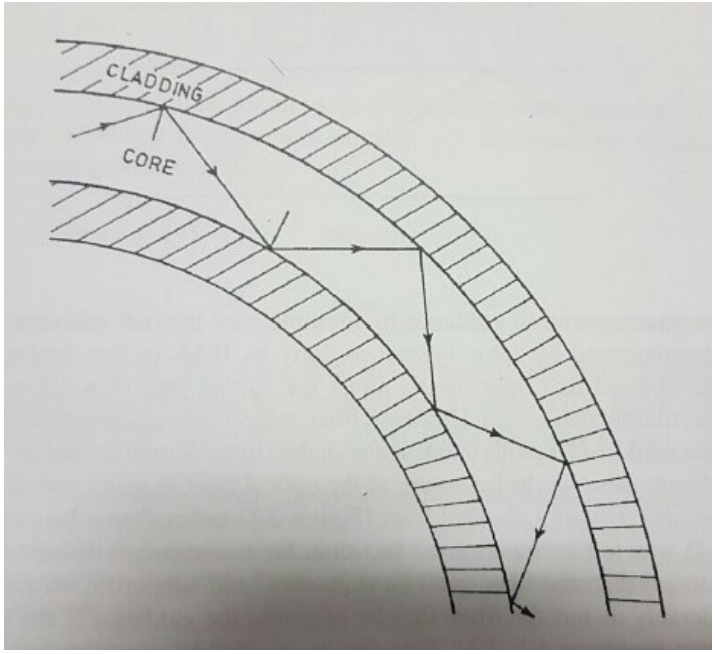
Fonte: Hecht (1999, p. 14).

Em 1870, John Tyndall reproduziu o experimento de Colladon e teve seu trabalho amplamente divulgado. Ele utilizou um recipiente de água com duas perfurações em sua base. Em uma ele inseriu um feixe de luz. Na outra, a água era jorrada em direção a uma bacia. Por meio das reflexões internas totais a luz acompanhou o trajeto da água.

Com base nesse estudo, o físico indiano Narinder Singh Kanpany conduziu novos experimentos que o levaram ao invento das fibras ópticas modernas, com um índice de refração ideal à realização do ângulo crítico, e assim à perfeição do fenômeno da reflexão interna total (Figura 19).

A fibra óptica é um filamento fabricado em vidro ou materiais poliméricos que têm a capacidade de conduzir ondas eletromagnéticas (como a luz), as quais, através das reflexões sucessivas percorrem toda a extensão da fibra, como visto na Figura 21.

Figura 21 – Raios de luz se propagando na fibra óptica



Observe que o ângulo crítico criado na reflexão dento da fibra permanece constante em todas as reflexões. Em alguns momentos é possível uma pequena variação do ângulo, permitindo uma pequena refração do raio.
Fonte: Ghatak (2010, p. 30).

Como mostra a Figura 21, a condução ideal de uma onda eletromagnética acontece quando, em todo percurso da fibra, o ângulo crítico permanece constante. Como esse fenômeno pode não ocorrer de forma perfeita em alguns momentos, parte da energia é refratada ocasionando uma pequena perda no percurso da onda.

A comunicação feita através de sinais luminosos não é privilégio deste século. Desde as épocas mais remotas, o homem procura aproveitar as fontes luminosas existentes para conseguir se comunicar a longas distâncias. Na antiguidade utilizava-se a luz do sol, manipulação de sinais de fumaça, espelhos ou outros objetos para reflexão da luz solar e assim transportar informações de forma rápida de um lugar para outro.

Nestes sistemas, as distâncias de transmissão eram limitadas pela capacidade dos receptores ópticos que na verdade eram os olhos humanos. Na ausência do sol, ou seja, à noite, o fogo transportado por tochas substituíam a luz. Havia uma vantagem sobre o sol, pois à noite, a luz das tochas podia ser vista a distâncias maiores. Por exemplo, os gregos do século VI a.C. utilizavam sinais de fogo que eram repetidos por estações (humanas) ligando a Ásia Menor a Argos, para comunicar a queda de Tróia (MALDONADO; MATOS, 2003).

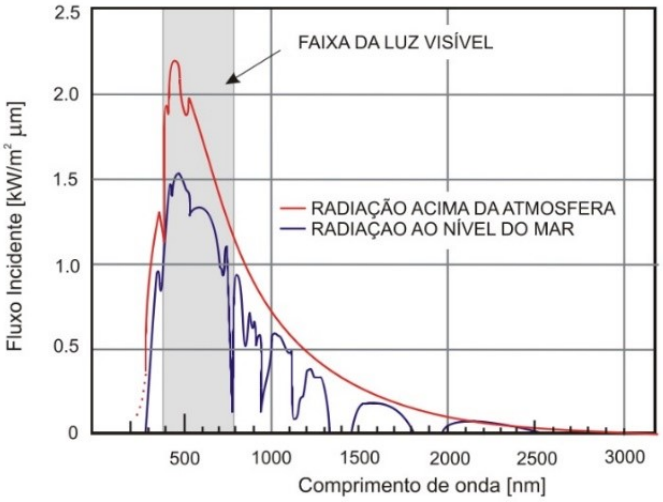
A fibra óptica foi inventada para ser aplicada, inicialmente, na medicina, pelo Dr. Nainder Singh Kapany (HECHT, 1999). Posteriormente, o físico chinês Charles Kao a utilizou

para transmissão de dados através de ondas eletromagnéticas. Esta utilização, também aplicada na telefonia, é a mais conhecida. No entanto, seu princípio básico é a condutibilidade de luz, ou seja, sua capacidade de conduzir a luz. No sistema utilizado para iluminação a camada externa de cada fio óptico possui alto índice de reflexão (chegando à reflexão total), o que faz a luz ser conduzida de um ponto a outro com pouca perda no percurso. A grande vantagem dessa tecnologia é que ela utiliza uma fonte geradora de luz capaz de alimentar vários cabos condutores de fibra óptica. Isso significa que apenas com uma fonte de luz, é possível iluminar vários pontos gerando economia de energia e trazendo a grande vantagem de conduzir apenas a luz e não a energia elétrica (LUME ARQUITETURA, 2009). No item 2.5, a iluminação com fibra óptica será melhor explicada.

2.3 CARACTERÍSTICAS LUMINOTÉCNICAS

A radiação solar visível é a que tem maior fluxo de luz incidente (maior quantidade de radiação solar) que chega à superfície da Terra. Na Figura 22 é possível observar, de acordo com os comprimentos de onda, a quantidade de radiação que chega à superfície da Terra e a quantidade que chega à atmosfera Terrestre. Importante salientar que a linha azul representa os níveis de fluxo incidentes observados do mar.

Figura 22 – Distribuição espectral da radiação solar



Fonte: Purim (2008).

A intensidade da luz percebida pelo olho humano varia de acordo com o ambiente do entorno. Em ambiente escuro, a íris[5] do olho se abre tornando-se mais sensível à percepção. Em ambiente claro ela se fecha devido ao alto brilho recebido. A adaptação da íris ao ambiente é gradativa e varia de acordo com a sensibilidade de cada pessoa (PURIM, 2008).

Assim, a iluminação depende do sentido da visão, envolvendo, diretamente os sentidos do ser humano. Mesmo sendo possível a precisão na medição de luz, é importante considerar os aspectos de reação do ser humano. O estudo da iluminação combina fatores técnicos da ciência com o conforto visual dos usuários no ambiente (STEVENS, 1969). A percepção do olho humano está ligada diretamente às percepções do cérebro provocando, assim, sensações agradáveis ou não, diante da luz a que é submetido.

Por esse motivo, foi estabelecida uma padronização na medição da iluminação, considerando a quantidade de luz e a percepção do olho humano. O Sistema Internacional definiu grandezas e nomenclaturas para luminotecnia (estudo da luz). As definições podem ser encontradas na norma NBR ISO nº 8995/2013. Abaixo segue uma explicação de cada item segundo a norma:

- Fotometria: consiste em um conjunto de técnicas utilizadas para medir a quantidade ou intensidade de luz em um ambiente.
- Fluxo luminoso: determina a quantidade de luz emitida por uma fonte. Sua unidade poderia ser o watt (fluxo radiante), no entanto, não seria condizente com a quantidade de luz perceptível pelo olho humano. Por esse motivo, para poder dimensionar a quantidade de luz emitida por uma fonte e levando em consideração a sensibilidade do olho humano, foi criada a unidade de medida lúmen. O fluxo radiante de 1 W emitido no pico da sensibilidade espectral (na faixa fotópica a 555 nm) produz um fluxo luminoso de 683 lm. Veja figura 23. A fonte de luz produz fluxo luminoso em diversas direções. Para cálculo de iluminação é necessário definir qual fluxo luminoso está em análise. Na imagem, o fluxo escolhido está em laranja.

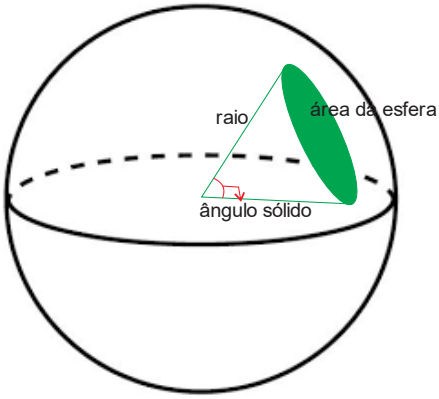
[5] Iris é a parte mais visível e colorida do olho. É responsável pelo controle da quantidade da luz que entra no olho. Suas características são individuais, não existindo um padrão para todo ser humano. Para elucidar, a pupila, que é a parte aberta do olho, responsável por permitir a entrada de luz, é controlada pela íris.

Figura 23 – Fluxo luminoso

Fonte: elaborado pela autora.

- Eficiência Luminosa: define a relação entre o fluxo luminoso de uma lâmpada em relação ao seu consumo de energia e, portanto, é expressa em lúmen por watt (lm/W). O valor máximo teoricamente alcançável quando a energia radiante total é transformada em luz visível é de 683 lm/W.
- Intensidade Luminosa: mede a luz irradiada em uma determinada direção. Sua unidade de medida é a candela[6]. A intensidade luminosa de uma área é definida pelo seu ângulo sólido (determinado pela relação de um setor de uma esfera e o raio) como mostra a Figura 24. O ângulo sólido é definido pela área do setor da esfera e o raio que o delimita. Sua medida é dada em esferorradiano[7].

Figura 24 – Representação de ângulo sólido



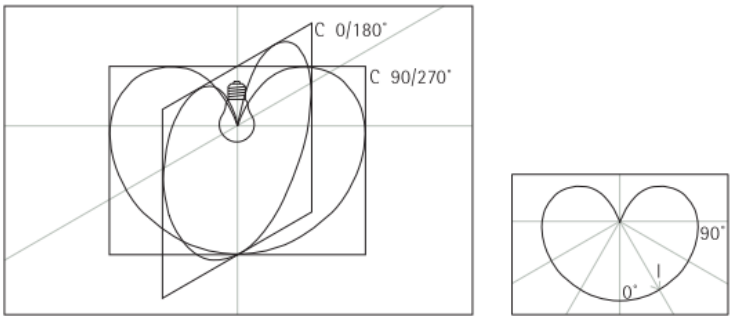
Fonte: elaborada pela autora.

[6] A candela é a unidade básica primária em tecnologia de iluminação. Todas as outras são derivadas dela. Foi originalmente definida pela intensidade luminosa de uma vela. Desde 1979 foi padronizado que uma candela representa uma fonte que emite uma radiação monocromática (verde, a qual o olho humano é mais sensível á percepção) de frequência 540.1012 Hertz e cuja intensidade energética naquela direção é 1/683 watt por esferorradiano (GANSLANDT; HOFMANN, 1992, p. 40).

[7] Segundo a ABNT NBR nº 5.461/1990 o ângulo sólido, tendo vértice no centro da esfera, subentende que na superfície da área da esfera relacionada ao ângulo sólido é igual ao quadrado do raio da esfera.

A distribuição da intensidade luminosa de uma fonte no espaço forma um gráfico em três dimensões. Uma sessão desse gráfico resulta na Curva de Distribuição de Intensidade Luminosa que representa o comportamento dos fachos de luz quando saem da fonte de iluminação (Figura 25).

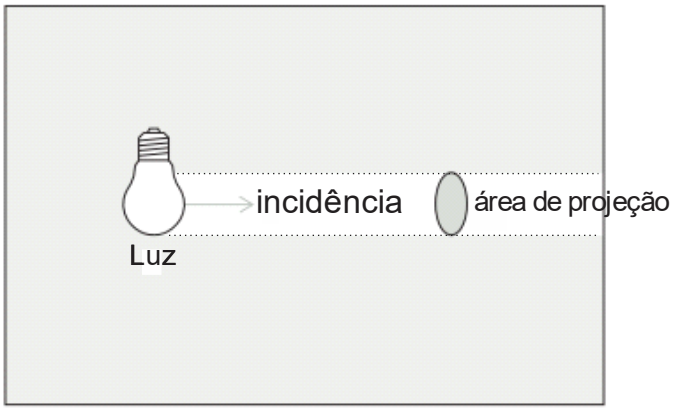
Figura 25 – Representação da intensidade luminosa de uma fonte de luz



Fonte: Ganslandt e Hofmann (1992, p. 41).

- Luminância: descreve o brilho de uma superfície iluminada, ou seja, indica a quantidade de luz refletida por uma superfície e percebida pelo olho humano. Sua unidade de medida é o lúmen, que representa a quantidade de candelas percebida por uma área quadrada. Veja a Figura 26.

Figura 26 – Representação da luminância

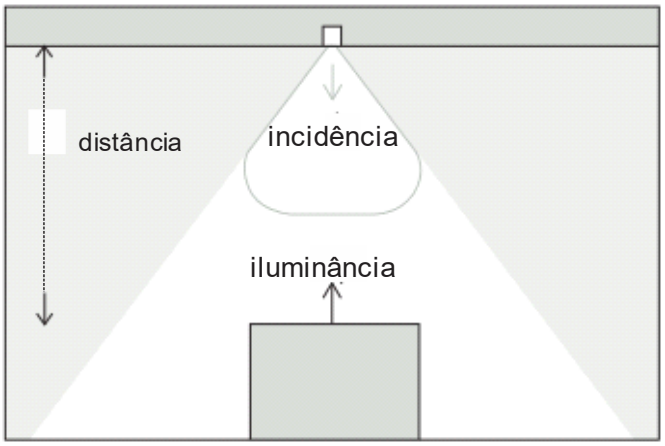


Fonte: Ganslandt e Hofmann (1992, p. 42), modificada pela autora.

- Luminancímetro: fotômetro que mede a luminância em um determinado ponto de uma determinada fonte de luz. A medida do luminancímetro é dada em lúmen.
- Iluminância: avalia a densidade do fluxo luminoso, indica a quantidade de fluxo luminoso proveniente de uma fonte de luz sobre uma determinada área. A iluminância não precisa

necessariamente estar relacionada a uma superfície real. Pode ser medida em qualquer ponto dentro de um espaço. Assim como o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente, a medição da iluminância também é medida pontualmente. Está relacionada com um padrão específico de medição de luz, o lux, $\frac{fluxo\ luminoso}{área\ (\frac{lúmen}{m^2})}$. Com base nesse parâmetro, as normas de iluminação foram elaboradas (NBR nº 5.461). Não é perceptível pelo olho humano (Figura 27).

Figura 27 – Representação de luminância



Fonte: Ganslandt e Hofmann (1992, p. 42), modificada pela autora

- Luxímetro: fotômetro que mede a iluminância em um determinado ponto, de uma determinada fonte de luz. A medida do luxímetro é dada em lux ($\frac{lúmen}{m^2}$).

Na Figura 28 é demonstrada a diferença entre Luminância e Iluminância.

Figura 28 – A diferença entre luminância e iluminância

Fonte: elaborado pela autora.

- Índice de Reprodução de Cor (IRC): informa o grau de fidelidade da cor quando em exposição à fonte de luz artificial tendo como referência a cor iluminada pela luz solar (NBR nº 5.461). Esse padrão de referência é dado em número percentual, sendo 100% a fonte de luz capaz de produzir a mesma cor que a luz solar. As lâmpadas consideradas boas na reprodução de cor são as que conseguem o mínimo de 80% de IRC.
- Temperatura de Cor: define a cor da luz emitida por uma fonte artificial. Como mostra a figura 28, a temperatura de cor nada tem a ver com o aquecimento da lâmpada. Quanto maior a temperatura de cor, mais azulada é a luz e quanto menor, mais avermelhada. A unidade de medida para temperatura de cor é o kelvin.

A luz natural tem relação direta com a temperatura de cor de uma fonte de luz, pois este parâmetro foi desenvolvido com base na variação da coloração da luz natural durante o dia, oscilando, principalmente, entre 3.000 e 6.500 k (ULLAH; WHANG, 2015, p. 7196) (Figura 29.

Figura 29 – Temperatura de cor de acordo com a cor da fonte de luz artificial

Fonte: adaptada de Silva (2004).

2.3.1 Normas de iluminação

Determinar a qualidade da iluminação promovida pelo Girassol®, em relação à outras lâmpadas, é o objetivo deste trabalho. A metodologia criada determinou parâmetros para que o Girassol® e outras lâmpadas disponíveis no mercado fossem submetidas às mesmas condições para medição da luminância.

A norma ABNT NBR nº 5.413 e, posteriormente, a norma NBR ISO nº 8.995/2013, estabelece os valores de iluminâncias médias mínimas em serviço para iluminação artificial em interiores onde se realizem atividade de comércio, indústria, ensino, esporte e outras. Esta norma estabelece que o nível de medida referente à distância da fonte de luz é de 0,75 m do piso. Isto significa que a distância entre a fonte de luz e o detector deve ser em torno de 2,00 m se a referência for o padrão atual de pé-direito em ambientes de trabalho, estudo, lazer e moradia. As iluminâncias ideais são determinadas de acordo com as tarefas visuais a serem exercidas no local, idade dos usuários e tipo de ambiente.

De acordo com a norma NBR nº 5.382/1985, as condições para determinação de iluminâncias exigem que existam vários pontos de iluminação no ambiente e que cada fonte de luz (lâmpada) tenha todos os valores influentes no resultado descrito (refletâncias, tipo de lâmpada...). Seguindo as orientações da norma é possível determinar a média de iluminância na área de acordo com as lâmpadas e luminárias utilizadas.

A norma ABNT nº 5.461/1990 define termos e aplicações relacionadas a radiações, visão, colorimetria, propriedades ópticas de materiais, medições, efeitos actínicos da radiação óptica, fontes de luz, componentes, lâmpadas e dispositivos auxiliares, luminotécnica, luminária e seus componentes e sinalização visual.

A norma NBR ISO nº 8.995/2013 foi um projeto de norma feito unindo as normas NBR nº 5.413/1992 e a NBR nº 5382/1985 e posteriormente regulamentada. Especifica os requisitos de iluminação para locais de trabalho internos e os requisitos para que as pessoas desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, com conforto e segurança, durante todo o período de

trabalho. Atualmente pode ser considerada a norma mais completa para projeto luminotécnico. Uniu normas de iluminação e ergonomia, somando um total de abrangência de 17 normas:

A ISO nº 3.864 *Safety colours and safety signs* que abrange:

- ISO nº 6.309 *Fire Protection – safety signs*;
- ISO nº 6.385 *Ergonomics principles in the design of work systems*;
- ISO nº 9.241 Parts 6/7/8 *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals*;
- CIE nº 13.3 – 1995 *Method of measuring and specifying colour rendering o light sources*;
- CIE nº 16 – 1970 *Daylight*; e
- CIE nº 17.4 – 1987 *International lighting vocabulary 4th ed. – equivalent to IEC 50(845)*.

A IEC nº 50 (845) corresponde a IEC nº 60.050-845 que abrange:

- CIE nº 19.2 – 1981 *An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*;
- CIE nº 40 – 1978 *Calculations for interior lighting – basic method*;
- CIE nº 58 – 1983 *Lighting for sports halls*;
- CIE nº 60 – 1984 *Vision and the visual display unit work station*;
- CIE nº 62 – 1984 *Lighting for swimming pools*;
- CIE nº 96 – 1992 *Electric light sources. States of the art – 1991*;
- CIE nº 97 – 1992 *Maintenance of indoor electric lighting systems*;
- CIE nº 103/5 – 1993 *The economics of interior lighting maintenance*;
- CIE nº 117 – 1995 *Discomfort glare in interior lighting*; e
- CIE nº 129 – 1998 *Guide for lighting of exterior work areas*.

Esta norma revisou e aumentou os termos técnicos; revisou e estabeleceu critérios para o projeto de iluminação determinando as iluminâncias para a área de trabalho e o entorno da mesma; manteve os critérios da norma ABNT NBR nº 5.413/1991 para o padrão das distâncias de medição entre o piso e o fotômetro; determinou padrões para evitar ofuscamento no ambiente; reforçou requisitos da norma ISO nº 3.864 quanto à temperatura de cor, que reflete na aparência da cor da luz; estabeleceu parâmetros para o planejamento da iluminação no

ambiente determinando os índices de iluminância, ofuscamento e reprodução de cor. A Tabela 2 mostra os itens mais relevantes para este trabalho.

Tabela 2 – Planejamento dos ambientes, tarefas e atividades com a especificação da luminância, limitação de ofuscamento e qualidade da cor

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\vec{E}m$ **lux**	**UGR**	R_a	**Observação**
1. Áreas gerais da edificação				
Saguão de entrada	100	22	60	
Sala de espera	200	22	80	
Áreas de circulação e corredores	100	28	40	Nas entradas e saídas, estabelecer uma zona de transição, a fim de evitar mudanças bruscas
Escadas, escadas rolantes e esteiras rolantes	150	25	40	
Rampas de carregamento	150	25	40	
Refeitório/Cantinas	200	22	80	
Salas de descanso	100	22	80	
Salas para exercícios físicos	300	22	80	
Vestiários, banheiros, toaletes	200	25	80	
Enfermaria	500	19	80	
Salas para atendimento médico	500	16	90	T_{cp} no mínimo 4.000 K
Estufas, salas dos disjuntores	200	25	60	
Correios, quadros de distribuição	500	19	80	
Depósito, estoques, câmara fria	100	25	60	200 lux, se forem continuamente ocupados
Expedição	300	25	60	
Estação de controle	150	22	60	200 lux se forem continuamente ocupados
2. Cabelereiros				
Cabelereiro	500	19	90	

(continua)

(continuação)

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\vec{E}m$ lux	UGR	R_a	Observações
3. 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	Recomenda-se que a iluminação seja controlável
Recepção	300	22	80	
4. Varejo				
Arquivos	200	25	80	
Área de vendas pequena	300	22	80	
Área de venda grande	500	22	80	
Área da caixa registradora	500	19	80	
Mesa do empacotador	500	19	80	
5. Restaurantes e hotéis				
Recepção/caixa/portaria	300	22	80	
Cozinha	500	22	80	
Restaurante, sala de jantar, sala de eventos	200	22	80	Recomenda-se que a iluminação seja projetada para criar ambiente íntimo
Restaurante *self-service*	200	22	80	
Bufê	300	22	80	
Salas de conferência	500	19	80	Recomenda-se que a iluminação seja controlável
Corredores	100	25	80	Durante o período da noite são aceitáveis baixos níveis de iluminação
6. Construções educacionais				
Brinquedoteca	300	19	80	
Berçário	300	19	80	
Sala dos professores do berçário	300	19	80	
Sala de aulas, salas de aulas particularess	300	19	80	Recomenda-se que a iluminaçao seja controlável
Salas de aulas noturnas, classes e educação de adultos	500	19	80	
Quadro negro	500	19	80	Prevenir reflexões especulares
Sala de leitura	500	19	80	Recomenda-se que a iluminação seja controlável
Mesa de demonstração	500	19	80	Em salas de leitura 750 lux
Salas de arte e artesanato	500	19	80	
Salas de arte em escolas de arte	750	19	90	$T_{cp} > 5000$ K
Salas de desenho técnico	750	16	80	
Salas de aplicação e laboratórios	500	19	80	

(continua)

(continuação)

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\vec{E}m$ lux	UGR	R_a	Observações
6. Construções educacionais				
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 prepaçao e oficinas	500	22	80	
Salas comuns de estudantes e salas de reunião	200	22	80	
Salas dos professores	300	22	80	
Salas de esportes, ginásios e piscinas	300	22	80	Para as instalações de acesso público, ver CIE nº 58 – 1983 e CIE nº 62 – 1984
7. Locais de assistência médica				
Salas de espera	200	22	80	Iluminância ao nível do piso
Corredores: durante o dia	200	22	80	Iluminância ao nível do piso
Corredores: durante a noite	50	2	80	Iluminância ao nível do piso
Quartos com claridade	200	22	80	Iluminância ao nível do piso
Escritório dos funcionários	500	19	80	
Sala dos funcionários	300	19	80	
Enfermarias				
- iluminação em geral	100	19	80	Iluminância ao nível do piso
- iluminação de leitura	300	19	80	
- exame simples	300	19	80	
Exames e tratamento	1.000	19	90	
Iluminação noturna, iluminação de observação	5	19	80	
Banheiros e toaletes para os pacientes	200	22	80	
Sala de exames em geral	500	19	90	
Exames de ouvido e olhos	1.000		90	Luminária para exame local
Leitura e teste da visão colorida com gráficos de visão	500	16	90	
Escâner com intensificadores de imagem e sistemas de televisão	500	19	80	
Salas de diálise	500	19	80	
Salas de dermatologia	500	19	90	
Salas de endoscopia	300	19	80	
Salas de gesso	500	19	80	
Banhos medicinais	300	19	80	
Massagem e radioterapia	300	19	80	
Salas pré-operatórias e salas de recuperação	500	19	90	
Sala de cirurgia	1.000	19	90	

(continua)

(continuação)

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\vec{E}m$ lux	UGR	R_a	Observações
7. Locais de assistência médica				
Cavidade cirúrgica	Especial			Em = 10.000 lux – 100.000 lux
UTI				
- iluminação geral	100	19	90	No nível do piso
- exame simples	300	19	90	No nível do leito
- exame e tratamento	1.000	19	90	No nível do leito
- observação noturna	20	19	90	
Dentistas				
- iluminação em geral	500	19	90	Convém que a iluminação seja isenta de ofuscamento para o paciente
- no paciente	1.000		90	Luminária para exame local
- cavidade cirúrgica	5.000		90	Valores maiores que 5.000 lux podem ser necessários
- branqueamento dos dentes	5.000		90	$T_{cp} \geq 6000$ K
Inspeção de cor (laboratórios)	1.000	19	90	$T_{cp} \geq 5000$ K
Sala de esterilização	300	22	80	
Salas de desinfecção	300	22	80	Salas de desinfecção
Salas de autópsia e necrotérios	500	19	80	Salas de autópsia e necrotérios
Mesa de autópsia e mesa de dissecação	5.000		90	

Fonte: adaptada de ABNT-NBR nº 8.995 (2013).

Essa norma também criou procedimentos para verificação da iluminação no ambiente determinando padrões nas medições e exemplificando conceitos e técnicas (esta parte foi explanada nos anexos da norma).

Há que levar em consideração que o meio influencia na reflexão da luz. Utilizando-se uma mesma fonte de luz, a quantidade de lux varia de acordo com as características do ambiente (cor e superfície). Isso significa que a quantidade de lux em um ambiente "escuro" é menor que a quantidade de lux em um ambiente "claro", mesmo que a fonte de iluminação seja a mesma. Esse fato ocorre porque o valor da iluminância depende dos valores de luminância no ambiente. Como a luminância é variável em função da quantidade de lumens que emite nas diversas direções, a iluminância também varia[8]. Por isso, a iluminância média (média feita em vários pontos do ambiente) varia de acordo com a luminância média.

[8] Influenciada pela variação de lumens.

O ser humano, ao enxergar um objeto, está na verdade, vendo-o através da luz que ele reflete. Por esse motivo não é possível enxergar no escuro. Isto demonstra que inclusive a cor dos objetos pode sofrer influência de acordo com a fonte de luz que recebe e reflete.

2.4 A LUZ NOS AMBIENTES

A compreensão da importância do equipamento Girassol® para levar luz solar aos ambientes é o objetivo deste tópico. Será estudada a luz solar considerando suas características e benefícios. Em um segundo momento, será feita uma análise da luz artificial das lâmpadas utilizadas no experimento e suas características.

A luz natural é muito mais importante para plantas, animais e pessoas do que sugere o senso comum. É imprescindível para a saúde e reprodução do ser humano.

A diferença entre luz natural e artificial é grande. A vitalidade do ser humano se perde na luz artificial. O desenvolvimento de tarefas em ambiente com luz artificial é inferior ao desenvolvimento em luz natural devido à interferência no ciclo circadiano. Por esse motivo é tão importante o contato com a luz natural. Sempre que possível devem-se desligar todas as luzes artificiais tanto dentro como fora da edificação, deixando-a para ser usada somente quando estritamente necessária.

2.4.1 A luz solar

O sol é a fonte de luz que emana energia para a Terra. Como já visto anteriormente, essa radiação é alterada à medida que se aproxima da superfície terrestre devido às reflexões e refrações que ocorrem na atmosfera. Parte do espectro eletromagnético que chega à superfície é chamado de luz visível e se caracteriza por ser o intervalo de ondas com comprimento entre 400nm e 700nm aproximadamente ao qual o olho humano é sensível (WEBB, 2006). A luz visível é percebida pela retina ocular proporcionando ao ser humano a visão, que processa imagens criando uma base de referências no cérebro (CAMPOS, 2011). É através de sua reflexão nos objetos que o ser humano é capaz de perceber formas e cores.

Alguns benefícios da luz solar já foram citados neste trabalho como, por exemplo, a regulação do ciclo circadiano. Outros estudos elucidam a importância da luz natural na totalidade do seu espectro.

A luz ideal para a visão é em torno de 555 nm. Por isso, a luz artificial procura reproduzir esta claridade nos ambientes. Todavia, há benefícios do espectro em outros comprimentos de

onda. Entre 446 e 488 nm, por exemplo, acontece uma melhor produção de hormônios (WEBB, 2006). Assim, a luz ideal para a visão não é, necessariamente, a ideal para outros efeitos necessários ao corpo humano.

Outra preocupação envolve trabalhos por turno. Foi identificado que as pessoas com atividade no turno noturno e, portanto, menos expostas à luz natural (pois dormem durante o dia) são mais propensas a sofrerem com problemas cardiovasculares, gastrointestinais e psicológicos. Em mulheres, o número de risco de câncer de seios e colo de útero aumenta significativamente (WEBB, 2006).

Foram feitos estudos que comprovaram que a luz do dia beneficia funções de cognição e bem-estar além de aumentar o nível de melatonina e cortisol, hormônios benéficos ao ser humano (WEBB, 2006).

Como visto, os benefícios da luz natural são grandes para o ser humano e têm sido negligenciados através dos tempos com o crescente uso da luz artificial.

Konis (2017), entendendo a necessidade da luz natural para os seres humanos, desenvolveu um estudo no qual procurou otimizar a luz natural nos edifícios criando parâmetros que ampliam os benefícios da luz natural além da iluminação para a visão. Segundo o autor, o International WELL Building Institute desenvolveu recentemente um sistema de certificação para edifícios com o objetivo de estabelecer parâmetros para um melhor desempenho das edificações nos benefícios que afetam a saúde e bem-estar do ser humano. Um dos parâmetros, por exemplo, intitulado “design de iluminação circadiana”, estabelece os níveis de iluminação que beneficiam o ciclo circadiano dos usuários da edificação. Em seu trabalho, o autor analisa os efeitos da luz, além da visibilidade, no ser humano, que beneficiam seu ciclo circadiano. Utilizando ferramentas de software, ele estabeleceu parâmetros para que a iluminação artificial pudesse colaborar com o bom funcionamento do ciclo circadiano. Seus resultados podem ser usados para identificar, quantificar e qualificar zonas de edifício em que, a longo prazo, a ocupação possa levar à interrupção do ciclo circadiano.

Edificações com um bom sistema de iluminação natural beneficiam o bem-estar e a saúde do ser humano. Além disso, a edificação se torna mais eficiente quanto ao uso de energia elétrica para iluminação e condicionamento de ar.

Considerando a importância da luz natural para beneficiar a saúde do ser humano, torna-se importante conhecer suas características físicas e seu comportamento desde a emissão solar até sua chegada na superfície terrestre.

A luz natural é uma fonte luminosa muito eficiente que cobre todo o espectro visível, proporciona uma reprodução de cores perfeita com variações de intensidade, cor e distribuição

de luminâncias uniforme. A disponibilidade e suas características dependem da latitude, meteorologia, época do ano e momento do dia. É composta por três componentes (IDAE, 2005):

- a luz direta do sol;
- a luz difundida na atmosfera: cria a iluminação difusa em função de reflexões em nuvens e outros elementos da atmosfera; e
- a luz refletida na superfície terrestre: proporciona a visibilidade de formas e cores.

A luz visível é uma fonte luminosa muito importante pois proporciona a visão das cores sem distorção em relação às suas variações de intensidade, tonalidade e à distribuição de luminâncias. É mais uniforme quando não encontra obstáculos (nuvens, árvores, ...).

Segundo a norma ABNT ISO nº 8.995, a luz natural é capaz de fornecer iluminação para execução de tarefas visuais em sua totalidade ou parcialmente. Varia em nível e composição espectral tornando variável a luz em ambientes internos. Ainda estabelece parâmetros de como devem ser as aberturas para existir uma boa iluminação natural no ambiente.

De acordo com Lamberts et al. (2010), sendo a radiação solar variável de acordo com o tempo, faz-se necessário compreender as formas de radiação e classificação do céu em função dela.

A radiação pode ser direta ou difusa dependendo das condições atmosféricas. A radiação direta é a fonte de luz mais intensa influente na edificação, principalmente, quanto à variação da intensidade térmica do ambiente. Já a radiação difusa acontece quando há nuvens no céu. Quanto mais nublado, maior o espalhamento da radiação com direção alterada por esses obstáculos. Assim, a radiação direta diminui, pois, uma completa a outra. A luz solar direta ilumina uma superfície normal com 60.000 a 100.000 lux (LAMBERTS et al., 2004). No entanto, esta luz pode ser trabalhada na edificação de forma a garantir o conforto térmico e lumínico. Já a luz difusa varia entre 5.000 a 20.000 lux e mesmo sendo mais baixa também requer atenção no projeto da edificação.

As radiações, mesmo quantificáveis, podem ter grande variação nas medições, mesmo em pequeno intervalo de tempo. Para resumir a classificação do céu, foram determinados modelos padrões, os quais são ilustrados na Figura 30:

- Céu limpo (claro): radiação direta é preponderante. O céu e a atmosfera são claros (melhor situação para a eficiência do Girassol®);
- Céu encoberto: o sol não é visível. A radiação é mais difusa e uniforme; e

- Céu parcialmente encoberto: radiação direta e difusa são proporcionais. É o modelo que representa a maioria dos dias do ano.

Figura 30 – Modelos para céu claro, parcialmente encoberto e encoberto

Fonte: Lamberts et al. (2004, p. 75).

Este parâmetro foi utilizado para definir e caracterizar o céu nos dias de medição, tanto utilizando os dados do INPE quanto a observação do mesmo no momento da medição. Ao utilizar o máximo da luz natural e aplicar a iluminação artificial somente quando necessário, o responsável pelo projeto alia conforto visual a consumo eficiente da energia elétrica necessária ao sistema de iluminação artificial.

2.4.2 Iluminação artificial

A iluminação artificial pode ser considerada uma ciência relativamente nova e são observadas inovações constantes e avanços rápidos nas novas tecnologias (PINTO, 2014).

A lâmpada é um artefato utilizado para a emissão de luz. A quantidade de luz que emite só pode ser obtida através de um procedimento em condições específicas. As lâmpadas elétricas têm grande variedade de tecnologias e formas.

Foram selecionadas sete lâmpadas disponíveis no mercado para futura comparação com os resultados do protótipo em análise. A escolha das lâmpadas foi feita através de pesquisa em lojas comerciais considerando as mais vendidas para o uso de interiores (com função semelhante à proposta do Girassol®). A pesquisa foi realizada em lojas em São Carlos, São Paulo e Juiz de Fora.

Ao estabelecer um comparativo com as lâmpadas, é importante considerar que a luz do sol é capaz de fornecer 1.000.000 lux em média nas regiões tropicais do planeta, com temperatura de cor em torno de 6.000 k ou mais. Pode ter o fluxo luminoso variando entre 5.000 a $1{,}5\times10^{9}$ lumens dependendo das condições do céu e da localização no planeta. O olho humano já se adaptou a essas grandes variações de luz fornecidas pelo sol (STEVENS, 1969).

A. Lâmpada Concentra SPOT Refletora de 60 watts ØSRAM. Classificada como incandescente, representa uma evolução da linha em função do tratamento espelhado do seu bulbo. Tem a vantagem de poder ser dimerizável e do grupo selecionado é a única com IRC de 100. Sua temperatura de cor é 2.700 k. Devido ao seu espelhamento, é indicada para iluminação de destaque pois proporciona fachos de luz. Possui um fluxo luminoso de 1.480 lumens (de acordo com o fabricante), devido à sua tecnologia (incandescente). Foi uma das últimas desta linha, comercializada. Atualmente, não é mais fabricada mas ainda representava número expressivo de vendas nas lojas no início deste trabalho iniciado em 2014.
B. Lâmpada Dulixstar – Mini-Twist fluorescente compacta 23 watts – branca neutra – OSRAM. As lâmpadas fluorescentes compactas têm sido cada vez mais aprimoradas para substituirem as incandescentes nas mais diversas situações devido à sua grande economia de energia. Com consumo de 23 W proporciona 1.480 lumens segundo o fabricante. Na cor branca neutra, tem 4.000 k de temperatura de cor. O bulbo tem formato em espiral no tamanho aproximado de uma incandescente comum e proporciona uma distribuição de luz uniforme. Sua potência corresponde a uma incandescente de 90 W.
C. Lâmpada Fluorescente Compacta Econômica 127V/18 watts – luz branca intensa – FLC. Outra marca que vem crescendo, segundo lojistas consultados em São Paulo, São Carlos e Juiz de Fora, é a FLC, que tem preço mais competitivo em comparação com suas concorrentes. Como a potência e a temperatura de cor são características importantes na iluminação, três modelos foram analisados, todos com IRC de 80% (modelo C, D e E). Neste modelo, a tonalidade da luz é branca intensa, com temperatura de cor 6400k. Segundo o fabricante, produz fluxo luminoso de 1080 lumens correspondendo a uma incandescente de 80 watts. Seu IRC é de 80%. A grande desvantagem destas é a presença de mercúrio em seu bulbo, tornando-se difícil seu descarte por prejudicar o meio ambiente.
D. Lâmpada Mini PLE/compacta econômica 127V/15 watts – luz branca – FLC. Este modelo também tem a tonalidade de luz branca intensa com 6400k de temperatura de cor. Seu fluxo luminoso é de 840 lumens correspondendo a uma incandescente de 60 W. Seu IRC também é de 80%.
E. Lâmpada Mini PLE/compacta econômica 127V/15 watts – luz morna – FLC. Este modelo tem tonalidade de luz morna, com 2.700 k de temperatura de cor. Seu fluxo luminoso também de 840 lumens corresponde a uma incandescente de 60 W. Seu IRC também é de 80%.

F. Lâmpada LED 7,5 watts – clara fria – Philips. O LED é uma fonte que produz luz por fotoluminescência. Há pouco tempo, serviam apenas como sinalizadores devido à sua baixa intensidade luminosa. Com o desenvolvimento científico e tecnológico, foi possível melhorar seu rendimento luminoso passando-se a utilizá-lo até para iluminação geral, especialmente depois de descoberta a forma de fabricação do LED branco. É a mais econômica fonte de luz artificial atualmente. Além disso, ainda proporciona novas possibilidades de design pela sua variedade de cores e redução efetiva na necessidade de manutenção, permitindo instalação em locais de difícil acesso.
G. Lâmpada LED 6 watts – branca fria – Ourolux. Com tecnologia semelhante à marca anterior, apresenta menor custo no momento da compra. Possui fluxo luminoso de 600 lumens correspondendo a uma incandescente de 40 W. Sua temperatura de cor é de 6500k. O fabricante não informou o IRC da lâmpada.

2.5 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO COM FIBRA ÓPTICA

Neste trabalho algumas explicações são recapituladas pontualmente para clareza do texto.

A fibra óptica surgiu na evolução da telecomunicação. A partir da ideia da condução da luz em percursos de água (fontes), cientistas iniciaram pesquisas nas quais a vibração de um pulso sonoro é transformada em um sinal óptico que é conduzido até a extremidade onde se transforma em som novamente e assim tornou-se possível a transmissão de mensagens. Desde então, as aplicações da fibra óptica evoluíram muito. Entre 1950 e 1960, na medicina, a fibra óptica facilitou exames no interior do corpo humano. No serviço militar, possibilitou a produção de imagens para construção de mapas (HECHT, 1999).

A fibra óptica para iluminação se diferencia da fibra óptica para condução de dados por ser tratar de um polímero (Polimetil metacrilato) e não um vidro (fibra vítrea), sendo o seu manuseio mais flexível. O encapamento dos cabos da fibra também é opcional e não obrigatório, depende da forma como serão utilizados na edificação ou no ambiente. Pode ser opaco ou transparente. A fibra possui uma camada protetora para não permitir que a luz escape por suas laterais, mas pode-se trabalhar nessa camada para se obter um efeito decorativo com a luz sendo visualizada lateralmente. Eventualmente, usa-se a fibra vítrea para iluminação, mas não é muito comum.

Apesar das dificuldades de lidar com o material, seus aspectos positivos corroboram para que o mesmo seja melhor indicado quando se trata de iluminação. O polimetil metacrilato

(PMMA), polímero utilizado para este fim específico, permite ser trabalhado à uma temperatura de até 86 ºC (BÄUMER, 2005). A fabricação do PMMA é obtida através da polimerização do monômero metil metacrilato com a seguinte estrutura química: $C_5H_8O_2$. As características principais deste material são (BÄUMER, 2005, p. 120): "alta transparência; baixo índice de refração dupla; alto índice de dureza sem perder a maleabilidade; elevada resistência à deterioração em contato com raios de luz".

De acordo com Sallouti (2011)[9], nos aspectos positivos de utilização da fibra óptica, podemos destacar:

- Eficiência energética: por conduzir luz com baixa perda de luminosidade, a fibra óptica pode iluminar mais de um ponto utilizando apenas uma lâmpada localizada na fonte de iluminação;
- Alto IRC (índice de reprodução de cores): a fibra é fiel à sua fonte de iluminação. Sendo assim, utilizando-se uma lâmpada com alto IRC, sua iluminação também se dará com alto IRC;
- Possibilidade de variações de temperatura de cor através de filtros de correção. Com o filtro de correção instalado dentro da fonte, é possível manipular a cor da luz conforme o interesse de iluminação;
- Alta durabilidade: a fibra óptica tem grande resistência a contato com materiais e intempéries. Geralmente, também é envolvida por uma capa protetora que melhora ainda mais seu desempenho de durabilidade;
- Segurança: a fibra não conduz energia elétrica, apenas luz, o que possibilita maior segurança, evitando o contato das pessoas diretamente com a rede elétrica. Por esse motivo, é muito indicada para iluminação de piscinas;
- Manutenção reduzida, esporádica e remota. Quando necessária, a manutenção é feita na fonte e não nos locais de iluminação. Diminui a quantidade de manutenções necessárias e também as facilita, pois não há necessidade de mexer em toda a instalação;
- Alto impacto visual: a fibra óptica cria efeitos luminosos que agradam ao olho humano;
- Ecoeficiência/*ecodesign*: por se tratar de um polímero, a fibra é considerada ecoeficiente. E por ser de fácil maleabilidade, permite que o seu manuseio seja de forma a melhor se adaptar ao projeto luminotécnico;

[9] O autor trabalha na empresa FASA com iluminação artificial com fibra óptica.

- Possibilidade de efeitos diversos como troca de cores, estrelados, faíscas e ondulações: toda essa programação é feita na fonte, diretamente na fábrica e as possibilidades de efeitos são inúmeras. É importante planejar objetivando o efeito que se deseja da fibra óptica; e
- Flexibilidade de aplicações/possibilidade de criação: a fibra óptica pode ser aplicada estando totalmente inserida na edificação ou ser a própria luminária, como objeto de decoração de destaque no ambiente.

O molde de injeção para a fabricação da fibra óptica é essencial para precisar suas partes com exatidão e atingir os níveis necessários de reflexão para a boa condução dos raios de luz.

Analisando as características térmicas da fibra, há resistência máxima até 100 ºC por períodos de até 60 segundos. No entanto, recomenda-se o uso em operação contínua de 70 ºC. A resistência térmica mínima é de -30 ºC sem afetar transmitâncias, mas as quedas abruptas de temperaturas abaixo de zero, podem resultar na quebra das fibras (SALLOUTI, 2011).

De acordo com Ghisi (2002) a transmissão de luz por cabos de fibra óptica pode ser prejudicada por:

1) Perdas de Fresnel: quando os meios de entrada e de saída são diferentes dos índices de refração do núcleo.
2) Perdas de reflexão: causadas pela degradação no processo de reflexão interna como resultado de impurezas ou falta de homogeneidade na interface núcleo - revestimento, mas é insignificante quando comparado com as perdas de absorção.
3) Perdas por espalhamento: a heterogeneidade no material do núcleo faz com que a luz seja dispersa, e como resultado alguns raios podem atingir a interface do núcleo - revestimento com um ângulo reduzido de incidência e, assim, escapar da fibra. Este mecanismo não é significativo em fibras de vidro, mas, pode ser grave nas de plástico.
4) Perdas de atenuação (absorção): também são chamadas de perdas de comprimento de onda e, determinam a região útil do espectro para qualquer fibra óptica. Este é o mecanismo de perda dominante e produz transmissões que variam de forma exponencial com o comprimento da fibra. Quanto maior o comprimento da fibra, maior a perda de luz.

A fibra óptica, seja de vidro ou polimérica, é bastante resistente. Na teoria, tem resistência até 2000 MPA (GHISI, 2002). Também é bastante resistente à água, tendo seu desempenho pouco afetado. No entanto, na presença de umidade e sob alguma tensão, pode sofrer alguma falha, que, se aumentar, pode levar ao rompimento da fibra.

De acordo com Bäumer (2005), as vantagens da fibra óptica plástica sobre a fibra óptica vítrea são:

- capacidade de um maior volume de produção com custo mais baixo;
- flexibilidade na forma para utilização tanto no design quanto na facilidade para passar por estruturas com pouco espaço sem ser danificada;
- redução no peso de sua própria composição;
- maior resistência devido a sua maleabilidade plástica; e
- implementação de redução de custos de montagem de elementos na utilização de resinas termoplásticas.

Ainda, segundo Bäumer (2005), por outro lado há alguns desafios:

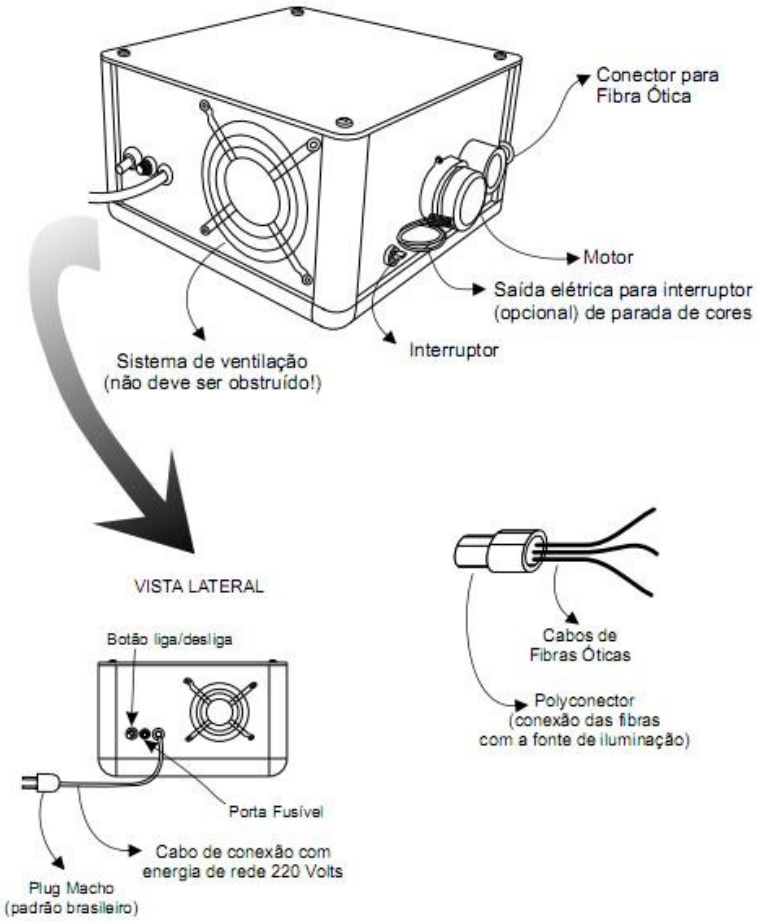
- Comparado com o vidro, demonstra maior índice de refração dupla (desdobramento de um raio de luz em dois). Isto requer maior atenção na fabricação e na montagem dos cabos plásticos;
- As fibras plásticas têm maior coeficiente de expansão térmica, menor capacidade térmica e de condutividade, o que pode causar deformações dimensionais. Portanto, é importante estabilizar as condições de uso de acordo com as variações de temperatura. O gerenciamento térmico deve ser sempre observado, pois, se trabalhadas em temperaturas elevadas como em quase todos os plásticos ópticos a resistência é inferior à dos vidros e metais ópticos;
- Devido à baixa dureza mecânica do material, o plástico óptico é bastante sensível a ranhuras. Isso pode ser resolvido com um invólucro em sua superfície, resistente o suficiente a esse tipo de dano;
- Materiais ópticos de plástico têm absorção de água, o que pode provocar inchaços na fibra e mudanças no índice de refração. É um motivo a mais para a utilização do invólucro; e
- O encolhimento devido ao arrefecimento no processo de moldagem por injeção é possível ser previsto na fabricação e solucionado.

Em um experimento realizado por Ullah e Whang (2015), houve a comprovação de que o uso da fibra polimérica permite maior flexibilidade, resistência e menor custo. O autor desenvolveu um protótipo de sistema de iluminação com coletor solar e fibra óptica semelhante ao do Girassol®, mas, por ser pesquisa, não foi comercializado. Sua análise permitiu fundamentar a característica de iluminação uniforme que a fibra óptica proporciona.

2.5.1 Sistema de iluminação com fibra óptica e fonte de luz artificial

O sistema de iluminação com fibra óptica e luz artificial é baseado em uma fonte de luz remota. A fonte de iluminação abriga um refletor, a lâmpada e um filtro. Também pode conter um lastro, uma ventoinha e uma roda de cores de rotação (GHISI, 2002). Desta fonte sairão os cabos de fibra óptica que irão diretamente aos pontos difusores (luminárias). Nestes, podem ser acoplados controles de ângulo de facho, efeitos de difusão ou simplesmente o acabamento, conforme Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Fonte de iluminação e cabo de fibra óptica



Fonte: Manual FASA (2014).

Figura 32 – Exemplo de difusor

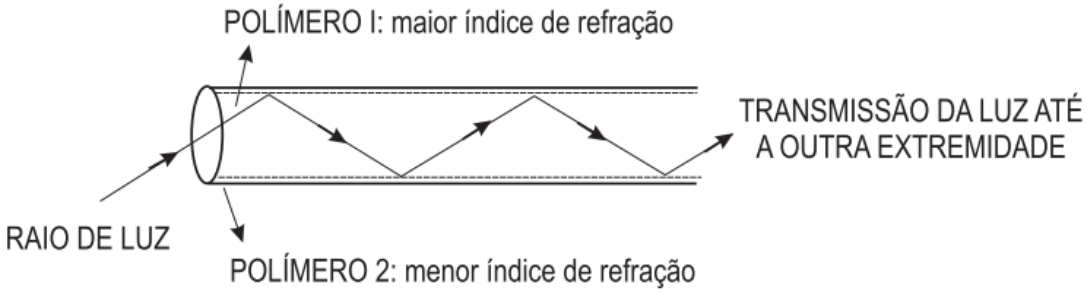
Fonte: Lume Arquitetura (2009, online).

Atualmente, este sistema é mais utilizado para iluminação arquitetônica e decorativa.

Segundo Sallouti (2011), a condução de luz através de cabos de fibra óptica pode ser dada em dois processos basicamente:

- Sistema *Endlight* ou pontual: a luz é conduzida de uma extremidade da fibra à outra e apresenta pouca perda de luz no percurso. Dessa forma, com uma única fonte, é possível iluminar vários pontos. As fibras ópticas poliméricas (polimetil metacrilato), utilizadas para iluminação, são formadas por fios ou cabos. Os fios são filamentos únicos de fibra óptica, encapados ou não, geralmente encontrados nos diâmetros de 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,50, 2,00 ou 3,00 mm. Já os cabos são compostos por vários fios (geralmente Ø 0,75 mm), para formar o diâmetro total. Sempre encapados, são encontrados em diâmetros diversos, usualmente acima de 1,5 mm (Figuras 33, 34 e 35).

Figura 33 – Sistema Endlight



Fonte: Sallouti (2011, p. 11).

Figura 34 – Efeito “céu estrelado” com cristais lapidados

Fonte: Lume Arquitetura (2009, online).

Figura 35 – Iluminação de piscina

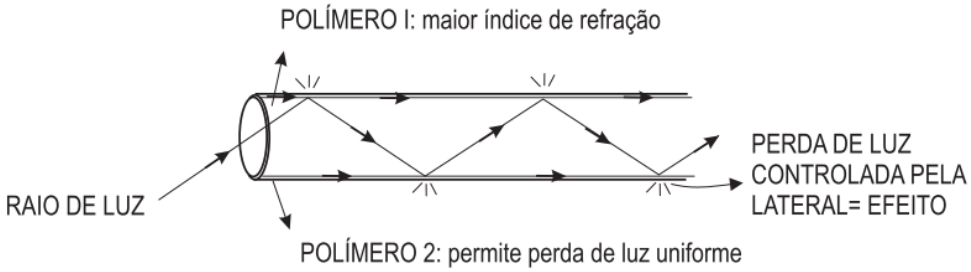
Fonte: Lume Arquitetura (2009, online).

- Sistema *Sidelight* ou Perimetral: tem uma perda de luz controlada através da lateral da fibra que assim fica toda iluminada. A funcionalidade desse sistema é apenas decorativa. O *sidelight* é composto por vários fios, geralmente, de 0,75 mm para formar o diâmetro total, usualmente trançados para uma maior homogeneidade na sua lateral que quando é raspada e é retirada a camada de proteção, permite a passagem de luz. São sempre encontrados com encapamentos transparentes (geralmente com proteções antifungos e UV), possuem diâmetros diversos, normalmente entre 4,5 e 16,0 mm.

A composição de um cabo óptico é feita através de união de várias fibras de um mesmo tipo, revestidas com materiais capazes de proporcionar melhor proteção e resistência às interferências do ambiente externo. Em todas as aplicações com fibra óptica, é necessário o

cabo devido à fragilidade da mesma. Além disso, a facilidade de manuseio dos cabos sem danificar as fibras é maior (MALDONADO; MATOS, 2003). No entanto, quando o objetivo for criar uma luminária, é possível utilizar os cabos de fibra óptica independentes, sem a necessidade de trançá-los (Figuras 36 e 37).

Figura 36 – Sistema *side light* ou perimetral



Fonte: Sallouti (2011, p. 11).

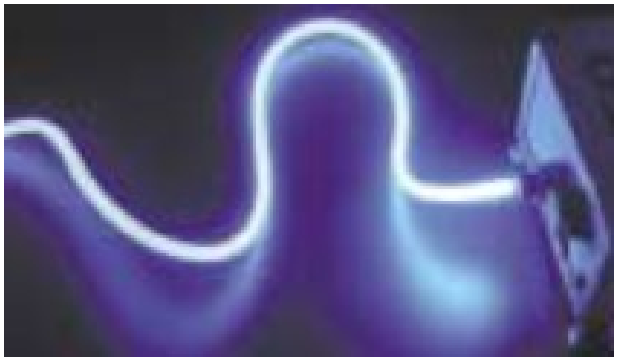
Figura 37 – Cortina de fibra óptica em ambiente habitacional

Fonte: acervo pessoal.

O sistema de várias fibras formando um cabo na espessura desejada conferiu à tecnologia da fibra óptica maior durabilidade (mínimo 15 anos) e maior flexibilidade. Igualmente, nas aplicações subaquáticas, o desenvolvimento atingiu níveis nos quais já se pode iluminar, por exemplo, uma piscina de 22 x 9 m com uma única fonte de iluminação (uma única lâmpada) de

150 watts, capaz de gerar luz para até 11 terminais, cujos diâmetros chegam até a 4,5cm. O mesmo princípio favorece, ainda, aplicações em nichos comerciais e residenciais, vitrines e móveis, onde se busca a valorização da iluminação sem destacar a origem da luz (LUME ARQUITETURA, 2009) (Figura 38).

Figura 38 – Cabo de fibra óptica com vários fios e encapamento transparente



Fonte: Lume Arquitetura (2009, online).

Atualmente a empresa FASA[10] com suas parceiras, disponibiliza fontes de iluminação com lâmpada de LED, o que contribui ainda mais para a economia de energia. As fontes são ligadas em energia de rede convencional. De acordo com o diretor da empresa, Wilson Sallouti, a evolução proporcionou a diminuição do consumo com fontes de 3 e 36 W, por exemplo. Ao mesmo tempo houve manutenção do nível do fluxo luminoso, ou até aumento do mesmo. Observe a Figura 39 que mostra uma luminária tendo a fonte de iluminação no interior de um regador e as fibras saindo do mesmo criando o efeito de água através da luz que escapa no sistema *side light*.

Figura 39 – Luminária com chuva de luz

Fonte: Manual FASA (2016, online).

[10] Empresa parceira neste trabalho na parte de iluminação com fibra óptica e fonte de luz artificial.

2.5.2 Sistema de iluminação com fibra óptica e fonte de luz natural

A pesquisa com coletores solares e transmissão por fibra óptica tem dois aspectos muito positivos: 1) a redução da área de instalação com placas fotovoltaicas de alto custo; e 2) o aumento da eficiência no aproveitamento da luz solar (MANI et al., 2015).

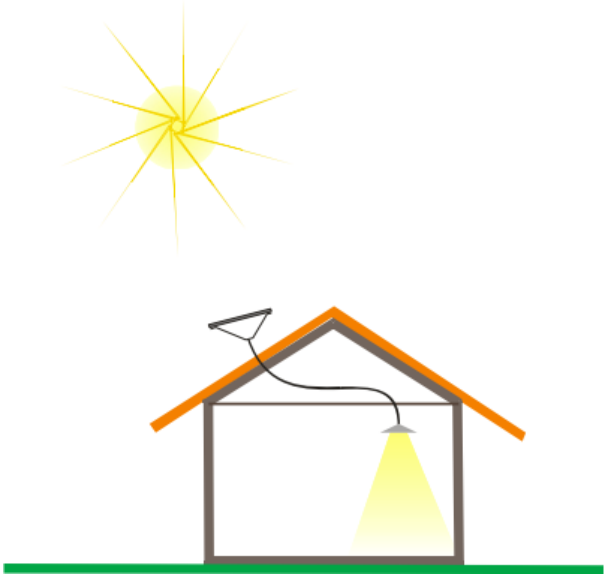
Com base no contexto atual mundial, a captação de iluminação natural para ambientes residenciais se torna cada dia mais importante, valorizada e necessária. O uso eficiente da energia e sua economia são uma preocupação constante da população e órgãos governamentais. Um dos grandes desafios para os profissionais contemporâneos é projetar, reduzindo o uso de fontes artificiais de iluminação. Este desconforto aumenta uma vez que não se trata apenas de uma questão econômica, mas, também, de preservação ambiental (LEAL, 2011).

Já que nem sempre é possível iluminar um ambiente com iluminação natural direta, tecnologias estão sendo desenvolvidas para conseguir captar a iluminação natural e reproduzi-la em edificações. Desta forma, tentando também se adaptar à atualidade cada vez mais se insiste nos sistemas de condução da luz natural, através de cabos ópticos (LUME ARQUITETURA, 2009). Para Ghisi (2002, p. 38), o grande desafio em sua pesquisa foi solucionar o problema de iluminação natural nas áreas dos ambientes em que a claridade fornecida pelas aberturas não é suficiente. Sua proposta é levar os cabos de fibra óptica até esses pontos para que também recebam iluminação natural. Utilizando as janelas como fontes de luz natural e os cabos como condutores, conseguiu realizar sua pesquisa atingindo bons resultados de eficiência energética. Ter a janela como fonte de luz para alimentar os cabos de fibra óptica e assim iluminar o interior do ambiente sempre foi a proposta do autor (GHISI, 2002). Seu objetivo foi avaliar quanto de energia poderia ser poupada com esse sistema de integração entre iluminação solar direta da janela e iluminação solar tendo a janela como fonte para condução de luz através dos cabos de fibra óptica. Seu resultado foi positivo mas o custo para a instalação foi considerado alto.

Os sistemas de captação de luz natural com cabos de fibras ópticas são tecnologias recentes que canalizam e concentram a luz solar direta, distribuindo-a em forma de iluminação pontual ou difusa para os espaços internos. Segundo Sallouti (2011), esses sistemas são classificados, partindo da proposta elaborada pelo Institut für Licht und Bautechnik, Alemanha, em categorias específicas referentes aos tipos de clima em que se realizará a instalação,

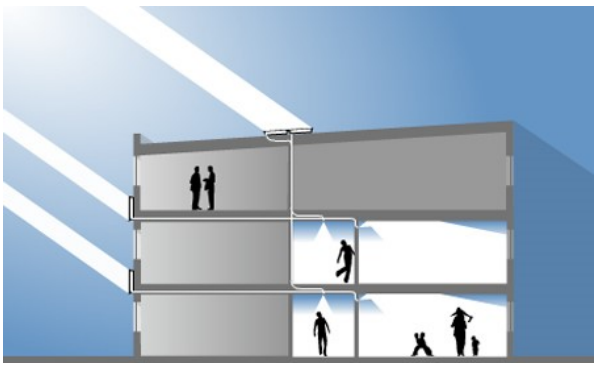
adotando alguns critérios para seleção onde os coletores estão classificados junto com os dutos de luz[11] (*light pipe*) (LEAL, 2011) (Figuras 40 e 41).

Figura 40 – Esquema de captação de luz solar conduzida através de fibra óptica



Fonte: Purim (2008, p. 3).

Figura 41 – Captação e distribuição de luz solar em edificação



Fonte: Parans (2016, online).

A fibra é composta por duas camadas: a interna (núcleo ou *core*) onde acontecem as refrações da luz e a externa que é um revestimento (*cladding*) com alta capacidade de reflexão. Normalmente circulares, quando unidas são protegidas por um invólucro polimérico flexível formando um cabo de fibra óptica. Os coletores são equipamentos que captam a luz natural e a direciona aos cabos. Sua eficiência depende da disponibilidade de luz solar, de sua periodicidade e da constituição do coletor (LEAL, 2011). Normalmente, são instalados nas coberturas

[11] A tecnologia de dutos de luz também promove iluminação natural em ambientes internos, mas não possibilita grandes variedades e extensões de caminhos como a fibra óptica.

de edifícios ou em lajes, sempre privilegiando a orientação solar. Diferente de outras estratégias de aproveitamento de luz natural, muitos dos modelos de coletores com fibra óptica encontrados no mercado apresentam melhor desempenho quando expostos à radiação direta. Alguns deles disponibilizam um sistema mais aperfeiçoado, programados para calcular a trajetória do sol e ainda responder rapidamente às mudanças de tempo, caso venha a ocorrer interferências ou bloqueios com nuvens.

Sabendo-se que a luz do sol pode ser direcionada por espelhos ou lentes, é necessário um sistema (heliostato) para rastrear o sol. No entanto, foram considerados complicados e caros (MACÊDO, 2002).

Patenteado pelo japonês Dr. Kei Mori, o primeiro coletor foi lançado em 1979, em um projeto que previa um coletor em formato hexagonal lembrando uma colmeia de abelha (LEAL, 2011). No seu protótipo foram utilizadas lentes Fresnel como elementos ópticos capazes de capturar a luz. Atualmente, a empresa japonesa La Forêt Engineering Co. Ltd. produz o exemplar patenteado em 1979 (Himawari) com tecnologia que progrediu desde sua patente criando modelos que variam de acordo com a quantidade de lentes instaladas. As fibras utilizadas nesse sistema são de vidro e o nome é referente à palavra "Girassol®" em japonês. O conjunto de lentes move-se na direção do sol por meio do acionamento de motores controlados por circuitos sensores e relógio interno. Ao noitecer o conjunto é girado para a posição do sol ao amanhecer (PURIM, 2008). A tecnologia desta empresa será mais detalhada adiante.

Outra empresa, que desenvolveu a tecnologia foi a Parans (Suécia) que também apresenta receptores de luz com lentes Fresnel e tem como diferencial a captação em 360º, o que facilita o monitoramento do sol. Trata-se de um coletor com possibilidade de movimento individual em torno do seu eixo para melhor captação da luz. Sua capacidade de fornecimento de luz com iluminância externa em torno de 100.000 lux é de 14.000 lumens (PURIM, 2008). As tecnologias desta empresa também serão mais bem explicadas futuramente.

Os estudos para o modelo do coletor americano, com tecnologia diferente da citada anteriormente, foram iniciados na década de 90 através de um consórcio entre vinte e oito instituições privadas, laboratórios e universidades. O modelo ficou conhecido como Hybrid Solar Lighting (HSL).

É um sistema baseado em um coletor parabólico espelhado com cerca de 1,3 m de diâmetro. Em seu foco é instalado um espelho secundário que retorna o feixe concentrado para o centro do espelho principal onde há oito cabos de fibras ópticas poliméricas instalados. O espelho secundário filtra a luz solar eliminando os raios ultravioletas e infravermelhos. Um pequeno painel fotovoltaico capta a luz fornecida pelo infravermelho transformando a energia

e utilizando-a para a operação do coletor. Um receptor GPS localiza a posição de instalação do coletor e um software processa uma equação da posição astronômica do sol desenvolvido pela US Naval Observatory, com precisão de 1/60º para os próximos 300 anos, em relação à posição do coletor. Com estas informações, o rastreamento do sol pode ser obtido com resolução de 0,1º. O controlador atualiza a posição do coletor a cada intervalo de um segundo (PURIM, 2008).

Nesse sistema foram elaboradas luminárias apropriadas que contêm lâmpadas fluorescentes com controle de luminosidade para complementar a iluminação necessária ao ambiente na ausência ou redução da iluminação natural.

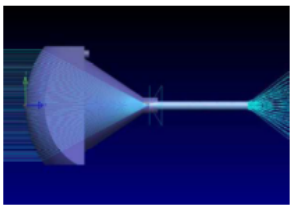
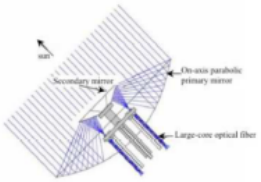
A Hybrid Solar Lighting (HSL) foi desenvolvida pelo Laboratório Nacional Oak Ridge. É comercializada pela Sun Light Direct na Califórnia (HIMAWARI, 2018). Esta tecnologia será estudada adiante.

Em síntese, os sistemas basicamente se estruturam da seguinte forma:

1. O captador móvel ou fixo capta a luz através das lentes ou dos espelhos;
2. O condutor faz a condução da luz até o ponto final. A condução é feita através de reflexões que acontecem no condutor, no caso, a fibra óptica; e
3. Chegando ao ponto de difusão da luz, o difusor, que pode ser especular ou não, emite a luz que foi conduzida até ele nas luminárias.

Pesquisadores favoráveis aos sistemas de iluminação com fibra óptica comprovam sua eficiência e eficácia quanto a ser luz natural direta no ambiente e à economia de energia elétrica resguardando o meio ambiente. O quadro da Figura 42 compara as formas de captação de luz aqui apresentadas. Lentes Fresnel e Espelho Parabólico.

Figura 42 – Quadro comparativo entre coletores com lentes Fresnel e espelho parabólico

CARACTERÍSTICAS	ELEMENTO ÓTICO DE CAPTAÇÃO DA LUZ	
	Lentes Fresnel	Espelho Parabólico
ESQUEMA DE COLETA		
DIMENSÃO	Pequenas lentes para formação de painéis modulares ou um concentrador com uma única lente.	Coletor contendo 2 concentradores, sendo o primário com 1,22m (*Sunlight Direct*).
LOCALIZAÇAO	Cobertura, varandas e fachadas.	Cobertura dos edifícios.
RENDIMENTO	Depende do ângulo de incidência	Depende do grau de reflexão do material
QUANTIDADE COLETOR	Uma ou várias lentes por coletor.	Dois espelhos parabólicos por coletor.
PESO	Estrutura com espessura e peso reduzido.	Estrututa mais pesada.
ALIMENTAÇÃO DA FIBRA	Cada lente alimenta cabos de fibra ótica individuais.	Cada coletor alimenta oito cabos numa mesma estrutura.
TIPO DE CLIMA	Todos os tipos de climas.	Todos os tipos de climas.
CONDIÇÃO DE CÉU	Melhor desempenho em condições de céu aberto – luz direta.	Possibilidade de coleta com luz difusa, mas com melhor desempenho na direta.
TERMINAIS	Disponível em luz pontual *spots* ou *plafons* com uso de difusor de acrílico.	Disponível em luz pontual *spots* ou *plafons* e difusa com emissão lateral com bastão de acrílico (*solid core*).
FENÔMEMO ÓTICO	Refração da luz	Reflexão da luz
TECNOLOGIA HÍBRIDA	Disponível, de acordo com o fabricante	Disponível, de acordo com o fabricante

Fonte: Leal (2011, p. 12).

A eficiência do coletor com espelhos se dá pelo alto coeficiente de reflexão dos mesmos. Já as lentes Fresnel possibilitam redução na perda de luz por reflexões indesejadas. Cada tecnologia tem suas vantagens e por isso os projetos estão em constante evolução (LEAL, 2011).

2.5.3 Tecnologias disponíveis no mercado

2.5.3.1 PARANS[12]

A Parans é uma empresa que se dedica à iluminação solar com o objetivo de fornecer luz natural para ambientes internos através de um sistema que recolhe e transporta os raios do sol. Desenvolveu e patenteou a tecnologia, primeiramente para seus proprietários e posteriormente para projetos de arquitetos e projetos particulares em todo o mundo através de revendedores autorizados.

[12] Todas as informações relacionadas aos equipamentos da Parans foram retiradas do site da empresa: <www.parans.com> ou fornecidas diretamente por Karl Richard Nilsson (gerente de desenvolvimento técnico) através de e-mails recebidos.

A tecnologia Parans foi criada por Bengt Steneby em parceria com o CEO Nils Nilsson e sua equipe. Os parceiros mais relevantes foram os pesquisadores Uppsala University, Lund University, fiber optic manufacturers (OFS), Optical consultants (ÅF Consulting), Lens manufacturer (Gaggione), Aluminium producers (Profilgruppen). Muitos são os parceiros que têm uma relação estreita com a Parans durante o processo de desenvolvimento e que também são fornecedores.

A empresa foi fundada em 2002 e a primeira versão da tecnologia patenteada Parans foi comercializada em 2004. A tecnologia foi desenvolvida por meio de uma parceria da R & D com a colaboração da Universidade Técnica de Chalmers em Gotemburgo, Suécia. O produto foi concebido a partir de um desejo de aprimorar a possibilidade de trazer a luz solar em salas de aula e melhorar o ambiente interior.

Foram feitos vários projetos com muitas universidades no decorrer dos anos. As participações mais relevantes foram:

- Chalmers University of Technology: Projeto principalmente industrial de concepção e desenvolvimento de negócios mecânicos;
- Universidade de Lund: pesquisa Daylight - simulação da luz do dia e design de luminárias; e
- Universidade de Uppsala: Desenvolvimento de cabos e avaliação de como espalhar a luz de fibra óptica.

A WWF e a GlobalFOCUS concederam à Parans o prêmio "Climate Solver"[13] como uma das doze inovações climáticas mais importantes da Suécia. Recebeu também "Prêmio Globe" e "Savingthe Planet in Style" (salvar o planeta no estilo) de três das principais organizações da Suécia em design e sustentabilidade: Konstfack, O2 nórdica e Albaeco. Os prêmios têm por objetivo chamar a atenção para projeto social e ecologicamente sustentável.

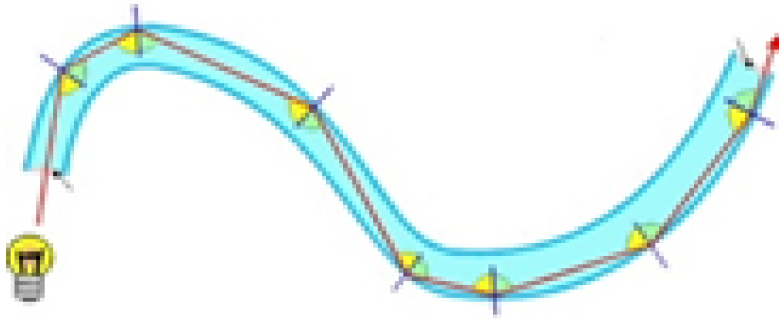
O sistema torna possível levar a luz natural até ambientes fechados onde as pessoas trabalham e se envolvem em atividades intelectuais. Um dos primeiros benefícios desejado foi o aumento da produtividade e o bem-estar das pessoas. Quando as pessoas têm acesso à luz natural nos ambientes onde trabalham, seu bem-estar e conforto aumentam. As pessoas são mais produtivas sob a luz natural – os estudos que a Parans fez mostra aumentos de produtividade de 6-16%. (informação pessoal obtida por e-mail como consta na nota de rodapé 12)

[13] Desenvolvido pela WWF com escopo não muito definido e que pouca visibilidade gerou à Parans.

O olho recebe impressões visuais da luz, mas há também outras células sensíveis à luz em nossos olhos, que estão ligados ao que é conhecido como o relógio biológico do nosso cérebro. Estas células são ativadas pela luz natural, e é por isso que a luz natural é tão importante, sincroniza o ritmo diurno e noturno das pessoas e as mantêm alerta durante o dia. Esta evidência é observada através do uso dos equipamentos, pois a luz captada pelo sol é a mesma conduzida pelo cabo de fibra óptica, o que reflete na variação da temperatura de cor da luz e de sua intensidade. Por esse mesmo motivo, na existência de nuvens, a iluminação também é prejudicada, pois a nuvem atua como um obstáculo à iluminação solar. A completa independência da luz elétrica ainda não é possível, por este motivo.

O sistema de fibra óptica conduz a luz solar de uma extremidade à outra através do fenômeno da reflexão total. A luz é captada por uma extremidade do cabo da fibra e conduzida até a outra extremidade sofrendo várias reflexões no interior da fibra, como visto na Figura 43.

Figura 43 – Condução da luz através do fenômeno da reflexão total



Fonte: Infoescola (2018, online).

O cabeamento de fibra óptica é fino e flexível, o que permite que os cabos possam ser instalados através de paredes e tetos longos. Tradicionalmente, para se colocar mais luz do dia em um edifício é necessário fazer aberturas nas fachadas. Com os cabos flexíveis, é possível instalar os equipamentos na área externa e usar os piso, paredes e tetos para passagem do cabeamento e chegada de luz ao local pretendido.

O sistema de luz da Parans tem como objetivo receber a luz solar dentro de ambientes sem iluminação natural direta. É um sistema completo que permite transportar a luz do sol para ambientes pouco iluminados. Consiste em um coletor localizado no exterior da edificação, cabos de fibra óptica que transportam a luz e luminárias dentro do ambiente que espalham a luz. Vários padrões podem ser determinados como, por exemplo, a escolha da luminária e o comprimento do cabo.

O coletor é o dispositivo do sistema da Parans que está colocado no telhado ou na fachada, e que segue o sol ao longo do dia para capturar a luz. Cada coletor tem seis cabos e por conseguinte cada receptor tem seis cabos. É importante saber o comprimento necessário para que a fibra óptica, saindo do coletor, chegue ao ponto desejado. É possível escolher entre 5, 10, 15 e 20 m de cabos. Para saber o comprimento correto é necessário calcular ou medir a distância entre o local receptor no telhado ou na fachada e a localização da zona interior onde a luz vai ser usada.

Cada cabo tem 7 mm de espessura e em torno de cada um é necessária uma proteção com 50 mm permitindo passar todos os cabos através de paredes, tetos e pisos sem danificar sua estrutura. Os três primeiros metros de cabeamento têm uma conduta de proteção para não danificar os cabos no ambiente exterior. Assim que o cabo estiver dentro da edificação, é possível dividir os seis cabos em diferentes direções.

A Parans oferece equipamentos que possibilitam instalações nas seguintes situações:

- Equipamento para montagem em telhados de zinco que consiste em pequenos, mas resistentes clipes fixados em torno das dobras do telhado e fazem uma junção forte, sem perfurar a telha. O clipe é enroscado no lugar, sem perfuração, o que facilita a instalação; e
- Uma estrutura usada para selar a abertura em torno dos cabos, criando um selo apertado na classificação de proteção IP54[14]. Esta união de cabos pode ser utilizada para a passagem através das paredes do interior e do exterior.

O coletor SP3 Parans é um equipamento que objetiva a captação da luz solar. Ele pode girar 360 graus e coletar a luz solar em todos os momentos. Na prática, isto significa que o design do receptor faz com que seja possível a captura de todas as horas de sol em um dia. A quantidade de luz solar captada varia de acordo com a situação geográfica (latitude) e época do ano. Se a unidade for instalada em uma posição com sombra ou em uma fachada, o acesso à luz solar pode ser limitado.

Um coletor Parans SP3 tem aproximadamente 114 x 27 x 57 cm e pesa 35 kg. Já a geração SP4 é modular e pode ter as seguintes especificações, conforme Tabela 3.

[14] Classificação que indica proteção contra poeira e água.

Tabela 3: Especificações do coletor Parans

	SP4 – 4	SP4 – 6	SP4 -8	SP4 - 12	SP4 - 20
Largura (mm)	110	110	1.950	1.950	1.950
Altura (mm)	880	1.180	880	1.180	1.180
Peso (Kg)	50	55	55	65	85
Fonte de energia	11-250 v AC, 50-60 Hz				
Consumo de energia	0 – 12 W				
Temperatura de operação	-20 ºC – 50 ºC				
Luminância	4.000 – 26.000 lm				
Materiais	Alumínio, Aço inoxidável, Vidro e Acrílico				
Raio de curvatura (cabo óptico)	150 mm				

Fonte: informação pessoal enviada por e-mail por Karl Richard Nilsson.

Os equipamentos de iluminação da Parans podem ser instalados em edifícios já existente tendo que se considerar apenas dois fatores:

1. o local onde o coletor Parans será montado deverá ser exposto à luz do sol; e
2. o comprimento do cabo resultante não deve ser superior a 20 m.

É importante destacar que se pode ligar um interruptor ao sistema, permitindo que o mesmo seja desligado no momento necessário, como por exemplo, quando se deseja fazer projeção de slides.

Como a radiação UV é bloqueada por este sistema, não há os malefícios do contato dessa radiação com a pele humana ou com materiais sensíveis a esta radiação. Por esse motivo os museus utilizam essa tecnologia, pois as obras podem ser observadas como propostas por seus artistas e, ao mesmo tempo, não serão danificadas.

Outra vantagem em relação aos produtos tradicionais de iluminação natural e luzes artificiais que criam excesso de calor é que a radiação, de infravermelho do sol é desviada para o lado de fora do coletor Parans por meio do projeto de colimação na lente de captar apenas os raios do espectro visível. Assim, o calor da radiação não chega aos ambientes nem danifica materiais com os quais venha a ter contato.

Quanto à manutenção dos equipamentos, assim como uma janela comum precisa ser limpa, o mesmo acontece com o vidro no coletor. A sugestão é que seja limpo de 1 a 3 vezes por ano conforme o tipo de intempérie a que ficar exposto.

O sistema Parans SP3 é a terceira geração do sistema Parans e pode seguir o sol durante o dia inteiro, aproveitando todas as horas de luz. Apenas a parte visual do espectro de luz é

transportado para dentro – IR e radiação UV são filtrados para fora. O Parans SP3 é composto por um coletor e cabos de fibra óptica (Figura 44).

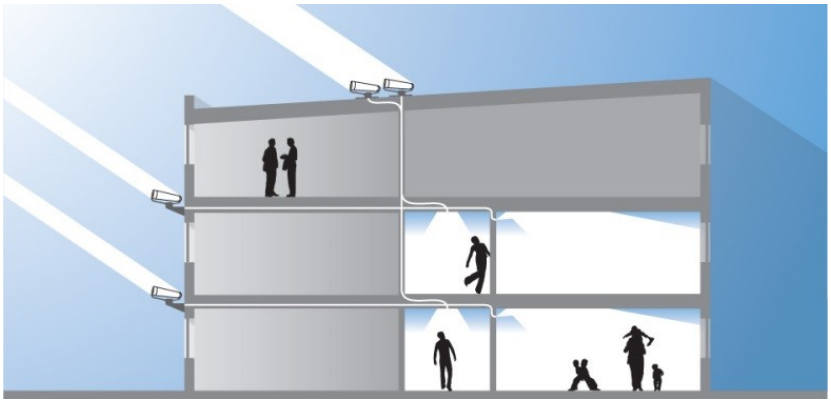
Figura 44 – Sistema Parans P3

Fonte: Parans (2016, online).

O sistema Parans consome 7 W, em média, o que é uma pequena quantidade de energia. O custo de eletricidade por ano é menos de 8 euros (com base nos custos médios da eletricidade na Europa). Este consumo é em função do motor de movimentação do equipamento que necessita acompanhar o trânsito solar. O coletor funciona em 12 V. Há também um transformador que é facilmente conectado a uma tomada de parede normal. A tomada elétrica deve ter potência constante, e não ser controlada por temporizadores. A vida útil de um sistema é calculada em 20 anos.

O coletor segue o sol ao longo do dia para recolher a sua luz. Especialmente concebido para fazer a captura da luz pelas lentes ópticas, concentra e envia a quantidade ideal de luz solar para o cabo. Em seguida faz-se a transferência imediata para o interior do edifício. Assim, o sistema transporta a luz solar para espaços interiores que não recebem iluminação direta do exterior. Os cabos têm muito boa capacidade para transportar luz, mantendo todo o espectro de luz solar. Os cabos são finos e flexíveis, e podem transportar luz tanto vertical como horizontalmente e ocupam pouco espaço (Figura 45).

Figura 45 – Esquema de funcionamento do sistema Parans



Fonte: Parans (2016, online).

O sistema desenvolvido torna a instalação simples. Ele vem pré-programado de fábrica. No local, a unidade é fixada e os cabos são conduzidos às luminárias no interior do edifício. A empresa aconselha que o manual de instalação sempre seja consultado para que a mesma seja feita corretamente. Cada cabo oferece um ponto de luz que deve ser conectado às luminárias também fabricadas pela Parans como: L1 Luminaire, L2 Hybrid, L2 e L3 PureSpotlight.

L1 Luminaire - A Luminária L1espalha parte da luz de forma suave para o ambiente, deixando alguma luz passar através da forma de um quadrado. Dá a impressão de uma clarabóia e lança luz solar para baixo, como a luz solar que flui através de uma janela. O L1 Luminaire vem em dois tamanhos.

Na L1 pequena, se encaixa um cabo Parans, então seis unidades são usadas para cada sistema SP3.

Na L1 Média, se encaixam dois cabos Parans, então três unidades são usadas para cada sistema SP3. Veja Figura 46.

L2 Luminaire – A luminária L2 combina tetos de telha padrão com módulos permutáveis. É a maneira mais fácil de integrar este tipo de iluminação através da simples troca de algumas telhas. Ela vem com ou sem tecnologia híbrida, combinando luz Parans com tecnologia LED.

L2 Hybrid – A luminária híbrida L2 combina a luz solar real com iluminação LED eficiente de energia. Ela dá uma experiência saudável e agradável da luz do dia. A combinação de fontes de luz fornece uma solução completa para que, quando o sol for encoberto, a luz elétrica venha da mesma luminária. A L2 híbrida utiliza dois cabos Parans, o que significa que três luminárias são necessárias para cada sistema.

L2 Pure – A luminária L2 Pure é toda direcionada para a luz solar, mas com o formato das telhas do teto padrão. A L2 Pure utiliza dois cabos Parans, o que significa que três luminárias são necessárias para cada sistema (Figura 46).

Figura 46 – Luminária L1 instalada

Fonte: Parans (2016, online).

Figura 47 – Luminária L2 instalada

Fonte: Parans (2016, online).

L3 Spotlight – Esta é a luminária mais discreta e a de maior destaque comercial dessa linha. Pode ser usada para criar um feixe de luz tipo holofote ou atuará diretamente em uma superfície. As luminárias L3 são ajustáveis e fáceis de inclinar de maneiras diferentes. Cada L3 Spotlight utiliza um cabo Parans, portanto, para um receptor SP3, são necessárias seis luminárias L3. Existem diferentes maneiras de usar a Spotlight L3 para a obtenção de diferentes efeitos de luz e aparências:

Feixe de luz forte: A Spotlight L3 possui uma lente que foca a luz de um cabo em um cone de 30°, criando o efeito de holofote. Nesta configuração, a Spotlight L3 é usada para destacar os objetos, produz luz direta com precisão ou cria efeitos. A lente pode ser montada de forma saliente para ampliar a possibilidade de inclinação e luz direta.

A Spotlight L3 pode também ser usada sem sua lente, a fim de criar uma experiência de luz fluida que preenche espaços maiores, sem criar feixes de luz exatos

E, sendo a L3 pequena e precisa, dá a oportunidade de instalações diferenciadas que criam efeitos de luz natural contínuos e individualizados (Figura 48).

Figura 48 – Luminária L3 instalada

Fonte: Parans (2016, online).

Há instalações da Parans em todo o mundo desde o início da comercialização em 2004[15]. Com a evolução da tecnologia, as instalações acompanham o tempo de desenvolvimento passando pelas gerações SP1, SP2 e SP3. A geração SP4 pouco se diferencia da SP3. Sua instalação e potência são semelhantes. As vantagens se dão no sistema de modulação que permite maior flexibilidade do projeto e o aumento no tempo de vida útil do equipamento: mínimo de 10 anos. A inovação se deu no uso de fibra óptica polimérica, uma experiência positiva que possibilitou uma perda de luz menor. Os dados que informam maiores vantagens entre uma e outra são segredos comerciais da empresa. As Figuras 49 a 55 mostram alguns exemplos de instalações feitas pela empresa.

[15] A atividade no Brasil é muito baixa, ainda não há equipamentos instalados. Os impostos de importação estão bloqueando a maioria dos esforços em vendas devido ao preço elevado (Informação obtida por e-mail, o valor exato não foi informado).

EDIFÍCIO COMERCIAL

Figura 49 – Iluminação no interior de edifício comercial, Espanha

Fonte: Parans (2016, online).

O desafio desse edifício comercial era ser construído de acordo com as leis ambientais da certificação LEED.

Solução: Vários sistemas Parans foram instalados aumentando os níveis de luz natural nas escadas e nas salas de reuniões. Ao instalar esses sistemas, a luz solar atingiu espaços onde muito pouca ou nenhuma luz das janelas poderia alcançar.

UNIVERSIDADE DE LUND

Figura 50 – Sala de conferências da Universidade de Lund, Suécia

Fonte: Parans (2016, online).

Na Universidade de Lund o desafio foi iluminar uma sala de conferências, sem luz natural por estar localizada no meio do edifício. Com corredores em ambos os lados da sala de conferência, os locais de trabalho estavam situados perto das janelas, mas a luz não era suficiente.

Solução: A luz solar é captada por receptores localizados no exterior do edifício. Em seguida, transfere-se a luz solar através da estrutura do edifício, passando por mais de um andar da edificação até chegar na sala de conferências.

HOSPITAL

Figura 51 – Inserção de luz natural em ambiente fechado de hospital na Suécia

Fonte: Parans (2016, online).

O desafio era a iluminação do departamento de radiologia no Hospital Södertälje que, como em muitos locais de trabalho sem janela, não recebia a luz do dia por estar localizado no centro de um grande edifício.

Solução: Em uma das fachadas, um receptor Parans foi colocado para colher luz solar natural. A luz foi, em seguida, transportada por cerca de dez metros para dentro do enorme prédio, através de cabos finos. No interior, uma série de luminárias L1 distribuíram a luz e, assim, mantiveram o contato com o mundo exterior. É possível experienciar a mudança do tempo e o passar do dia, mesmo sem janelas.

UNIVERSIDADE DE UPPSALA

Figura 52 – Sala de estudos na Universidade de Uppsala na Suécia

Fonte: Parans (2016, online).

O desafio era a iluminação da sala de estudos da Universidade de Uppsala. Pesquisas mostram que os alunos aprendem mais e com melhor desempenho cognitivo quando trabalham com luz natural. No entanto, nem todos os locais de trabalho recebem uma adequada iluminação solar. A referida área tinha apenas uma janela. Precisava receber mais luz solar.

Solução: Um receptor Parans foi montado no telhado e os Cabos solares foram colocados na sala de estudos. Os projetores L3 foram usados sem lentes, a fim de criar uma área de luz sem limites. Os holofotes são muito discretos - quase nenhuma luminária é visível no teto. Esta instalação também conta com sensores para controlar a iluminação elétrica. Quando há sol as lâmpadas elétricas não são necessárias.

ESCRITÓRIO

Figura 53 – *Spotlight* em escritório de arquitetura no Japão

Fonte: Parans (2016, online).

O desafio era o acesso à luz natural em uma construção com a particularidade de possuir cinco metros de altura.

Solução: Ao combinar diferentes luminárias, como L1 Médio e L3 Spotlights os ocupantes sentiram que tinham claridade suficiente para ler e escrever.

RESIDÊNCIAS

Figura 54 – Iluminação em residência com efeito de claraboia no Reino Unido

Fonte: Parans (2016, online).

O desafio era iluminar, com luz natural, três áreas importantes desta casa: a cozinha, o quarto e a sala de estar. Essas áreas não tinham acesso direto para o telhado e uma clarabóia não poderia ser instalada.

Solução: Os cabos flexíveis ocuparam muito pouco espaço e forneceram a capacidade de obter a luz solar em espaços onde a luz recebida pelas janelas não podia alcançar. Com uma solução personalizada, a iluminação foi instalada com o efeito de uma claraboia no ambiente.

Figura 55 – Iluminação em cozinha de residência na França

Fonte: Parans (2016, online).

O desafio era encontrar um lugar para a instalação de um receptor SP3. A cozinha desta casa de campo necessitava de mais luz natural e os proprietários decidiram instalar um sistema Parans. O telhado não poderia ser utilizado.

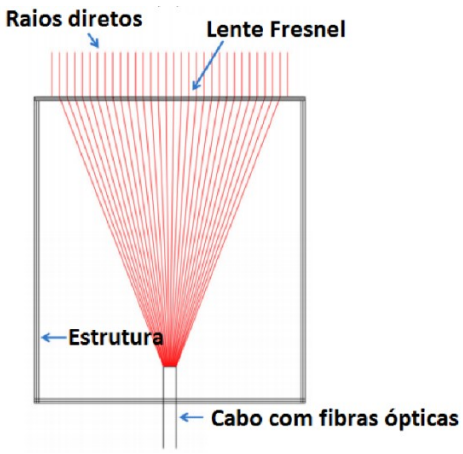
Solução: Usando os cabos solares flexíveis, a instalação não tinha como ser feita a partir do topo para baixo. Em um canto ensolarado do jardim, uma base de madeira foi construída para o receptor. A decisão foi, então, enterrar os cabos sob o gramado, para trazê-los, em seguida, para cima na cozinha. Dentro do ambiente, um projetor L3 e uma luminária L1 foram usados para iluminar a superfície de trabalho e fogão.

2.5.3.2 Himawari

A empresa registrada pelo nome *La Forêt Engineering Co. Ltd.* está localizada em Tóquio no Japão. Foi fundada em maio de 1978. Dr. Kei Mori (1932-1990), professor no Departamento de Engenharia da Universidade de Keio, desenvolveu a seguinte tecnologia: considerava a luz do sol muito importante para as atividades diárias do ser humano, além de reconhecer a necessidade de novas tecnologias de iluminação para a sustentabilidade ambiental do planeta. O professor cedeu seus direitos autorais de pesquisador para que a empresa pudesse desenvolver e comercializar uma tecnologia que contemplasse essa necessidade do homem (HIMAWARI, 2018).

A Himawari propõe, então, um sistema de iluminação em que a luz do sol possa chegar uniformemente em vários pontos da edificação. Em sua construção também foram utilizadas as lentes Fresnel para captar a luz do sol. Sua estrutura permite colimar na fibra óptica somente os raios que compõem o espectro visível, como mostra a Figura 56.

Figura 56 – Colimação dos raios na lente Fresnel



Fonte: Ullah e Whang (2015, p. 71-88), adaptada pela autora.

Na edificação, o coletor é localizado na área externa com maior incidência da luz solar e é composto por um invólucro em acrílico que protege a estrutura de lentes. Possui um sensor óptico junto a essa estrutura capaz de detectar a posição do sol (Figura 57). O sistema que controla o sensor é automático permitindo um alinhamento constante (Figura 58).

Figura 57 – Coletor solar Himawari

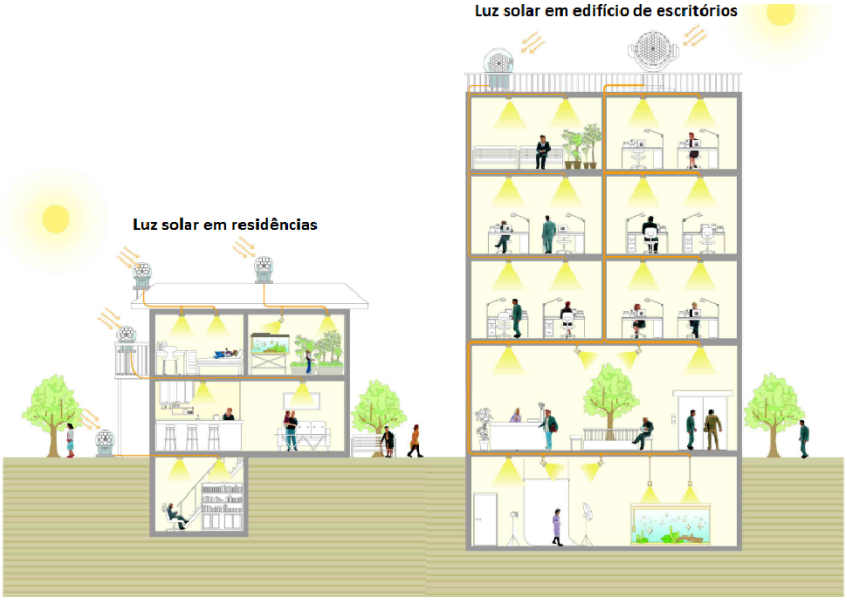
Fonte: Himawari (2018, online), adaptada da autora.

Figura 58 – Alinhamento do coletor solar com a luz do sol

Fonte: Himawari (2018, online), adaptada pela autora.

O domo de acrílico é responsável por proporcionar as reflexões dos raios do sol necessárias para que os raios ultravioletas não cheguem à fibra óptica. Funciona também como proteção contra intempéries e poeira. A luz coletada é encaminhada ao interior da edificação através das fibras ópticas, visto na Figura 59.

Figura 59 – Sistema de iluminação solar Himawari



Fonte: Himawari (2018, online), adaptada pela autora.

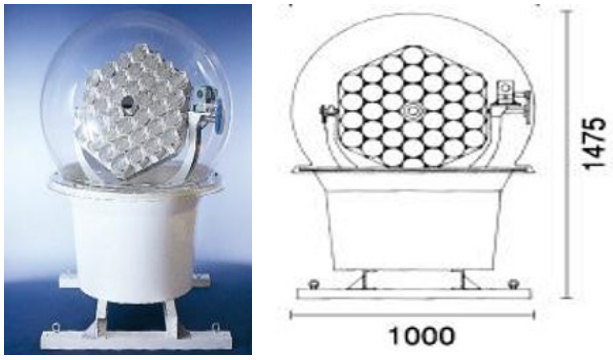
Os modelos de coletor variam de acordo com o número de lentes. O modelo XD-50S/12AS é composto por doze lentes e dois cabos ópticos para dois terminais (Figura 60).

Figura 60 – Coletor modelo XD-50S/12AS

Fonte: Himawari (2018, online).

O modelo XD-100S/36AS possui trinta e seis lentes capazes de transmitir luz a até 6 cabos ópticos para seis terminais (Figura 61).

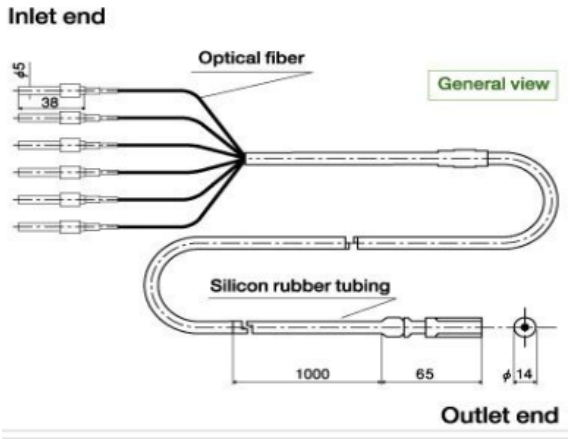
Figura 61 – Coletor modelo XD100/36AS



Fonte: Himawari (2018, online).

O cabo óptico, em ambos os modelos, é composto por seis fibras ópticas de 1 mm ligadas diretamente às seis lentes de 95 mm do coletor. Sua composição de quartzo permite baixa perda de luz (SCHIRBER, 2005) (Figura 62).

Figura 62 – Estrutura do cabo óptico



Fonte: Lightefx (2018, online).

A Tabela 4 apresenta um comparativo entre os modelos apresentados acima. Seus dados foram obtidos com iluminância de 98.000 lux.

Tabela 4 – Comparativo entre os modelos de coletor solar Himawari

	Modelo	Número de lentes	Área de recepção de luz (cm²)	Tamanho das lentes (mm)	Diâmetro do domo (mm)	Número de cabos	Fluxo luminoso total (lm)	Altura (mm)	Peso (kg)	Potência
AS series	XD – 100S/36AS	36	2,552	95	1000	6	11,520	1475	88	5 W
	XD – 50S/12As	12	851	95	520	2	3,840	810	81	2 W

Fonte: Himawari (2018, online).

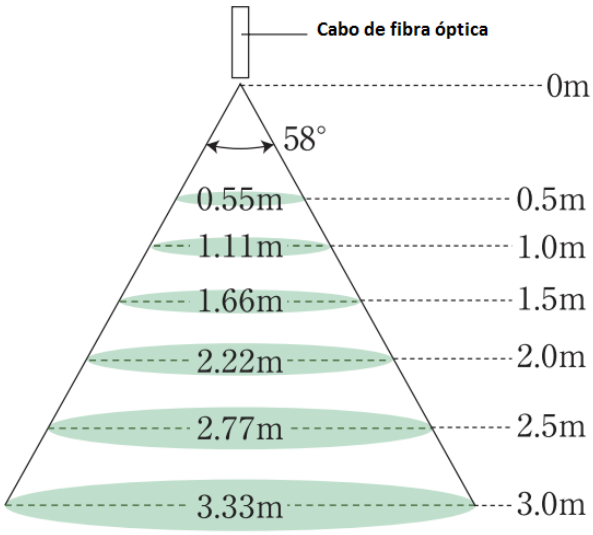
A Figura 63 mostra a conexão dos cabos ópticos com as lentes do coletor.

Figura 63 – Conexão dos cabos ópticos com as lentes

Fonte: Sun to moon (2018, online).

A luz emitida pelo cabo óptico se espalha com uma angulação de 58º (Figura 64). A uma distância de 2 m do terminal da fibra e atingindo uma área de mais ou menos 2 m², a iluminância chega a aproximadamente 500 luxes (Figura 64, Tabela 5).

Figura 64 – Emissão da luz solar por cabo óptico



Fonte: Himawari (2018, online), adaptada pela autora.

Tabela 5 – Emissão da luz solar por cabo óptico com base em uma iluminância de 98.000 lux

Distância da fonte de luz (m)	Média da iluminância (lux)
0,5	7,967
1,0	1,990
1,5	884
2,0	497
2,5	318
3,0	221

Fonte: Himawari (2018, online), adaptada pela autora.

A Himawari desenvolveu três modelos de terminais para acoplar à extremidade do cabo óptico e assim protegê-los (Figuras 65 a 67).

Figura 65 – *Downlight* ND

Fonte: Himawari (2018, online)

Figura 66 – *Downlight* NA

Fonte: Himawari (2018, online)

Figura 67 – *Spotlight*

Fonte: Himawari (2018, online)

Na história da Himawari, destaca-se a Tsukuba EXPO 85 que aconteceu em março daquele ano. A empresa expôs sete unidades de um modelo de coletor, denominado Himawari Terrace, com dezenove lentes recriando a imagem de um Girassol® (*himawari* em japonês) como se vê na Figura 68.

Figura 68 – Himawari Terrace

Fonte: Himawari (2018, online)

A seguir alguns exemplos de aplicação da tecnologia Himawari:

- Projetos executados em residências: usuários receberam diretamente a luz solar sem radiação ultravioleta (Figuras 69 e 70).

Figura 69 – Projetos da Himawari em residências

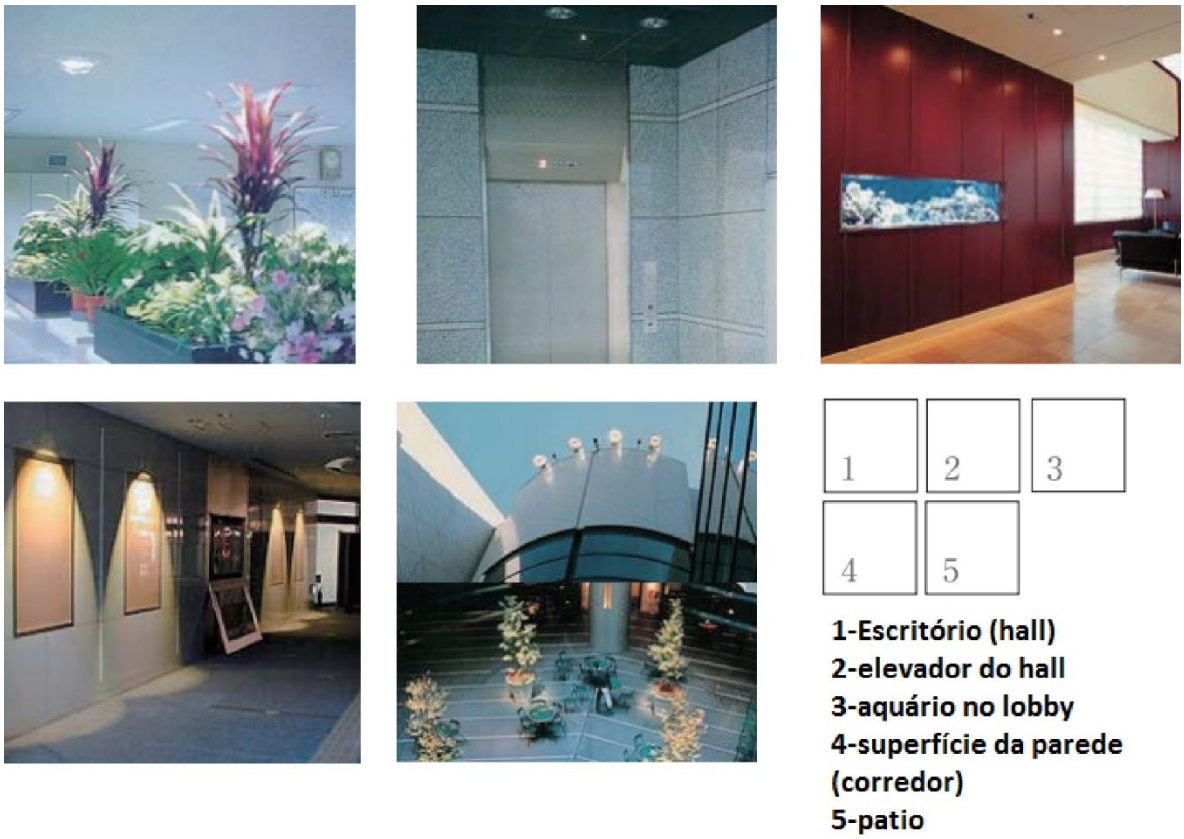
Fonte: Himawari (2018, online), adaptada pela autora.

Figura 70 – Projeto executado em residências

Fonte: Himawari (2018, online).

- Projetos executados em escritórios: a luz do sol promove conforto e melhoria na qualidade do ambiente de trabalho (Figuras 71 a 74).

Figura 71 – Projeto executado em escritórios

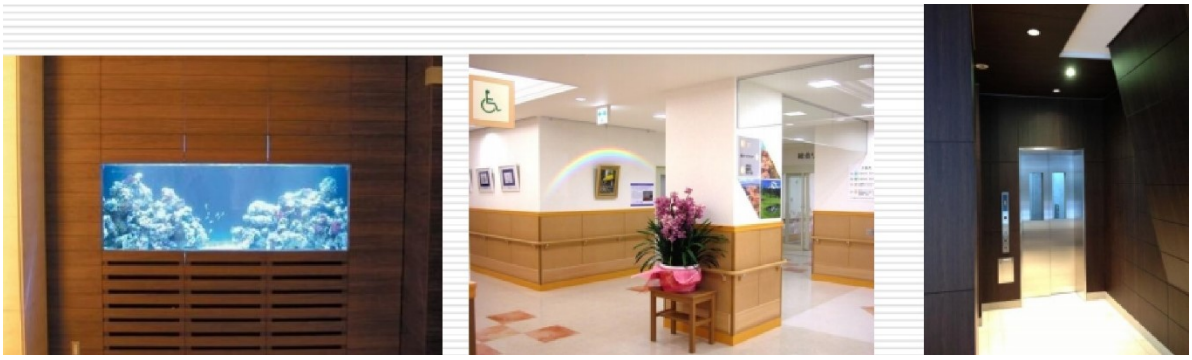


Fonte: Himawari (2018, online).

Figura 72 – Coletor solar Himawari

Fonte: Himawari (2018, online).

Figura 73 – Projeto executado em escritório



Fonte: Himawari (2018, online).

Figura 74 – Projeto executado em escritório

Fonte: Himawari (2018, online).

- Projetos executados em espaços públicos (Figuras 75 a 77).

Figura 75 – Hall subterrâneo na cidade de Oakya, Japão

Fonte: Himawari (2018, online).

Figura 76 – Prefeitura de Hiroshima, Japão

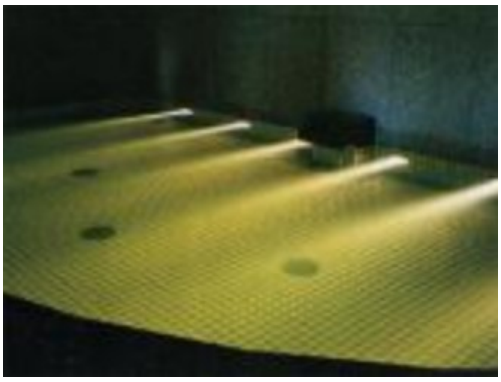
Fonte: Himawari (2018, online).

Figura 77 – Estacionamento no Metropolitan Highway em Tóquio, Japão

Fonte: Himawari (2018, online).

- Projetos executados em ambientes aquáticos (Figuras 78 e 79).

Figura 78 – Iluminação subterrânea em piscina



Fonte: Himawari (2018, online).

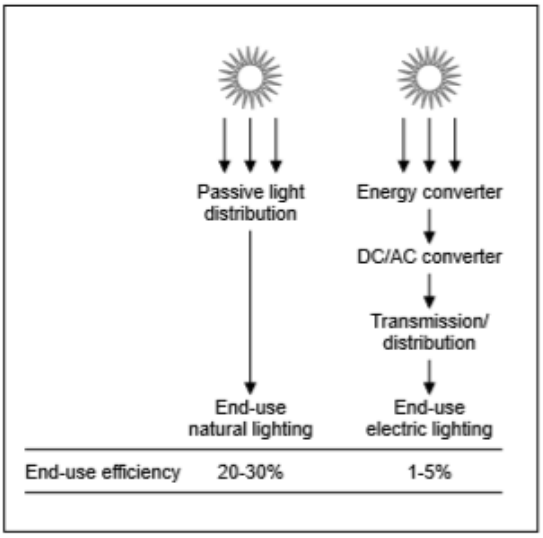
Figura 79 – Tanque de vida marinha em aquário

Fonte: Himawari (2018, online).

2.5.3.3 HSL

HSL é um sistema de iluminação que combina luz natural com luz artificial. Foi desenvolvido por *Oak Ridge National Laboratory* no Tenesse. O sistema é composto por um coletor que capta somente a luz visível do sol e a direciona para cabos de fibra óptica até as luminárias híbridas no interior da edificação (Figura 80). A proposta ainda faz com que o coletor capte outros comprimentos de onda além do espectro visível. Essa captação é direcionada a placas fotovoltaicas que transformam essas radiações em energia elétrica para utilização nas lâmpadas fluorescentes instaladas nas luminárias híbridas (Figura 81). De acordo com Muhs (2000), o sistema pode ser esquematizado de acordo com a Figura 82.

Figura 80 – Sistema esquemático de iluminação HSL

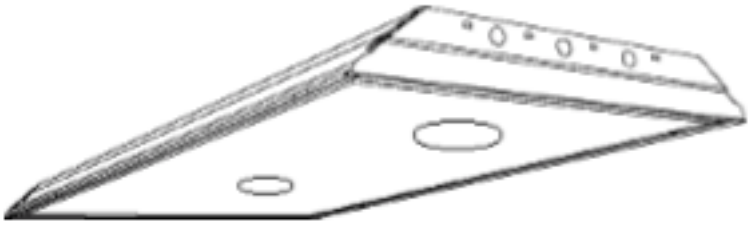


Fonte: Muhs (2000, p. 9)

As luminárias da HSL têm uma proposta de grande eficiência na iluminação, mas ainda precisam melhorar seus resultados para atender melhor à expectativa dos usuários

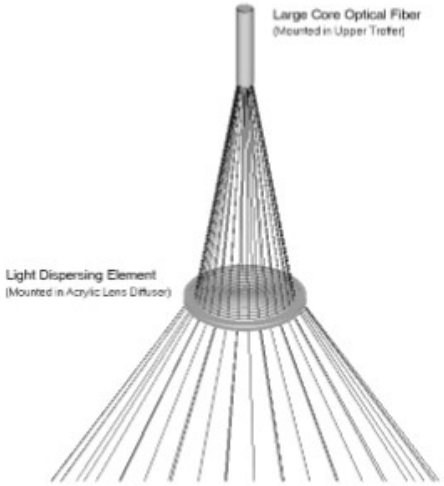
(MAYHOUB; CARTER, 2010, p. 68). Em um fórum em 2001 sobre energia solar em Washington foram apresentados alguns modelos que estão disponíveis para comercialização. (Figuras 81 e 82).

Figura 81 – Luminária híbrida GT8



Fonte: Earl e Muhs (2001, p. 3).

Figura 82 – Elemento de dispersão da luz para saídas diretas do cabo óptico



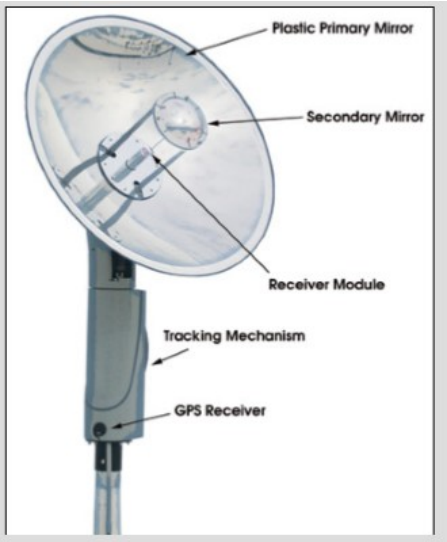
Fonte: Earl e Muhs (2001, p. 3).

O primeiro protótipo foi desenvolvido em 2002. O sistema rastreia o sol, independente das nuvens, através de um GPS instalado no motor do coletor e concentra a luz solar em um feixe direcionado ao cabo óptico. O sistema consiste basicamente de três partes: 1) o coletor (Figura 83); 2) o sistema de guias (fibras ópticas); e 3) o difusor que espalha a luz no ambiente - luminárias (Figura 84) (MAYHOUB; CARTER, 2012).

O espelho primário do conjunto é uma segunda superfície aluminizada. O secundário é formado com vidro que reflete somente a luz visível eliminando o ultravioleta e o infravermelho. Neste segundo espelho, a luz é direcionada à fibra óptica. O maior desafio era impedir que a fibra recebesse calor fosse danificada (Figura 85). Mani et al. (2015, p. 461) descrevem o sistema HSL da seguinte forma:

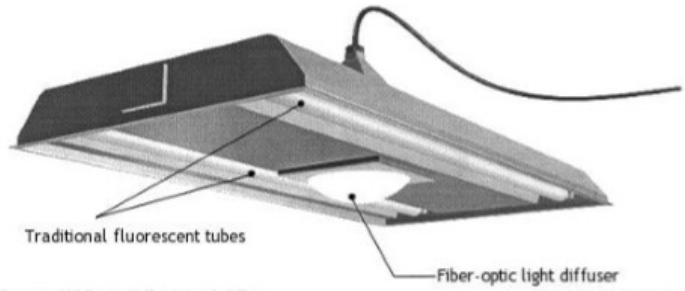
> (...) um espelho parabólico interligado a um motor que monitora a luz do sol. O espelho (parte do coletor) é instalado na cobertura da edificação e acompanha o movimento do sol. O espelho tem 120mm e é aluminizado. Um espelho secundário, construído com placas de vidro é projetado com o objetivo de refletir os comprimentos de onda do espectro visível. Saindo do espelho secundário, a luz é direcionada aos receptores de fibra óptica com entrada uniforme. Os cabos de fibra óptica encaminham a luz até as luminárias que espalham a luz no ambiente de forma difusa. (MANI et al., 2015, p. 461).

Figura 83 – Coletor HSL



Fonte: Mani et al. (2015).

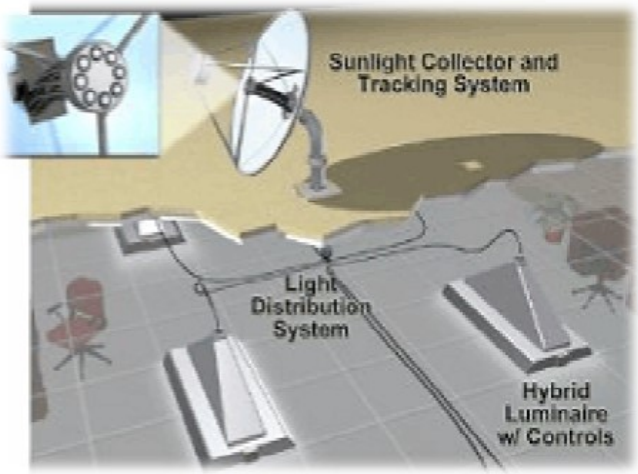
Figura 84 – Luminária HSL



Fonte: Mani et al. (2015).

O coletor dever ser instalado no telhado da edificação proporcionando a maior captação possível da luz solar (Figura 85)

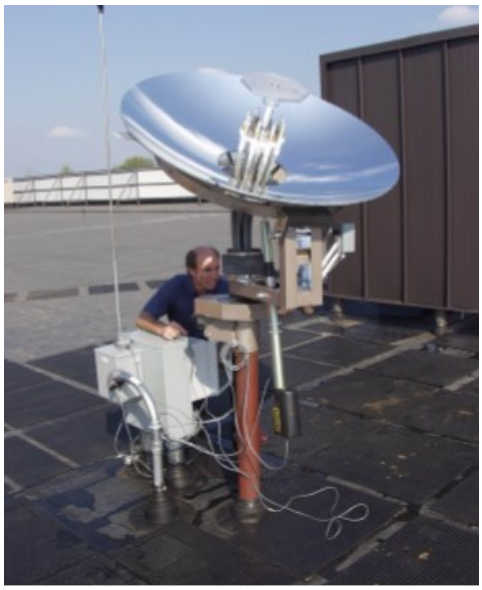
Figura 85 – Instalação do sistema HSL



Fonte: Mani et al. (2015).

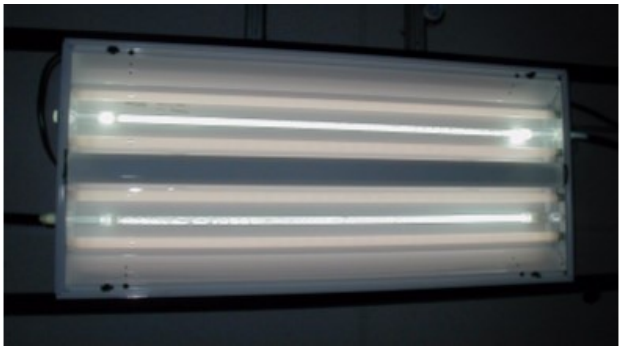
Em setembro de 2002 foi instalado um sistema HSL no edifício National Transportation Research Center, em Knoxville. O coletor era composto por um espelho primário de 110 cm de diâmetro tendo um metro quadrado de área livre de captação. O espelho secundário era composto por oito facetas planas responsáveis por refletir o espectro visível direcionando-o a oito núcleos de cabos de fibra óptica. O restante da radiação solar (ultravioleta e infravermelho) era direcionado, através dos espelhos às placas fotovoltaicas para geração de energia. As fibras ópticas foram encaminhadas a oito luminárias híbridas com 4 lâmpadas cada uma. A textura das lâmpadas foi alterada para melhor promover a dispersão da luz no ambiente (Figuras 86 e 87).

Figura 86 – Coletor solar instalado no NTRC



Fonte: Beshears et al. (2004, p. 59).

Figura 87 – Luminária híbrida instalada no NTRC



Fonte: Beshears et al. (2004, p. 59).

O desafio do equipamento foi solucionado pela empresa Enhancement Electronics Inc., que possibilitou uma rotação no sistema acompanhando o sol. Esse sistema foi fundamental para a boa captação da luz solar. Os dados coletados para análise comprovaram a qualidade da luz emitida pela fibra óptica no ambiente. De acordo com Beshears et al. (2004), a reprodução das temperaturas de cor, cromacidade e espectro reproduzem o que é captado da luz do sol diretamente. O sistema operou por 600 horas (25 dias) ininterruptas, sem apresentar falhas na captação e transmissão da luz. Adaptando-o à rotina da edificação, ou seja, ligando e desligando de acordo com as atividades no edifício, funcionou por mais de nove meses sem apresentar problemas (BESHEARS, 2004).

Mayhoub e Carter (2012) apresentaram um trabalho em uma conferência no Peru em 2012 em que compararam equipamentos com esse tipo de tecnologia. Suas considerações sobre a Parans e a HSL enriquecem este trabalho. Segundo os autores, as duas empresas foram as que mais obtiveram sucesso no mercado mundial. Jadhav et al. (2016) concordam, em seu artigo, com essa afirmação. As capacidades de seus coletores foram consideradas altas considerando o tamanho do coletor e sua capacidade de captação. A HSL ainda foi melhor classificada por ter maior capacidade de captação em dias nublados. Seu motor de rotacionamento demonstrou melhor eficiência para direcionar o coletor em direção ao sol mesmo em dias com nuvens. No entanto, a Parans apresentou melhores resultados na iluminação dos ambientes. Seu sistema de transmissão e dispersão da luz na luminária foi mais eficaz. Os autores ainda destacam elementos importantes para o melhor desempenho de qualquer um dos sistemas. Segundo eles, a arquitetura da edificação pode proporcionar maior ou menor eficiência de cada equipamento. São fatores a serem observados: tipo de uso da edificação, forma arquitetônica, posicionamento, flexibilidade para adaptações, design de interiores, sistema estrutural e integração com áreas de suporte técnico (MAYHOUB; CARTER, 2012). Os autores escreveram um artigo em 2010 e explicam melhor estes fatores (MAYHOUB; CARTER, 2010).

É possível apresentar um quadro comparativo resumindo os três sistemas apresentados segundo Jadhav (2016) (Tabela 6).

Tabela 6 – Quadro comparativo das tecnologias apresentadas.

Nome do sistema	**Tecnologia usada**	**Eficiência**	**Quantidade de luz emitida no ambiente**	**Economia (em ambiente de 10 x 10 m) (em dólares)**
Himawari	Lente Fresnel e guia de fibra óptica	50 a 70%	1630 a 2.000 lm 98.000 lux	6.000 a 7.000
Parans sp3	Lente Fresnel e guia de fibra óptica	60 a 80%	7.500 a 10.000 lm 75.000 lux	5.000 a 6.000
HSL	Espelho parabólico e guia de onda de fibra óptica	30 a 50%	4.170 a 6.250 lm 1.000.000 lux	3.000 a 4.000

Fonte: Jadhav et al. (2016), adaptada pela autora

Como pode-se analisar, as três tecnologias apresentada geram benefício tanto ao meio ambiente quanto ao usuário. A Parans se destaca entre as três por estar mais desenvolvida tecnologicamente e no mercado comercial. Ainda assim, os estudos na área são contínuos.

Em 2019, mais uma empresa sueca, a Solros, lançará no mercado a mesma tecnologia de iluminação. O sistema consiste em um “prato” de aço inoxidável, varanda ou qualquer outro lugarque receba o máximo de sol possível durante todo o dia. Este prato possui um sensor que acompanha o sol automaticamente e, devido ao seu formato arredondado, reflete os raios solares para dentro do cabo de fibra ótica. A luz do sol então viaja por dentro de um cabo com um conjunto de 37 fibras ópticas. Os raios solares, quando saem do cabo, são distribuídos dentro da luminária em forma de caixa, iluminando todo o ambiente. O equipamento funciona mesmo em dias nublados (Figuras 88 e 89).

Figura 88 – Coletor solar Solros

Fonte: disponível em: <https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/sistema-traz-luz-sol-para-dentro-de-casa-atraves-de-um-cabo/>. Acesso em: 13 nov. 2018

Figura 89 – Luminária Solros

Fonte: disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/615127051/solros-dish-optic-cable-brings-real-light-to-dark?ref=nav_search&result=project& term=solros%20dish>. Acesso em: 13 nov.2018

Mais informações sobre a tecnologia da empresa e seu desenvolvimento estão disponível em: <www.solros.com>. De acordo com Ramstedt (2016), um dos criadores e responsáveis pelo sistema, através de e-mails trocados em novembro de 2018, a empresa pretende lançar o produto no mercado em março de 2019 e tem como objetivo inovar o sistema continuamente. Outra meta da empresa é conseguir disponibilizar o equipamento para a América do Sul no valor de US$1.500,00 (mil e quinhentos dólares).

Além dos equipamentos já no mercado de trabalho há estudos acadêmicos que experenciaram esse tipo de tecnologia (transmissão de luz natural através de cabos de fibra óptica). A seguir são relacionados alguns estudos que orientaram este trabalho e que podem orientar futuros trabalhos na área.

Werring (2009) em sua dissertação de mestrado na Universidade do Kansas apresentou as vantagens em desenvolver um coletor solar de luz natural, direta, sem utilizar placa fotovoltaica, destacando os benefício da luz natural para o ser humano, a economia de energia que esse tipo de tecnologia traz para o meio ambiente e como os custos de fabricação podem ser diminuídos de acordo com o desenvolvimento dos estudos. Seu trabalhou incentivou outros pesquisadores a estudar e desenvolver esse tipo de iluminação possibilitando vários resultados positivos que hoje podem ser encontrados na literatura.

Wang et al. (2010) desenvolveu um novo dispositivo foi projetado e fabricado em conformidade, que é um coletor solar de fibra óptica constituído por uma placa de PMMA e 150 pedaços de três cores de 1 m de comprimento e 2 mm de diâmetro de fibras fluorescentes. A análise comparativa entre o coletor e outros sistemas de iluminação testados nas mesmas condições comprovou a eficiência do equipamento principalmente em ambientes subaquáticos que não têm a possibilidade da chegada da luz natural.

Em 2012, no Rio de Janeiro, Bruno Galdino Silva, desenvolveu seu trabalho final de graduação com testes em um modelo de equipamento da Parans, o *Luminaires L1 Medium.* No centro de tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seus resultados comprovaram uma redução no consumo de energia de aproximadamente 85% (SILVA, 2012).

Sapia (2013) desenvolveu um sistema de endereçamento solar híbrido semelhante a sistemas fotovoltaicos infravermelhos em desenvolvimento. É composto por um coletor parabólico primário (PPC) que concentra a luz solar em um refletor óptico plano secundário (SOE) feito por uma série de espelhos frios. Esse sistema também tem o propósito de captar somente a luz visível. O estudo estava sendo desenvolvido na Universidade de Roma e pretendia aprimorar as tecnologias desenvolvidas, desde o coletor até as luminárias. Os valores econômicos obtidos não foram suficientes para tornar o produto financeiramente viável em relação aos sistemas de iluminação tradicionais e por esse motivo o autor decidiu dar continuidade à pesquisa.

Joo Han (2013) testou um equipamento similar aos apresentados. Para avaliar seu modelo foram feitos uma série de testes que demonstraram o potencial do equipamento desenvolvido. A combinação eficaz de luz solar e iluminação elétrica convencional foi também explorada com a aplicação de um controle de escurecimento.

Mayhoub (2014) desenvolveu um estudo em que valoriza os novos sistemas de iluminação natural por considerar que as pesquisas realizadas na área buscam atender aos requisitos de iluminação em edifícios, onde a quantidade inadequada de luz natural é fornecida pelos sistemas convencionais de iluminação natural. Apresentou as dificuldades técnicas e principalmente financeiras para viabilizar a utilização dessas novas tecnologias. Soluções e recomendações foram sugeridas. O estudo torna as capacidades e limitações dos diferentes sistemas mais claras para os arquitetos e usuários, e discute os desafios e promessas enfrentados pelos desenvolvedores e designers de iluminação.

Köse e Muhurcu (2016) realizou um estudo sobre sistemas de iluminação natural para projeto de edifícios utilizando fibra óptica de plástico para um sistema de iluminação natural inovador. Na configuração experimental foram utilizados 3 × 2 mm de fibra óptica de plástico, luxímetro e sistema de rastreamento solar com espelho parabólico para estabelecer os experimentos. Todas as medidas foram realizadas aleatoriamente nos diferentes intervalos de tempo do dia. Os resultados obtidos foram tabulados e comparados com os resultados da literatura. O estudo foi desenvolvido na Turquia e comprovou o fato de que o material de fibra óptica de plástico ser barato e flexível aumenta sua utilidade, a durabilidade do sistema e sua integração e também facilita a manutenção do sistema de transmissão de luz. Este estudo mostrou que o sistema construído, que é ecologicamente correto, é capaz de captar e utilizar a luz do sol. Também foi comprovado que o aumento do diâmetro e número de canais de cabos de fibra óptica de plástico causa um aumento na eficiência e economia de energia.

Vu (2016) também desenvolveu um sistema de captação de luz natural e transmissão por fibra óptica que obteve resultados positivos em relação a sua eficiência na economia de energia e à possibilidade de ser produzido com baixo custo. Seus resultados são melhores que os da Tecnologia Parans e Himawari quando submetidos às mesmas condições, tanto no aspecto financeiro como no aspecto do fluxo luminoso.

Gorthala et al. (2017) desenvolveu um estudo com o objetivo de projetar e desenvolver um concentrador solar que produzisse iluminação para estabelecimentos móveis (abrigo militar em área remota, por exemplo). Desenvolveu dois protótipos para produzir análises comparativas entre ambos e ver as melhores especificações técnicas a serem adotadas. A pesquisa tem grande valor acadêmico pois possibilita iluminação em ambientes que não têm acesso à energia elétrica.

2.5.3.4 Girassol® – protótipo desenvolvido no Brasil

Neste item foi desenvolvido o trabalho sobre o equipamento específico dessa pesquisa: o Girassol®. Aqui serão abordados os referenciais teóricos que técnicos que levaram à construção deste coletor solar.

O equipamento nomeado Girassol®, tem um sistema de captação e direcionamento da luz natural para edificações que utiliza a fibra óptica. É considerado eletrônico por ser capaz de acompanhar o deslocamento do sol e sempre manter um ângulo de máxima captação de luz.

Esse equipamento é colocado no exterior da edificação. O Girassol® é, enfim, um captador da luz solar formado por sete lentes captadoras dos raios solares, colocadas na extremidade de um cabo de filamentos de fibra óptica polimérica. Devido ao seu mecanismo giratório, capta o máximo da luminosidade da trajetória do sol durante um dia (PURIM et al., 2015).

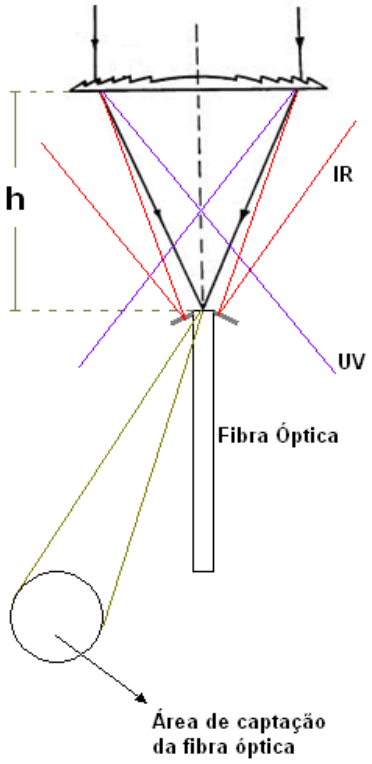
Um raio de luz do espectro visível possui inúmeros comprimentos de onda. Quando passa de um meio para o outro, os comprimentos de onda e suas velocidades se modificam em função da refração, a frequência permanece a mesma. A reflexão é a responsável por gerar desvio da luz nessa transição.

Considera-se que em um sistema com apenas duas interfaces ar-vidro, 8,4% será a reflexão da luz, aproximadamente. Na faixa de espectro visível a reflexão da luz diminui, quanto mais perto do vermelho, e, inversamente aumenta para o lado oposto (PURIM et al., 2015).

A escolha da utilização de lentes do tipo Fresnel para captação da luz solar e direcionamento até a fibra foi devido a vantagens quanto a peso, preço e espessura. Também foi verificado que a capacidade de focalização se assemelhou a uma lente convencional. A escolha pelo acrílico levou em conta sua massa, oito vezes menor que a de uma lente de vidro com as mesmas especificações. "Além disso, gerou um ponto colimado[16] menor do que a lente de vidro, injetando uma maior quantidade de luz para dentro da fibra" (PURIM et al., 2015, p. 4). O aquecimento ocasionado pelo acrílico pôde ser resolvido através da projeção da lente para que, numa determinada distância da fibra óptica fique com os focos dos raios ultravioleta e infravermelho desfocados desta, conforme Figura 90.

[16] Redirecionamento dos raios de luz concentrando-os em determinada direção.

Figura 90 – Esquema de solução para radiação infravermelha e ultravioleta



Fonte: Purim et al. (2015, p. 3).

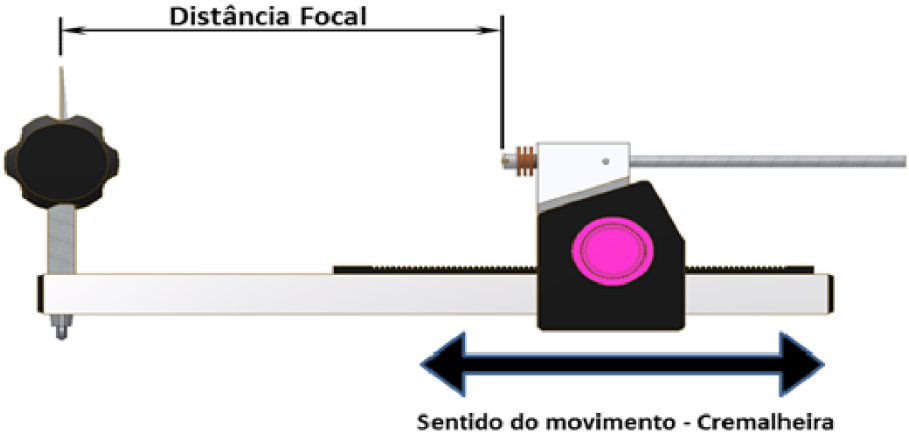
O protótipo analisado é considerado como a versão 4 de uma série de protótipos desenvolvidos. Com o conhecimento adquirido desde a versão 1, houve um progresso sobre o conhecimento óptico.

A maior importância dessa análise através dos protótipos foi a definição da distância focal para lentes Fresnel com 75 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

Se considerar o modelo inicial elaborado por Purim, o Girassol® está em sua quinta geração.

Para estudar o processo de desenvolvimento até o protótipo atual, iniciaremos com as primeiras análises feitas no protótipo 1. Este protótipo permitiu variar, com precisão, a distância focal através de uma transmissão por cremalheira, conforme Figura 91.

Figura 91 – Ajuste do foco com cremalheira



Fonte: Purim et al. (2015, p. 4).

A distância, da extremidade da fibra, que melhor mostrou a coloração com maior intensidade e aproximação da luz branca foi a de 16 mm. A proximidade da lente torna a luz azulada e o distanciamento, amarelada. Tal variação na coloração da luz, demonstra a aberração cromática (PURIM et al., 2015).

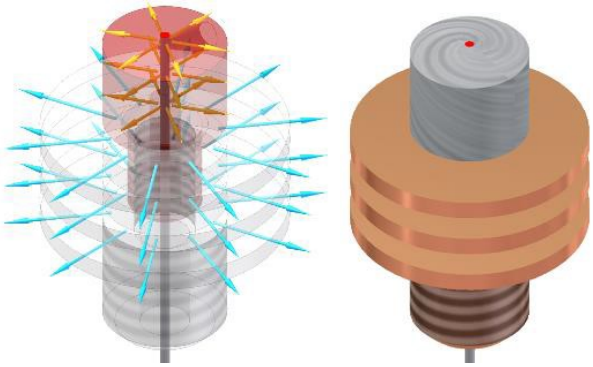
Os testes iniciais mostraram que não seria possível trabalhar com a fibra sem um sistema de dissipação de calor. A concentração de calor derreteria as extremidades da fibra. Por esse motivo, foi escolhida a fibra de acrílico que é polimérica e, oferece ótimas características ópticas. Sua temperatura de trabalho é pouco elevada. Além disso, a condutividade térmica é baixa, o que dificulta as trocas de calor geradas pela interação da luz com a matéria.

Por esse motivo, o diâmetro da fibra óptica foi reduzido para se obter um fluxo de calor menos elevado do que seria obtido se a espessura da fibra fosse duplicada.

A fibra óptica de 0,75 mm tornou-se inviável porque convergia toda a luz da lente para si mesma por causa da área reduzida. Desta forma, o feixe luminoso sofreu perda significativa. A fibra óptica de 1mm fundiu sua extremidade em alguns testes com temperatura elevada. A opção foi a escolha pelas fibras ópticas de 1,5 mm (PURIM et al., 2015).

Esta estrutura, como foi projetada, proporciona um equilíbrio térmico quanto ao transporte de calor. Na conformação apresentada pela fibra, o fluxo de calor ocorre pela lateral, ou seja, no sentido radial a partir da fibra e não ao longo dela. O ponto onde o sol incide, primeira porção de calor, é mais quente. Os dissipadores foram colocados para aumentar a difusão no sentido radial a partir da fibra (Figura 92).

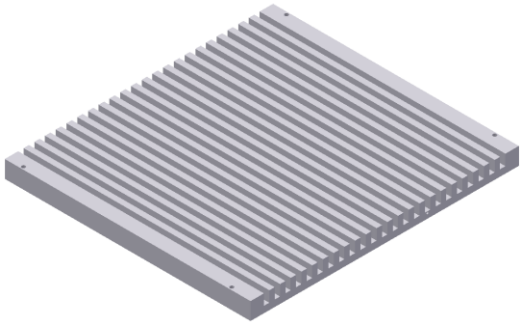
Figura 92 – Esquema de montagem da fibra óptica no sistema de dissipação de calor



Fonte: Purim et al. (2015, p. 5).

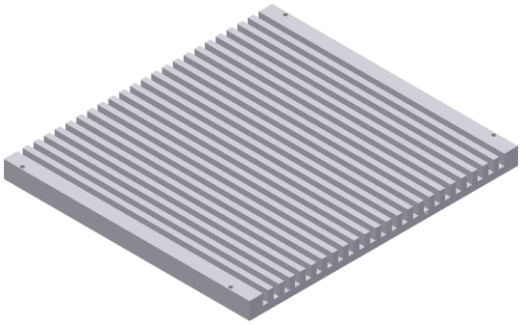
Determinado o foco de 116 milímetros, iniciou-se o segundo protótipo montado com sete lentes em paralelo em um único sistema. Inicialmente a maior preocupação foi a temperatura na entrada da fibra óptica. Para evitar o aumento da temperatura além do limite aceitável, foi projetado um dissipador térmico. A opção pelo alumínio foi feita porque o material comprovou bom rendimento nas simulações térmicas e o custo é menor (Figuras 93 e 94).

Figura 93 – Dissipador térmico do protótipo 2



Fonte: Purim et al. (2015, p. 5).

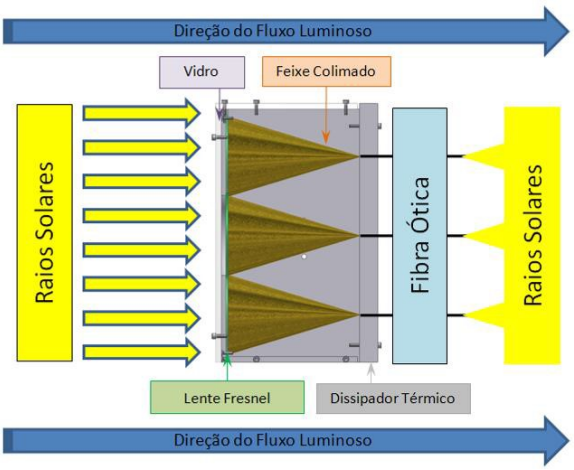
Figura 94 – Ilustração do protótipo 2



Fonte: Purim et al. (2015, p. 5).

Nas palavras de Purim et al. (2015, p. 5), “de maneira simplista, pode-se dizer que este protótipo é um invólucro composto por um vidro comum, suporte para lentes, dissipador térmico e fibra óptica”. A Figura 95 ilustra a disposição desses itens e o sentido do fluxo luminoso no protótipo.

Figura 95 – Direção do fluxo luminoso no protótipo 2



Fonte: Purim et al. (2015, p. 5).

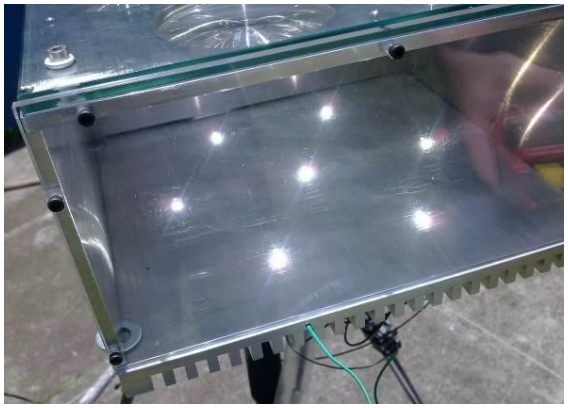
Devido à grande distância entre o Sol e a Terra, os raios luminosos chegam paralelos em nossa superfície. Quando estes raios incidem sobre as lentes Fresnel, convergem diretamente para a entrada da luz na fibra.

É necessária uma proteção de vidro, na entrada do sistema, para as ranhuras circulares e concêntricas, existentes em uma das faces da lente Fresnel. Estas, devem ser colocadas na direção contrária ao sentido dos raios solares, do lado de fora do sistema. Sem a devida proteção, a poeira e outras impurezas prejudicariam a lâmina polimétrica que compõe a lente.

Ao vidro, pode ser atribuída a função de filtro óptico, devido à variação da absorção com o comprimento de onda.

O ponto onde entra a luz na fibra é o ponto com maior temperatura (Figura 96).

Figura 96 – Ponto de luz na entrada das fibras do protótipo 2



Fonte: Purim et al. (2015, p. 6).

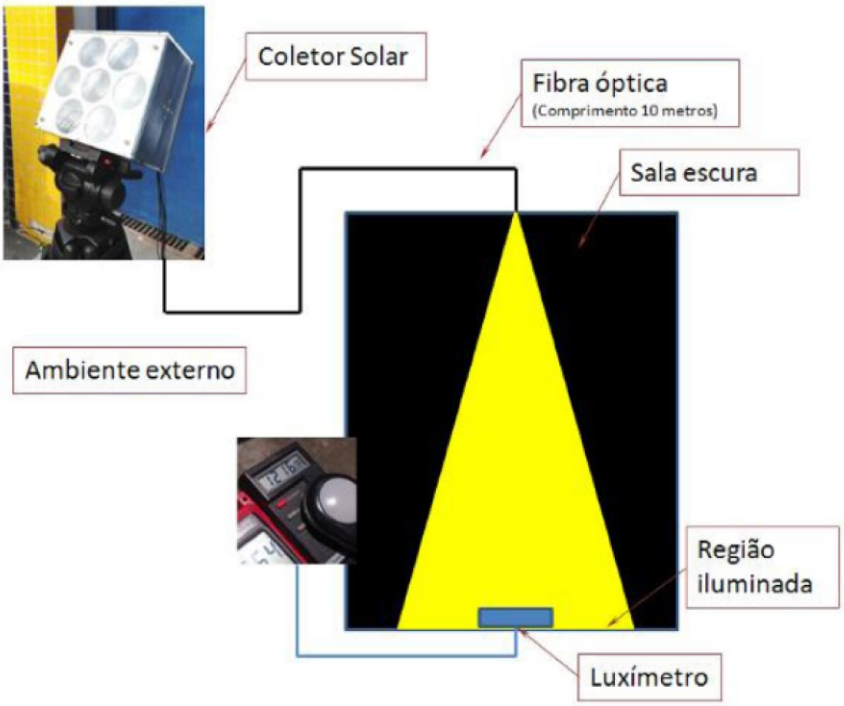
Nos primeiros testes feitos com o protótipo 2, com iluminância próxima a 121.600 lux a 35 décimos de milímetro do ponto de incidência do feixe colimado na fibra, a temperatura

não ultrapassou 43 ºC, registrado no termopar. O sistema de dissipação de calor demonstrado é eficiente, pois, a temperatura se manteve próxima da temperatura ambiente na sombra. A placa dissipadora do calor fica neste mesmo ambiente.

Observou-se ainda que a temperatura, até as 14 horas, atingiu 42 ºC no máximo, diminuindo até 37 ºC depois deste horário.

Para medição de luminotécnica, foi feito um ensaio de acordo com o desenho esquemático apresentado na Figura 97.

Figura 97 – Esquema de método de medida da iluminância



Fonte: Purim et al. (2015, p. 6).

Conforme a ilustração, a distância entre o ponto de saída de luz e a parede é de 1,50 m. Neste ensaio, o luxímetro chegou a medir 810 lux no centro de uma circunferência de 1,40 m. Com esses números foi possível encontrar o valor de 1.246 lm no final do seu fluxo luminoso.

Todo o diâmetro circunferencial de 1,40 m foi iluminado com 810 lux de iluminância. O fluxo total é 3.760 lm. Para se chegar a este resultado foi preciso saber a área de captação do sistema e a iluminância solar. O valor da temperatura também foi observado, comprovando a eficiência da placa dissipadora. Ao final de um dia de teste contínuo, as fibras não apresentaram qualquer sinal de queima ou derretimento.

Quanto à parte mecânica, para rotação do protótipo acompanhando o movimento do sol, foi feito esse sistema que considera o movimento circular do sol variando em 15º/hora, o que possibilitou definição da velocidade angular e de rotação desta parte.

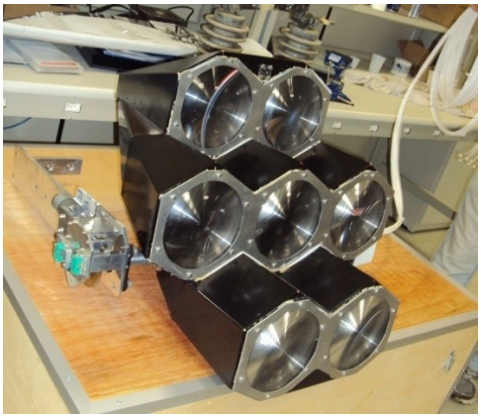
A Figura 98 representa um coletor de sete lentes com o sistema mecânico descrito. A rotação acontece na direção leste/oeste e também na direção vertical acompanhando o percurso do sol. Se o Girassol® tiver o giro forçado além do que projetado, terá seu sistema danificado.

Figura 98 – Transmissão coroa-eixo sem fim

Fonte: Purim et al. (2015, p. 97).

Com base nos estudos feitos para os protótipos 1 e 2, foi feita uma parceria com o Dr. Walter Antonio Kapp, consultor em óptica e mecânica da empresa EngeMovi para desenvolver um terceiro protótipo objetivando alcançar maiores valores de iluminância. O coletor solar desenvolvido partiu da necessidade de uma melhor aerodinâmica para se contrapor a ventos. O material escolhido, alumínio naval, tem excelente resistência às intempéries. Em cada uma das sete entradas foi colocada uma lente Fresnel de 16 mm de diâmetro obtendo, assim, uma área maior de captação de luz solar em relação ao Protótipo II, de forma a se obter maior iluminância no final do conjunto – fibra óptica (Figura 99).

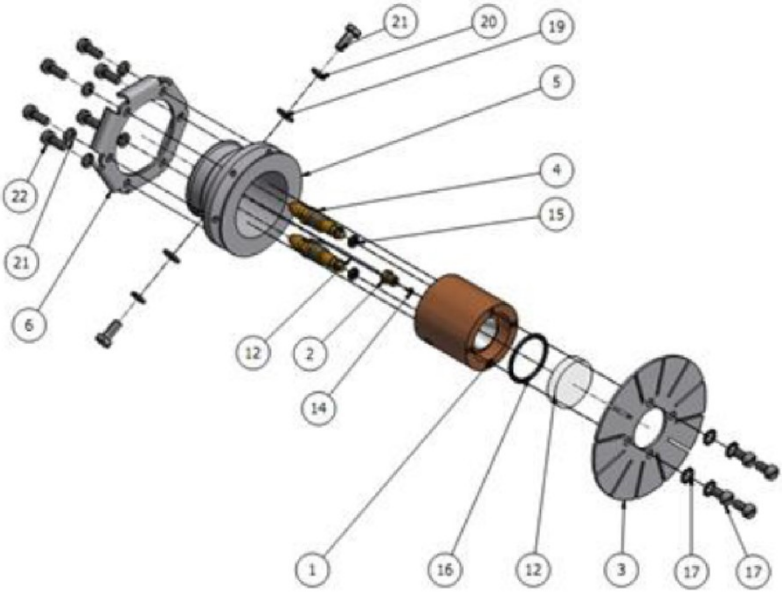
Figura 99 – Protótipo 3



Fonte: acervo pessoal.

A lente de Fresnel fica na entrada, e, além dela, há uma outra côncava em seu interior localizada num conjunto de acoplamento óptico que é capaz de concentrar a maior parcela de luz colimada pela primeira lente e projetá-la na entrada da fibra. Sendo a área de captação muito maior que a do modelo anterior, o calor gerado aumenta devido à maior concentração de energia. Para aumentar o resfriamento foi utilizada a água deionizada como fluido refrigerante dentro do coletor, preenchendo o espaço entre a lente côncava e a fibra. Além disso, o próprio corpo do dispositivo, construído em alumínio naval, também dispersa o calor pela carcaça do coletor, baseando-se na Lei de Fourier (Figura 100).

Figura 100 – Conjunto de acoplamento óptico



Fonte: Purim et al. (2015, p. 8). O autor numerou as partes do conjunto, mas não as nomeou.

Para realizar a inserção das fibras e melhorar a transferência de calor da ponta de cada fibra ao conjunto de acoplamento, foi projetado um pequeno bujão de cobre (Figura 101).

Figura 101 – Inserção das fibras nos bujões

Fonte: Purim et al. (2015, p. 8).

Após a fabricação das peças do coletor e do acoplamento, ambos foram montados. Então, foi inserida luz na fibra para fazer o alinhamento do conjunto. Após o alinhamento, a montagem do protótipo foi finalizada (Figura 102).

Figura 102 – Protótipo 3

Fonte: Purim et al. (2015, p. 9).

Os protótipos 2 e 3 utilizaram o mesmo sistema de controle eletrônico e programação. O software utilizado para a programação do Firmware foi o IAR. O Firmware, que faz a rotina da programação do motor, precisa ser cuidadosamente detalhado pois é o responsável por todo o funcionamento mecânico do Girassol®. Qualquer erro de programação pode atrapalhar a

rotina que o coletor deve seguir para acompanhar a luz solar (PURIM et al., 2015). Essa rotina determina o correto posicionamento do Girassol® em relação ao sol. O sistema também é composto por sensores que auxiliam no correto posicionamento.

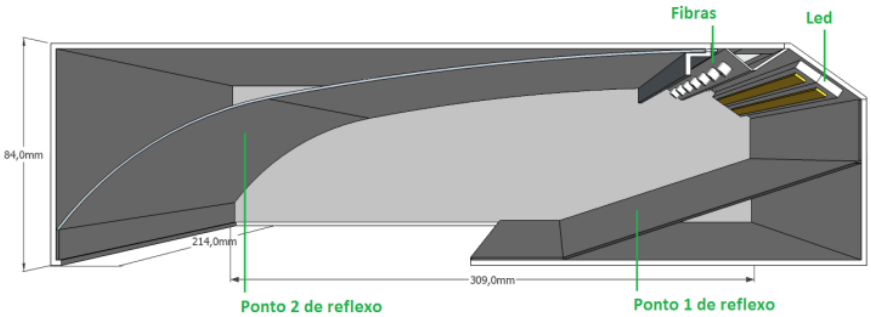
O atual modelo, utilizado neste experimento, teve seu sistema de operação de posicionamento modificado devido ao fato de os anteriores apresentarem sensibilidade excessiva à luz prejudicando a estabilidade do sistema. O atual modelo tem como referência a quantidade de luz percebida pelo ser humano. Uma nova rotina foi criada priorizando o posicionamento das lentes sempre ortogonal aos raios solares (PURIM et al., 2015).

O atual protótipo reapropria o formato do protótipo II estruturando o conjunto em:

- coletor (onde ficam as lentes);
- garfo (estrutura para segurar o coletor e também responsável por direcioná-lo); e
- base (estrutura de apoio ao conjunto e abrigo de toda parte de Firmware do sistema).

Como fonte de saída para a fibra óptica iluminar o ambiente, foi projetada uma luminária com mecanismo semelhante à de uma luminária indireta. A saída de luz das fibras vem da parte superior que reflete na superfície espelhada diagonal existente no lado direito da Figura 103, chamada de Ponto 1. A barra de LEDs que também ilumina a mesma superfície, reflete na chapa curvada na parte oposta (Ponto 2), a que por fim fará a reflexão de toda a luz no ambiente (Figura 103).

Figura 103 – Modelagem da luminária



Fonte: Purim et al. (2015, p. 10).

No Ponto 1 encontra-se um sensor de luminosidade que verifica a atual condição de iluminação. Esse sensor é conectado a um controlador que faz sua leitura e caso o valor atual seja menor do que um valor pré-determinado, a barra de LEDs é acionada e o controle de

intensidade com sinal pwm[17] é realizado. Seu firmware possui controlador de malha fechada, em que o sinal de erro é a diferença entre o iluminamento atual e o pré-definido. Dessa forma, o usuário do sistema não percebe possíveis variações de luz vinda das fibras, pois o LED atuará compensando a falta de luz natural sempre que necessário.

Segundo testes realizados pelos autores dos protótipos, foi observado que a fibra perde 2,73% da luz projetada em sua entrada, a cada metro. O modelo SP3 da Parans foi utilizado para padrão comparativo dos resultados. Os testes comparam lux, lúmen e temperatura e foram feitos na esfera "geradora" disponível no laboratório de luminotecnia do LACTEC.

Analisando os números e considerando a qualidade da fibra óptica utilizada, o resultado dos protótipos teve desempenho superior. O SP3 conta com mais lentes e fibras para captação da luz solar e por isso seu desempenho final é superior (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7 – Comparativo de fluxo por metro por fibra

	5 m (lm)	**10 m (lm)**	**15 m (lm)**	**20 m (lm)**
Parans SP3A	121,67	101,67	85,00	71,67
Lactec II	183,24	160,06	139,38	121,36
Lactec III	157,41	137,07	119,35	103,92

Fonte: Purim et al. (2015, p. 11).

Tabela 8 – Comparativo de equipamentos em lumens

	5 m (lm)	**10 m (lm)**	**15 m (lm)**	**20 m (lm)**
Parans SP3A	4.360	3.670	3.090	2.590
Lactec II	1.283	1.120	976	850
Lactec III	1.102	959	835	727

Fonte: Purim et al. (2015, p. 11).

A eficiência energética foi analisada comparando-se os dois equipamentos com uma lâmpada de luz fria, comercial: Osram DST Stick 20 (Tabela 9).

Tabela 9 – Comparativo com lâmpada comercial

	Lumens	**Watt/h**
Osram DST Stick 20	1.170	20
Lactec II	1.283	0,115
Lactec III	1.102	0,115

Fonte: Purim et al. (2015, p. 12).

[17] Sinal "pwm" ou "Pulse-WidthModulation": é um parâmetro do circuito que coleta constantemente a luz externa (por um sistema de *feedback* que é chamado "circuito de malha fechada"). É "modulação por largura de pulso", ou seja, um método para controle de tensão/potência (*dimmers* de luz).

Com base em todo o estudo apresentado é que foi viabilizada esta pesquisa. O Girassol® não pôde ser testado por longo período, nem com disponibilidade de outras fontes de iluminação nas mesmas condições. Por esse motivo, esse estudo pretendeu testar o equipamento pelo período de um ano e fazer uma análise comparativa com as atuais tecnologias mais comumente utilizada (lâmpadas).

3 METODOLOGIA

O capítulo anterior apresentou o Girassol®, coletor solar desenvolvido pelo instituto LACTEC e os estudos feitos pela instituição sobre o equipamento. A proposta desta pesquisa foi testar o Girassol® em um ambiente controlado e comparar seu resultado com o desempenho de lâmpadas disponíveis no mercado submetidas às mesmas condições de teste. Este teste nunca foi realizado visando analisar a viabilidade do equipamento.

A realização deste experimento contou com a colaboração de dois dos laboratórios pertencentes ao Instituto de Arquitetura da Universidade de São Paulo no campus 1 em São Carlos: o Laboratório de Construção Civil (LCC) e o Laboratório de Conforto Ambiental. A parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), localizado em Curitiba, PR, foi fundamental pois cedeu o Girassol® para testes nunca antes realizados. Houve grande colaboração para conhecimento do equipamento e aperfeiçoamentos necessários durante o experimento. Também colaboraram para a realização desta pesquisa o Grupo de Óptica do Departamento de Física e Ciência de Materiais do Instituto de Física da Universidade de São Paulo no campus 1 em São Carlos (Latitude: 22° 01' Sul e Longitude: 47° 54' Oeste).

Para análise do Girassol® foi montada uma estrutura adequada com captação ideal da luz solar pelo coletor e encaminhamento até um ambiente monitorado especialmente criado para controlar a luz emitida pelo Girassol®. A estrutura foi localizada no campus 1 da Universidade de São Paulo em São Carlos, próxima ao Laboratório de Construção Civil em uma área onde foram construídas várias unidades de construção para testes *in loco* de pesquisas desenvolvidas na USP São Carlos, denominadas "células". A célula escolhida foi a número 11 devido ao seu posicionamento e condições ideais da construção para o experimento proposto como ilustra as Figuras 104 e 105.

Figura 104 – Localização da área das células teste e da célula teste 11

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 105 – Célula teste 11 construída para instalação do equipamento

Fonte: acervo pessoal.

A célula teste com dimensão de 4 m², 2 × 2 m, teve seu interior todo vedado para que nenhuma iluminação externa entrasse no ambiente. O interior foi todo pintado de preto para se tornar um ambiente controlado, minimizando fenômenos de reflexão da luz. Assim, os valores obtidos no experimento podem ser considerados os valores mínimos possíveis para iluminação. Em um ambiente onde se permite a reflexão da luz, os índices de iluminação variam e aumentam em relação a um ambiente sem nenhuma reflexão. A Figura 106 mostra as paredes pintadas com tinta preta fosca. A iluminação que aparece na foto é da luz externa quando a porta da célula está aberta. Quando fechada, o ambiente torna-se totalmente escuro.

Figura 106 – Interior da célula teste 11

Fonte: acervo pessoal.

À frente da célula teste foi montada uma estrutura para a instalação do Girassol®. Como mostra a Figura 107, a área foi cercada para a proteção do equipamento e no centro foi feita uma estrutura de concreto que elevou o equipamento a uma altura de 1,30 m em relação ao chão. A estrutura, medindo 90 × 90 cm foi apoiada em pilares de madeira. A área cercada para proteção da instalação é de 2,00 × 2,00 m. A altura da tela de proteção não interfere na captação da luz solar.

Figura 107 – Estrutura montada para a instalação do Girassol®

Fonte: acervo pessoal.

O Girassol® foi instalado em cima da base de concreto, parafusado para garantir a sua estabilidade e direcionado para o Norte, conforme orienta o manual de instalação. Foi ligado à uma fonte elétrica de 110 volts, também instalada na base. A partir do momento em que é ligado ele se calibra automaticamente nas direções leste e oeste para acompanhar o movimento do sol e procurar a máxima captação de sua luz (Figura 108).

Figura 108 – Coletor solar Girassol® instalado na base de concreto em fase de calibração

Fonte: acervo pessoal.

Os cabos de fibra óptica instalados no coletor do Girassol® foram encaminhados e fixados na célula teste 11 juntamente com a luminária encaminhada pelo LACTEC. Os cabos foram instalados na luminária, conforme instrução do LACTEC e a mesma, instalada na célula teste 11, tornando-se a fonte de iluminação do ambiente (Figuras 109 a 114).

Figura 109 – Detalhe dos cabos de fibra óptica acoplados ao coletor

Fonte: acervo pessoal.

Figura 110 – Espaço na célula teste para instalação da iluminária

Fonte: acervo pessoal.

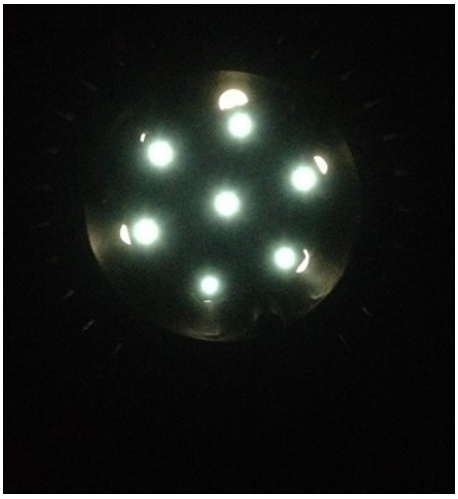
Figura 111 – Luminária projetada pelo LACTEC para a instalação dos cabos de fibra óptica

Fonte: Purim et al. (2015).

Figura 112 – Instalação dos cabos de fibra óptica na luminária

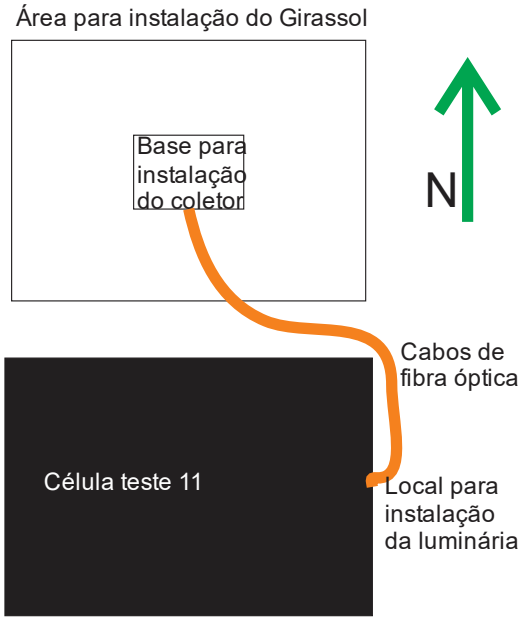
Fonte: acervo pessoal.

Figura 113 – Luminária instalada na célula teste 11



Fonte: acervo pessoal.

Figura 114 – Esquema em planta baixa da instalação completa do Girassol®



Fonte: acervo pessoal.

Os equipamentos utilizados nas medições de iluminação do experimento foram: o espectrofotômetro USB2000®, Ocean Optics, Palo Alto CA acoplado a um sistema de detecção com um laptop adaptado para se tornar portátil (Figura 115) para identificar os comprimentos de onda das fontes de iluminação em análise (cedido pelo Departamento de Física e Ciência de Materiais do Instituto de Física da Universidade de São Paulo); o luxímetro (Figura 116) para quantificar a emissão de lux (medida padrão adotada pela norma técnica ABNT NBR-ISO nº 8.995/2013 de iluminação); e o luminancímetro (Figura 117) para quantificar a emissão de lúmens (medida padrão para projeto luminotécnico). Os dois últimos equipamentos foram cedidos pelo Laboratório de Conforto Ambiental do IAU-USP-SC.

Figura 115 – Espectrofotômetro USB2000

Fonte: acervo pessoal.

Figura 116 – Luminancímetro LS 100

Fonte: acervo pessoal.

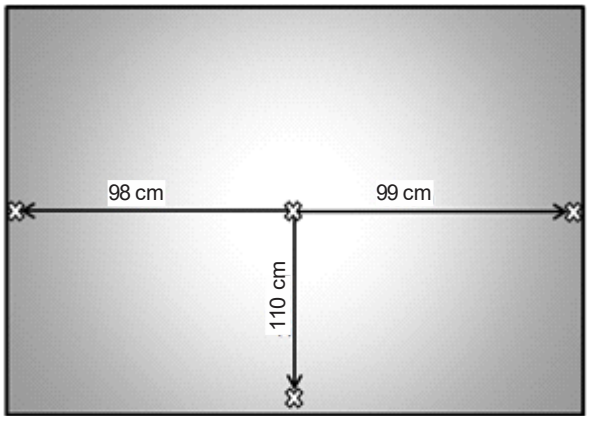
Figura 117 – Luxímetro Panlux Electronic 2P

Fonte: acervo pessoal.

Para fazer as medições dos níveis de iluminação do Girassol® obtidos no interior da célula teste, a luminária foi instalada no centro da parede. Com a luz emitida pela luminária foi localizado o ponto central da parede oposta, considerando as medidas da altura e da lateral da parede onde a luminária foi instalada. Assim, o ponto central da parede a ser utilizado nas medições foi marcado e sua localização ficou 98 cm distantes da parede à esquerda e 99 cm a

esquerda da parede à direita. A altura do ponto ficou a 1,10m do piso. A Figura 118 mostra a localização deste ponto. A distância entre a fonte de iluminação e o ponto central da parede oposta é de 2 m. Essa distância, segundo a norma técnica ABNT NBR-ISO nº 8.995/2013 de iluminação é a distância normalmente adotada entre a fonte de iluminação instalada no teto até a área de trabalho. Essa distância foi adotada para todos os testes, seguindo orientações da citada norma. Os pontos indicados são onde serão feitas as medições. O ponto central é utilizado tanto para medir lux quanto lumens da fonte.

Figura 118 – Representação da parede em que foi projetada a luz

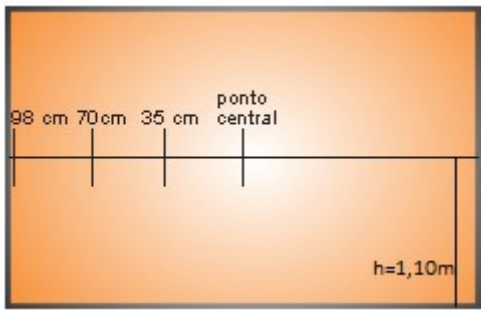


Fonte: elaborado pela autora.

Para a medição das iluminâncias e luminâncias das lâmpadas escolhidas para análise comparativa com o Girassol®, as lâmpadas foram colocadas no mesmo ponto de instalação da luminária e direcionadas para a parede oposta seguindo os padrões determinados para o Girassol®. Essa medição se torna necessária pois para análise do equipamento é necessário que o mesmo seja exposto às mesmas condições de funcionamento que as demais fontes de iluminação com as quais foi comparado.

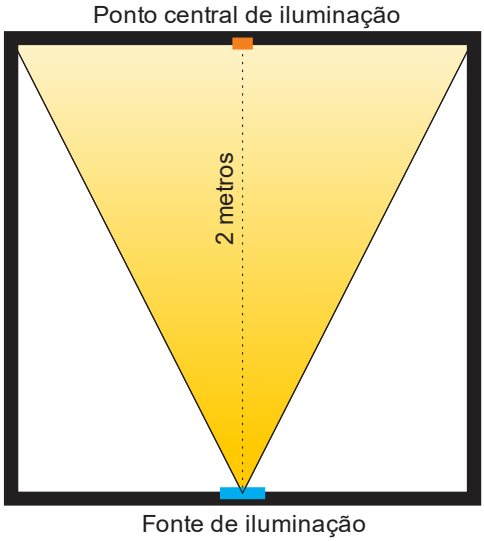
O interior da célula 11 foi planejado para executar o experimento tendo sido, como já dito, todo pintado com tinta preta fosca para evitar qualquer interferência na reflexão da luz. A Figura 120 mostra a planta baixa da célula teste com a instalação feita. As Figuras 121 e 122 mostram a vista da parede oposta à iluminação com as marcações necessárias para medição dos pontos de luz. A partir do ponto central, foi possível criar circunferências de raio de 35, 70 e 98 cm. Assim, foi marcado o ponto central de iluminação e à sua esquerda, pontos a 35, 70 e 98 cm, respectivamente. Foi considerado que qualquer ponto pertencente às circunferências mostraria os mesmos resultados dos pontos marcados. Ainda assim, foram feitas algumas medições que comprovaram esta hipótese. A Figura 119 mostra os pontos de medição marcados na parede como referência para todas as medições.

Figura 119 – Esquema do posicionamento dos pontos de medição na parede da célula teste na parede em que a luz foi projetada.



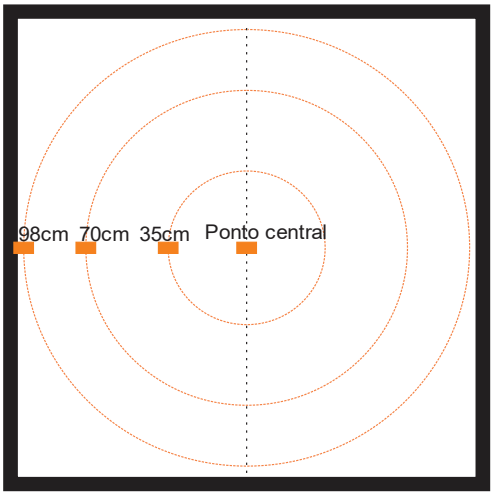
Fonte: acervo pessoal.

Figura 120 – Planta esquemática da célula teste 11 e da instalação do Girassol®



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 121 – Esquema da parede da célula teste 11 que foi projetada a luz com os pontos referenciais para a medição



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 122 – Vista da área iluminada

Fonte: acervo pessoal.

Após a instalação do Girassol®, as medições tiveram início no mês de outubro de 2015 com o espectrofotômetro. Os resultados serão apresentados no próximo capítulo. Após essas medições o Girassol® ficou instalado conforme orientação do Instituto LACTEC.

Em novembro de 2015 foi necessário enviá-lo para Curitiba por não ter apresentado resistência às intempéries, por se tratar de um protótipo. Em dezembro do mesmo ano, o LACTEC notificou sobre os danos e os procedimentos a serem feitos no Girassol®. O equipamento teve seu motor danificado devido à entrada de água em sua base. A parte superior (o coletor) teve que ser aberta para retirada da água também infiltrada em suas lentes, como mostra a Figura 123.

Figura 123 – Água acumulada nas lentes do coletor Girassol®

Fonte: acervo pessoal.

Em março de 2016, com a minha presença e acompanhamento no Instituto LACTEC em Curitiba, foram feitos os ajustes necessários no Girassol® para sua correta reinstalação em

São Carlos. Chegou-se à conclusão que seria necessária a proteção do equipamento para que pudesse ficar instalado por um ano inteiro. Em maio de 2016 o Girassol® foi reinstalado, seguindo a nova orientação de proteção. Foi colocado um "tambor" por cima do Girassol®, sendo o mesmo então ligado somente nos momentos de teste (Figura 124).

Figura 124 – Tambor utilizado para proteção do Girassol®

Fonte: acervo pessoal.

Também foi instalada uma placa acrílica em sua parte superior do Girassol® o que possibilitou visualizar os raios da captação solar durante o controle de rotação do Girassol® posicionando o coletor de forma a observar corretamente a orientação da luz do sol até os pontos das fibras ópticas (Figura 125).

Figura 125 – Raios de luz sendo orientados para os pontos de fibra óptica

Fonte: acervo pessoal.

Ainda em Curitiba, foi identificada a necessidade de facilitar a operação manual do Girassol®. Esse controle manual foi instalado na base do Girassol® e seu acionamento feito com ímã. O ímã posicionado nos locais indicados possibilitou o movimento do Girassol®

horizontalmente e verticalmente de forma manual. Este controle foi necessário pois não foi possível ajustar a calibração automática do Girassol®. O dano em sua configuração não foi identificado.

As medições foram reiniciadas em junho de 2016 e duraram por cinquenta e duas semanas, totalizando um ano de medição. O Girassol® somente é capaz de coletar luz do sol com dia claro e sem nuvens. As medições foram realizadas uma vez por semana nos horários de 9, 12 e 15 horas, preferencialmente às quartas-feiras (por ser o dia no meio da semana que possibilitou a organização da medição na segunda e terça e caso acontecesse algum imprevisto, ainda seria possível medir nos demais dias), podendo variar de acordo com a disponibilidade do sol no céu. Em algumas semanas não foi possível medir em nenhum dia da semana, como mostram os gráficos de medições e por isso não há inserção de dados nessas semanas. No total das cinquenta e duas semanas, dez não possibilitaram a captação da luz solar pelo Girassol® em função do céu permanecer encoberto ou chuvoso e o Girrassol® ser capaz de fazer captação da luz solar nessas condições. Este valor representa 19% aproximadamente do ano, o que indica a necessidade de um aperfeiçoamento no Girassol®. Quanto à luminária, desenvolvida com base em luminária para LED, o trabalho do Purim et al. (2015) já mostra outras possibilidades para melhor propagação da luz. No entanto, a única luminária executada pelo laboratório LACTEC foi a utilizada nestes experimentos.

Reconhecer a metodologia aplicada neste experimento é de grande importância pois se trata de uma simulação em ambiente controlado, mas é diferente das condições em que as lâmpadas são testadas por seus fabricantes. Nos laboratórios das empresas, é utilizado um instrumento óptico chamado esfera integradora. Ele simula um ambiente com iluminação homogênea e obtém dados a partir desta condição. Por esse motivo, os valores obtidos no experimento aqui descrito diferenciam-se dos valores fornecidos pelos fabricantes como mostram as Tabelas 10 e 11. Os valores fornecidos pelos fabricantes foram determinados com teste em esfera integradora (equipamento específico para esta função) nas condições em que as normas estabelecem para indústrias. Os resultados obtidos nos experimentos deste trabalho foram obtidos nas mesmas condições em que o Girassol® foi exposto. Por não sofrerem interferência externa, os valores permaneceram constantes. Estes valores foram checados ao longo de todo o período deste estudo.

Tabela 10 – Resultados do experimento com fontes de luz artificiais e medição em lumens

Fontes de luz	Ponto central
Lâmpada incandescente refletora Concentra Øsram 60 w - spot	4,69
Lâmpada de LED 9 – 60 w clara fria Philips 6500	39,09
Lâmpada fluorescente compacta 23 w branca neutra Øsram	23,65
Lâmpada de LED 6 w branca fria Superled 60 Ourolux	10,66
Lâmpada fluorescente compacta econômica 18 w luz branca intensa – FLC	25,34
Lâmpada fluorescente compacta econômica 15 w luz branca morna – FLC	15,08
Lâmpada fluorescente compacta econômica 15 w luz branca – FLC	10,37

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 11 – Resultados do experimento com fontes de luz artificiais e medição em lux nos mesmos pontos onde serão feitas as medições com o Girassol®

Fonte de luz	Ponto central	35 cm	70 cm	98 cm
Lâmpada incandescente refletora Concentra Øsram 60 w - spot	80,00	36,00	26,00	15,00
Lâmpada de LED 9 – 60 w clara fria Philips 6500	36,00	29,00	30,00	30,00
Lâmpada fluorescente compacta 23 w luz branca neutra Øsram	25,00	22,00	21,00	24,00
Lâmpada de LED 6 w branca fria Superled 60 Ourolux	15,50	12,50	23,00	17,50
Lâmpada fluorescente compacta econômica 18 w luz branca intensa – FLC	22,00	20,00	19,00	17,00
Lâmpada fluorescente compacta econômica 15 w luz morna – FLC	17,00	14,00	15,00	9,00
Lâmpada fluorescente compacta econômica 15 w luz branca – FLC	14,00	13,00	12,00	8,00

Fonte: elaborada pela autora.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

A primeira medição foi realizada em outubro de 2015. Esse experimento teve como foco estabelecer parâmetros dos comprimentos de onda emitidos pelo sol, pelo Girassol® e pelas lâmpadas selecionadas. A segunda medição foi realizada no período entre junho de 2016 e maio de 2017, compreendendo o período de um ano (52 semanas). Para ambos os experimentos, os valores obtidos com as lâmpadas foram determinados como constante, uma vez que não sofrem alterações por influência do meio externo. Para confirmar esta suposição, ao longo de todo o período de testes foram feitas medições que comprovaram a hipótese que o Girassol® oferece melhor iluminação, tanto em quantidade como em qualidade que as lâmpadas usualmente utilizadas atualmente. As lâmpadas utilizadas foram especificadas no Capítulo 2.

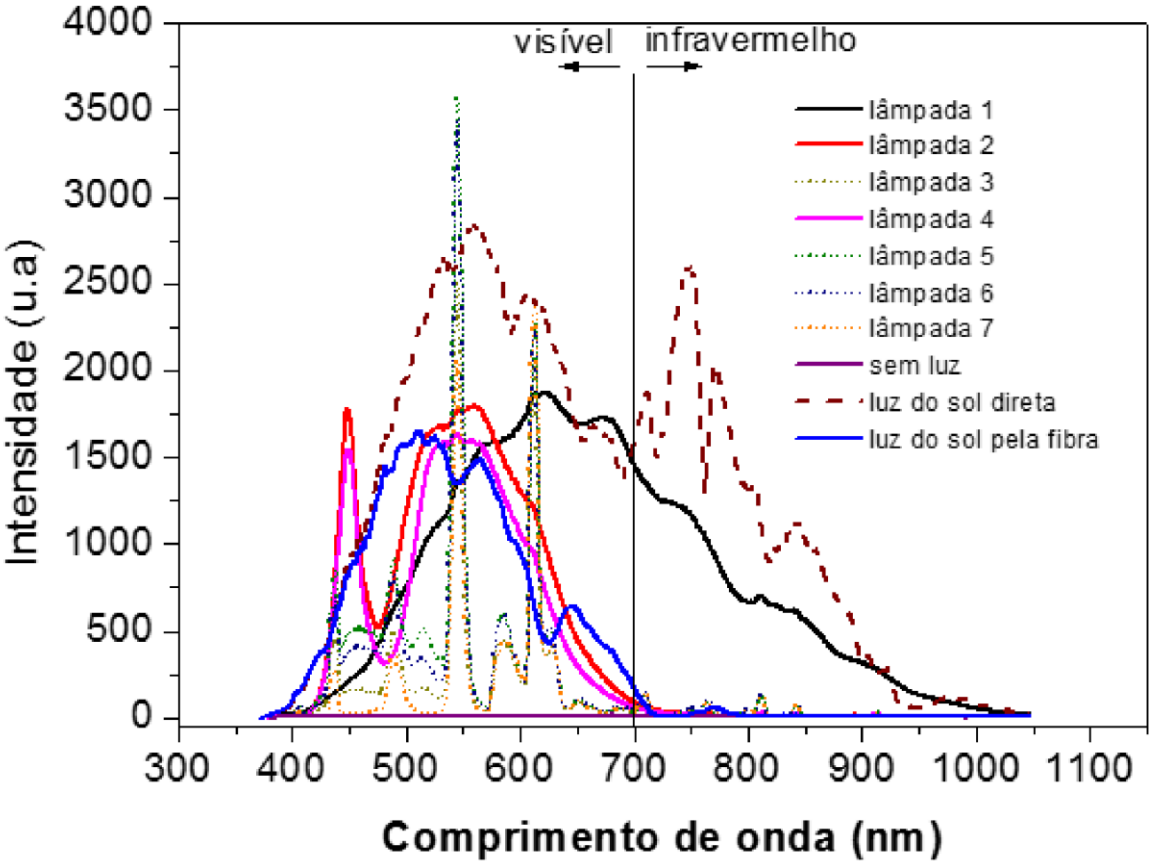
4.1 EXPERIMENTO COM ESPECTROFOTÔMETRO USB 2000

O objetivo deste experimento foi caracterizar a propagação de cada fonte de luz utilizada, considerando sua intensidade de acordo com cada comprimento de onda identificado. Para a intensidade, a unidade de medida utilizada foi arbitrária com valores absolutos. Importante destacar que houve um "ruído" no espectrofotômetro entre os comprimentos de onda de 700 e 800 nm. A Justificativa para isso se dá por alguma falha do equipamento (uma quebra na fibra, por exemplo). Por se tratar de um intervalo de onda que não interferirá diretamente nesta pesquisa, foi desconsiderado para análise de dados.[18] Também é importante ressaltar o uso da unidade arbitrária. O equipamento utilizado para fazer essa medição faz uma contagem de fótons de acordo com a exposição à luz. Assim, cria uma escala de intensidade relativa à quantidade de fótons captados e por isso é utilizada uma unidade arbitrária para quantificar, relativamente, os fótons captados que caracterizam os comprimentos de onda.

O Gráfico 1 apresenta todos os dados coletados. Apesar da quantidade de informações apresentadas nessa imagem, é importante ressaltar que somente a lâmpada incandescente refletora e a luz solar exibem os comprimentos de onda do infravermelho. Todas as demais lâmpadas e também a luz transmitida pela fibra óptica não têm propagação do infravermelho.

[18] Este estudo trabalha diretamente com o espectro visível, portanto radiação abaixo e acima deste intervalo não interferem nos resultados.

Gráfico 1 – Comparação entre os comprimentos de onda de todas as lâmpadas, a luz natural e a luz natural transmitida pelo Girassol®



Legenda:

Lâmpada 1	Lâmpada Concentra Spot Refletora OSRAM
Lâmpada 2	Lâmpada Duluxstar – Mini-Twist fluorescente – branca neutra OSRAM
Lâmpada 3	Lâmpada Fluorescente Compacta Econômica – branca intensa – FLC
Lâmpada 4	Lâmpada Mini PLE/compacta econômica – luz branca – FLC
Lâmpada 5	Lâmpada Mini PLE/compacta econômica – luz morna – FLC
Lâmpada 6	Lâmpada LED – clara fria – Philips
Lâmpada 7	Lâmpada LED – branca fria - Ourolux
Luz do sol direta	Luz obtida direcionando o espectrofotômetro diretamente para a luz solar
Luz do sol pela fibra	Luz obtida direcionando o espectrofotômetro para a saída de luz da luminária do Girassol®

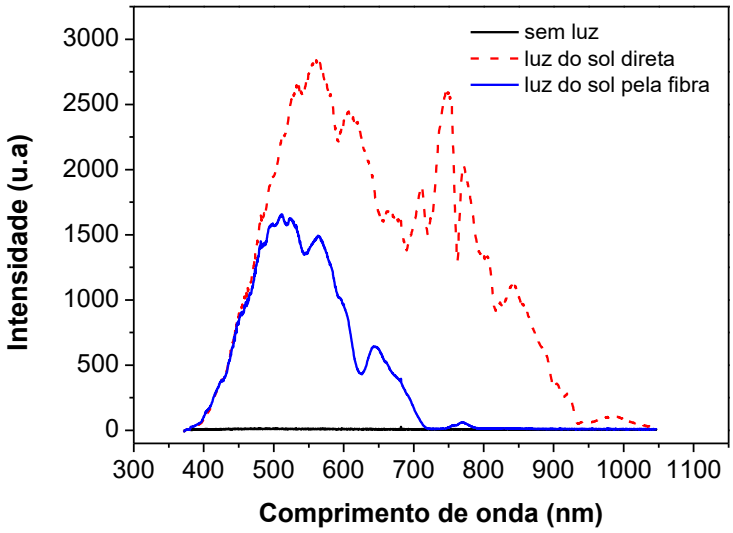
Fonte: elaborado pela autora.

Em uma primeira análise, foi possível perceber a variação dos comprimentos de ondas entre os tipos de lâmpadas apresentados e como eles diferem da luz natural. A variação da coloração das lâmpadas se dá de acordo com a presença de cada comprimento de onda que é identificado no gráfico.

Ao colocar o espectrofotômetro direcionado para a luz natural direta do sol e também para a luz saída da luminária, através da fibra óptica, pôde-se perceber que as duas têm um

padrão parecido em matéria de cor como mostra o Gráfico 2. Nota-se assim, que a fibra óptica transmite uma quantidade menor, em torno de 50% mas com uma variação semelhante de comprimento de ondas à luz do sol natural. Importante ressaltar que no gráfico da luz do sol natural é representado o comprimento de onda do infravermelho acima de 700. E, na luz que passa pela fibra óptica há uma redução brusca na condução nesse comprimento de onda mostrando que o infravermelho não passa pela fibra óptica, o que é uma característica ainda mais positiva da iluminação através desse sistema, pois inibe o aquecimento do ambiente.

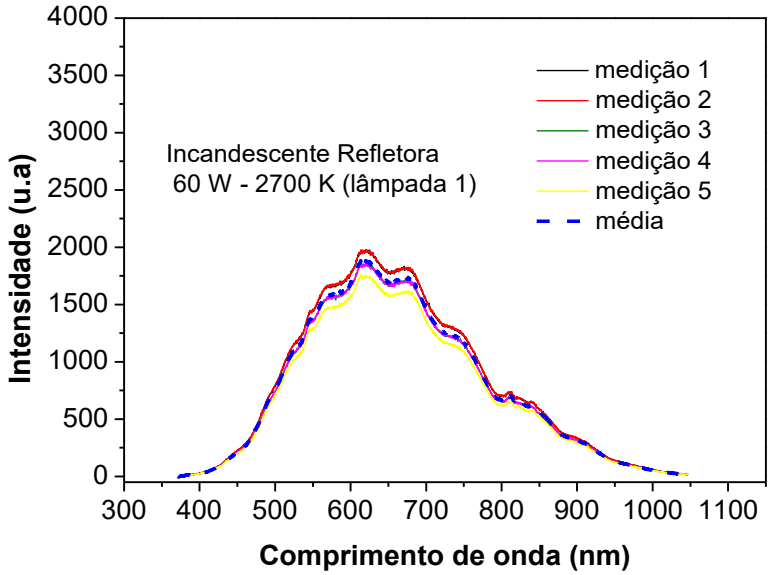
Gráfico 2 – Intensidade de luz x comprimento de onda de luz de iluminação solar direta (vermelho) e da iluminação após ter passado pelo Girassol® (azul)



Fonte: elaborado pela autora.

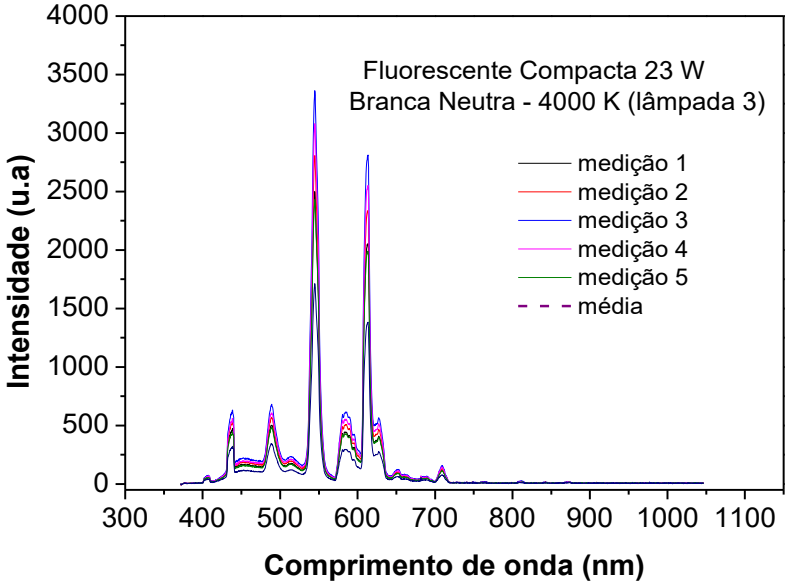
Os Gráficos 3 a 9 estão mostrando a variação das medidas dos espectros das lâmpadas em momentos diferentes, comprovando que a variação do espectro realmente é muito pequena no equipamento utilizado. Isto quer dizer que, apesar dos momentos distintos da medição os resultados foram semelhantes. Não há uma grande variação dos comprimentos de onda captados para que sejam considerados. Comparando os comprimentos de onda apresentados pelas lâmpadas fluorescentes utilizadas no teste com a luz natural, é possível perceber que a variação é muito grande fornecendo uma luz diferente a um pico de iluminação em torno de 550nm, o que significa que há maior intensidade nessa cor do espectro. Nos gráficos, as lâmpadas estão identificadas por nome e numeração para posterior identificação. A linha pontilhada sempre representará as médias das medições feitas com cada lâmpada.

Gráfico 3 - Média das várias captações de luz da lâmpada incandescente refletora Concentra Øsram 60 W – spot



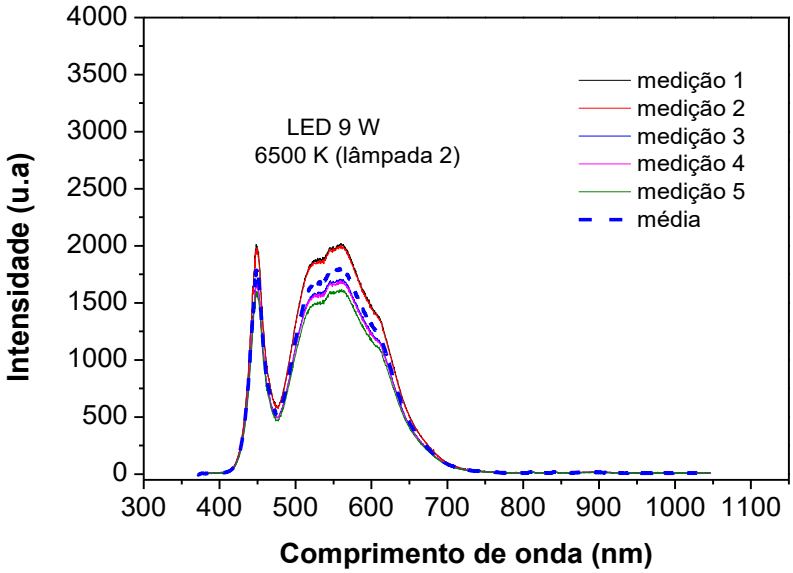
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 4 – Média das várias captações de luz da lâmpada fluorescente compacta 23 W branca neutra Øsram



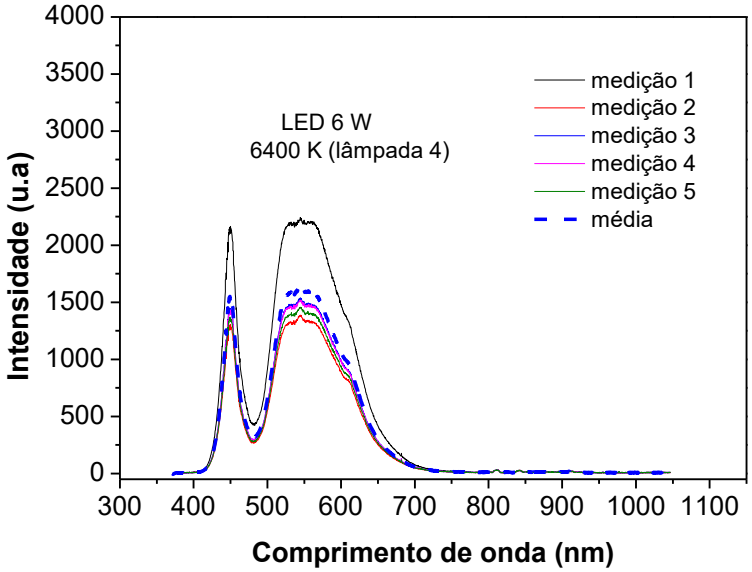
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 5 – Média das várias captações de luz lâmpada de LED 9-60 W clara fria Philips 6500



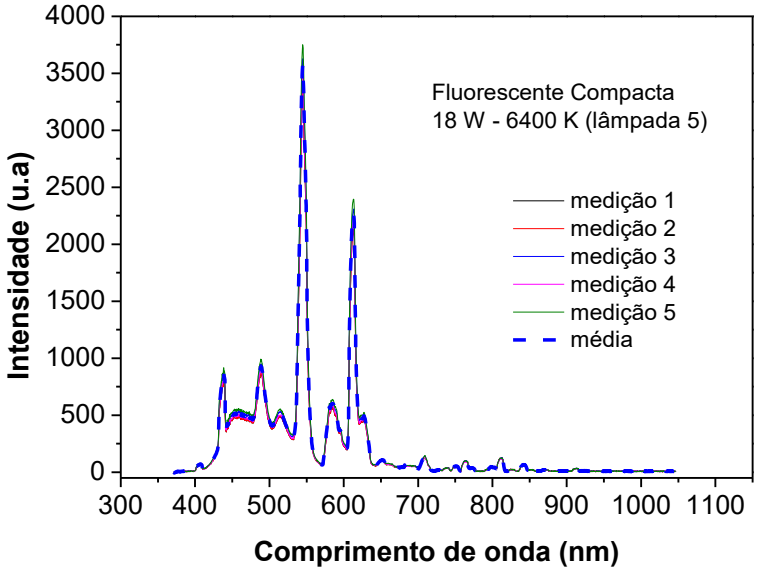
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 6 – Média das várias captações de luz lâmpada de LED 6 W branca fria Superled 60 Ourolux



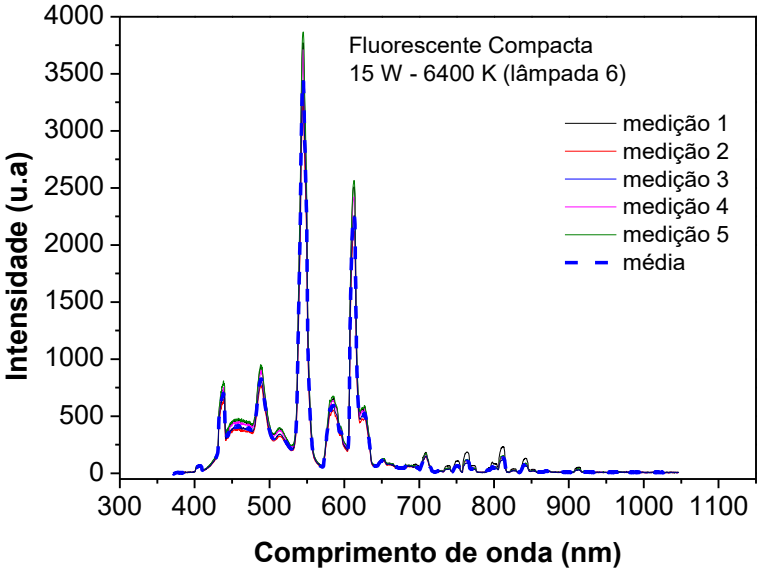
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 7 – Média das várias captações de luz lâmpada fluorescente compacta econômica 18 W luz branca intensa – FLC



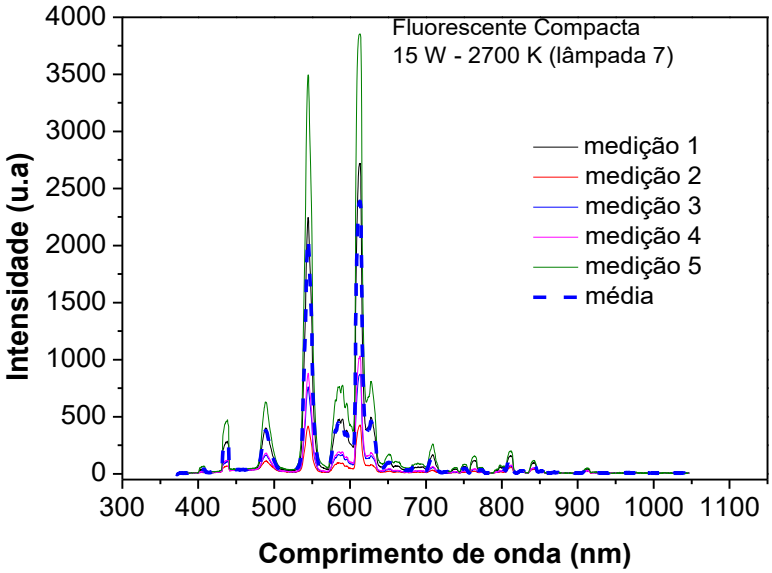
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 8 – Média das várias captações de luz lâmpada fluorescente compacta econômica 15 W luz branca – FLC



Fonte: elaborado pela autora.

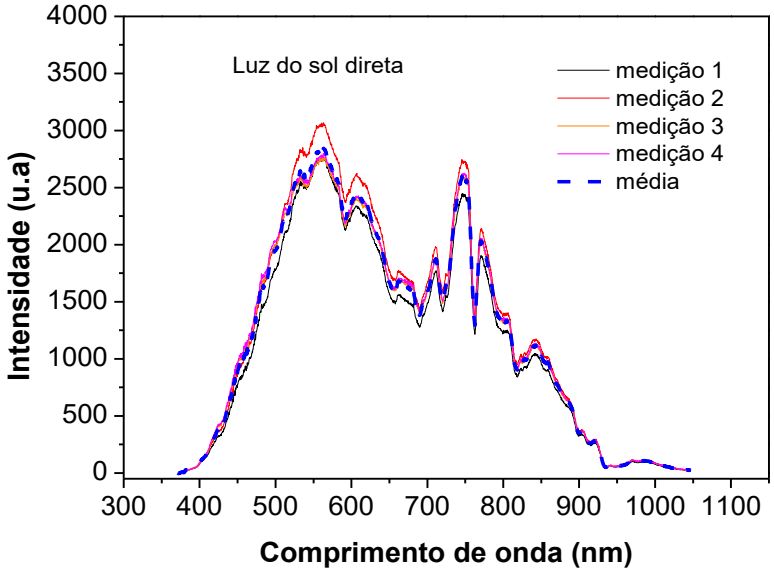
Gráfico 9 – Média das várias captações de luz lâmpada fluorescente compacta econômica 15 W – FLC – Luz morna



Fonte: elaborado pela autora.

A luz natural também foi testada em mais de um momento para verificar a variação dos seus comprimentos de ondas e certificar a qualidade de medição do equipamento. Pode-se observar, no Gráfico 10, que as variações de comprimento de onda também são muito pequenas podendo ser desconsideradas.

Gráfico 10 – Média das várias captações de luz natural solar sem passar pelo Girassol®

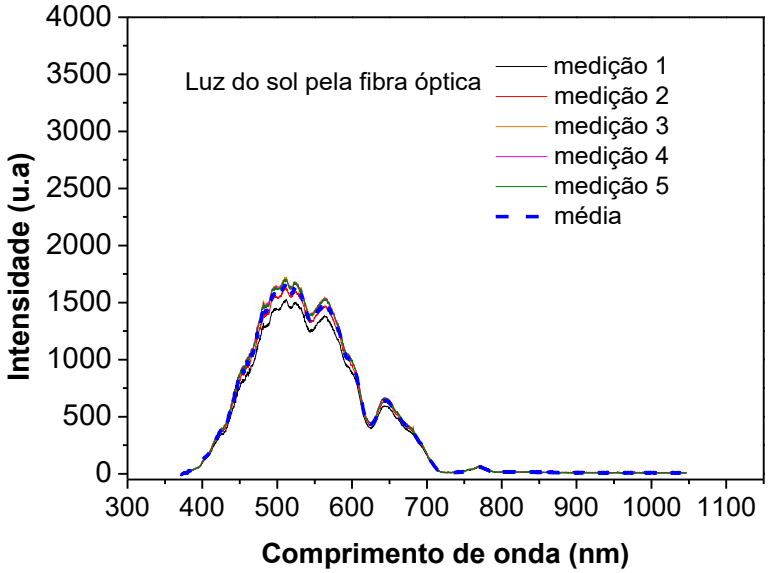


Fonte: elaborado pela autora.

A preocupação em fazer mais de um teste com os comprimentos de onda da luz emitida pela fibra óptica foi de garantir a informação de que realmente não passa infravermelho através

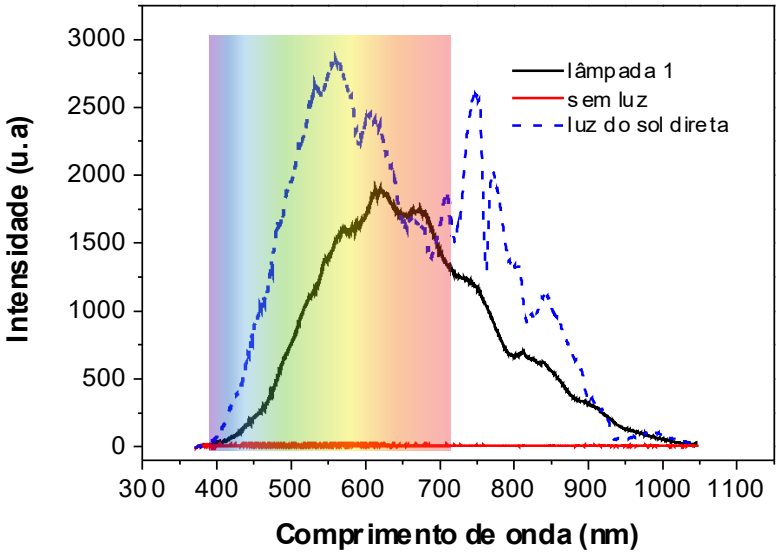
dela, mantendo uma uniformidade nos demais comprimentos de onda que se assemelham à luz natural como comprova o Gráfico 11.

Gráfico 11 – Média das várias captações de luz natural solar transmitida pelo Girassol®



Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 12 – Comparação do espectro de luz da Lâmpada incandescente refletora Concentra Øsram 60 W – spot com a luz solar natural emitida pelo sol



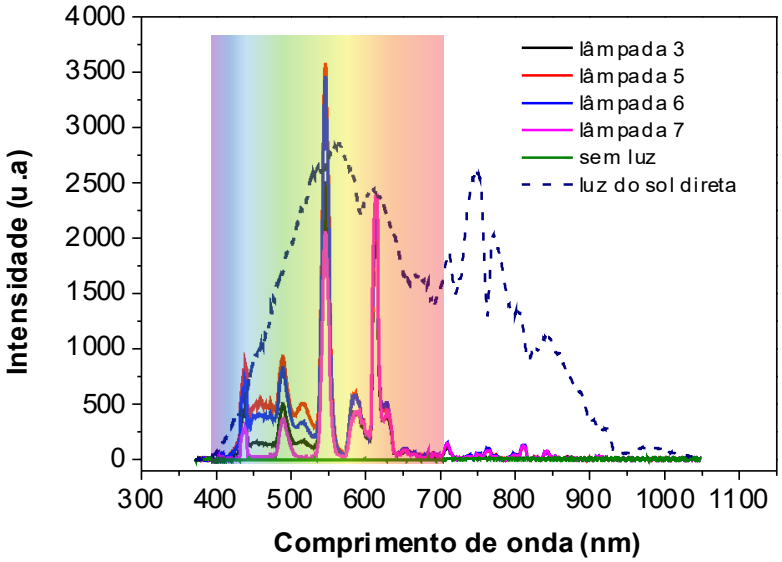
Fonte: elaborado pela autora.

Comparando o espectro da lâmpada incandescente refletora Concentra com o espectro da luz natural do Sol (Gráfico 12), é possível perceber que dentre todas as lâmpadas essa é a que mais se aproxima do espectro solar. Apesar disso, além da intensidade da radiação ser menor, os comprimentos de ondas que se aproximam mais das cores frias (luz azul e verde) têm menor intensidade. Já os comprimentos de onda maiores que se aproximam do vermelho

chegam a coincidir com a luz natural. Então, é possível perceber que apesar de ser a que tem comportamento mais semelhante à luz solar, a diferença ainda é grande.

É importante observar no Gráfico 13 que entre o 400 e o 550 nm mais ou menos, há uma variação com maior intensidade entre os comprimentos de onda das lâmpadas fluorescentes. Isso significa que nas cores desse comprimento (azul), as lâmpadas emitem uma coloração com pequena variação na intensidade nesses comprimentos de onda. Por isso, o IRC dessas lâmpadas não costuma ser alto, mas sim em torno de 80%, às vezes chegando a ser setenta, em função de não apresentar um espectro semelhante ao da luz solar. A tendência de que o ambiente fique mais azulado em função desse tipo de lâmpada é grande.

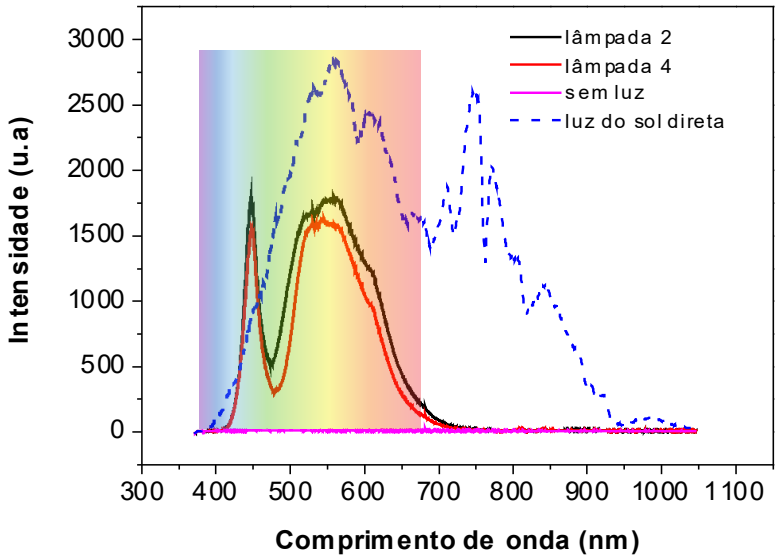
Gráfico 13 – Comparação entre os comprimentos de ondas das lâmpadas fluorescentes e a luz solar natural



Fonte: elaborado pela autora.

As lâmpadas de LED, apesar de apresentarem intensidade de iluminação menor que a luz natural, têm um intervalo de comprimentos de onda semelhante no espectro visível, também cortando bastante o infravermelho, impedindo o aquecimento do ambiente como nos mostra o Gráfico 14. No entanto, é importante ressaltar a queda que acontece nos 500 nm, que é mais ou menos na coloração verde, o que deturpa a cor dos objetos onde essa luz é refletida. Essa é uma característica típica de LEDs brancos. Então, por esse motivo, nenhuma dessas duas lâmpadas são consideradas com IRC de 100% de acordo com as medidas do espectrofotômetro.

Gráfico 14 – Comparação entre os comprimentos de ondas das lâmpadas de LED e a luz solar natural



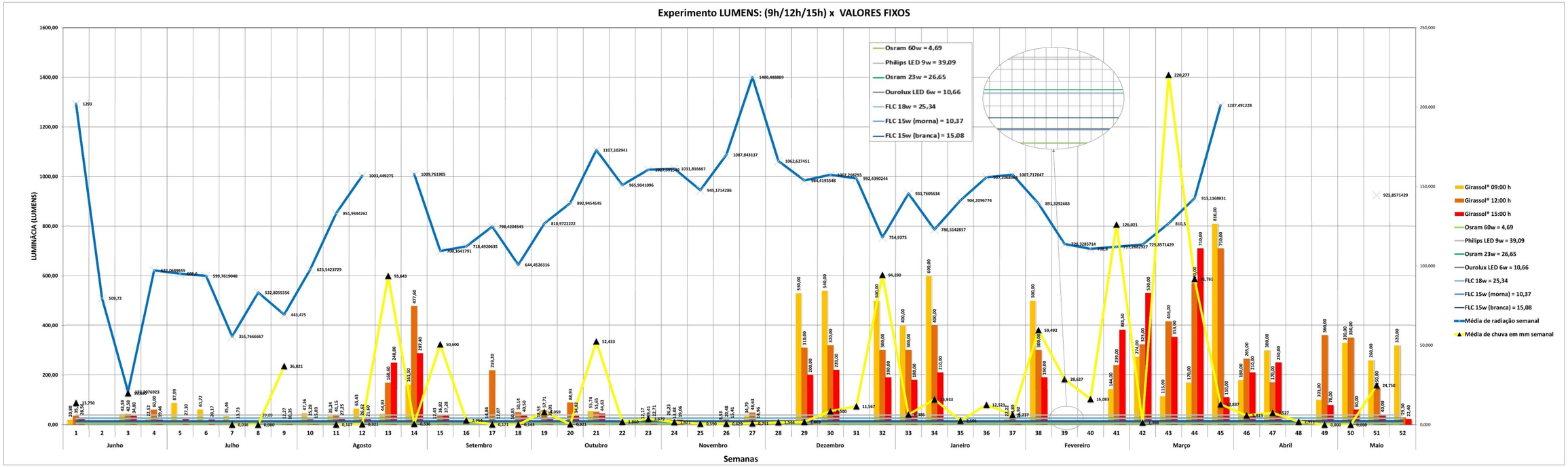
Fonte: elaborado pela autora.

4.2 EXPERIMENTO COM LUMINANCÍMETRO

Sendo o lúmen uma unidade de medida padrão no Sistema Internacional de Unidades, sua análise torna-se necessária. O Gráfico 15 mostra os dados obtidos com o luminancímetro LS 100 durante o período de junho de 2016 a maio de 2017.

O valor dos lúmens para as lâmpadas foi inserido para a correta comparação com o Girassol®. Não há uma constante para medição em cada horário no Girassol®. Esta variação ocorre porque há interferência na captação da luz solar. Quanto mais livre de nuvens o sol estiver, maior será a captação. Como o céu não é constante o dia inteiro, os horários de medição não criam uma constante de valores. O início da medição foi realizado no período do outono e inverno, em junho de 2016, quando há maior incidência de nuvens que dificultam a captação solar direta. Ainda assim, a emissão de lúmens no ambiente se equipara ou é superior aos valores obtidos com as lâmpadas. Principalmente no horário de 12 horas, quando a captação da luz solar é maior, os valores das medições são bem superiores. Já no período da primavera, e principalmente do verão, os níveis de emissão de lúmens aumentaram enormemente alcançando valores muito acima dos proporcionados pelas lâmpadas. A dificuldade, nesse período, no entanto foram as chuvas. O Girassol® não pôde se expor a essa situação impedindo assim, a realização de todas as medições nessas semanas. Todas as medições feitas com o luminancímetro tiveram o ponto central da parede como referência.

Gráfico 15 – Experimento LUMENS: (9h/12h/15h) × Valores Fixos



Foram coletados também, dados de radiação de chuva para comparação com os dados das medições. Os dados de radiação foram obtidos através da estação meteorológica do Laboratório de Conforto Ambiental do IAU (Instituto de Arquitetura e Urbanismo – USP – SC) localizada no campus 1 da USP – São Carlos. A estação funciona desde 2012, mas devido a uma nova edificação erguida ao lado da mesma, ficou comprometida com a obtenção de alguns dados. Por esse motivo, os dados pluviométricos não foram obtidos por essa mesma fonte tendo sido fornecidos Setor de Controle de Abastecimento (SCA) do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE – SC). Os dados são obtidos através de pluviômetros do SAAE que são monitorados pelo Centro de Operações e Controle de Abastecimento - COCA, subordinado ao setor responsável pelo encaminhamento dos dados, SCA.

Analisando todo o gráfico é possível observar que grande parte da emissão de luz do Girassol® obtida no experimento está relacionada à radiação detectada no período. Quanto maior a radiação, melhor o resultado aferido pelo luminancímetro. No entanto não foi somente a radiação que interferiu no resultado. Os índices pluviométricos também afetaram os resultados diretamente. É possível observar, principalmente em maio, que com baixa pluviosidade, os resultados obtidos tornam-se maiores. Outro fator importante a destacar é que não é somente a chuva que impede a medição, a nebulosidade também interfere demais pois como já explicado, o Girassol® tem baixa capacidade de captação solar difusa. Seu resultado é muito positivo quando recebe a iluminação direta. Por isso a relação com a radiação é bem mais proporcional aos resultados que a relação com a pluviosidade. Ainda assim é uma associação relativa pois é possível ter uma radiação alta com iluminação difusa (que não é captada pelo Girassol®).

4.3 EXPERIMENTO COM LUXÍMETRO

Como no experimento com o luminancímetro, os valores de iluminância (lux) das lâmpadas permaneceram constantes, independente do dia e da hora. Este experimento foi realizado durante 52 semanas (um ano), uma vez por semana, geralmente na quarta. No entanto, tentou-se sempre medir em um dia da semana com melhor radiação solar. Ainda assim, neste ínterim, houve períodos com céu encoberto e luz mais difusa que impediram a medição durante a semana inteira. Os dados de radiação e pluviosidade utilizados foram os mesmos usados no experimento com o luminacímetro. O total de dez semanas com impossibilidade de medição representou 19% aproximadamente do período total, o que já aponta a necessidade de aperfeiçoamento na captação do Girassol®. Seria de grande importância se o mesmo fosse capaz

de captar a luz indireta. Mas sua captação mostrou-se eficiente somente com a luz direta. As medições foram iniciadas no dia 1º de junho de 2016.

O eixo X em todas as figuras seguintes representa o número da semana da medição (1 a 52). O eixo Y representa os valores de iluminância obtidos por cada uma das fontes de luz medidas: lâmpadas e Girassol®. É importante ressaltar que todas as medições tiveram que ser feitas manualmente pois o sistema automático do Girassol® não funcionou para a correta captação da luz solar. Além disso, somente dez semanas não puderam ser medidas em nenhum horário, aproximadamente 19%. Nos demais horários não houve medição em quatorze dias, 26% aproximadamente do período. Destaca-se, ainda, a semana 25 por problema de programação do Girassol®. O mesmo foi programado para rotacionar 180º lateralmente (horizontalmente). No entanto, nessa época, é necessária uma rotação maior para que o Girassol® possa captar o sol a leste e oeste, porém, identificado o problema, a solução foi rotacionar a base para que pudesse alcançar a rotação necessária. Assim, além do rotacionamento manual do coletor, a base também foi girada para que se pudesse dar prosseguimento ao experimento.

Os Gráficos de 16 a 19 representam as medições realizadas às nove horas da manhã. Nessas, são feitas comparações entre o Girassol®, nos quatro pontos e as lâmpadas, sendo que em cada um é dado os valores das lâmpadas em um único ponto. No Gráfico 16, as lâmpadas foram medidas no ponto central. Nota-se que mesmo no ponto com maior intensidade de luz das lâmpadas, o Girassol® demonstra o desempenho superior. Nos Gráficos 17 (lâmpadas a 35 cm), 18 (lâmpadas a 70 cm) e 19 (lâmpadas a 98 cm) o desempenho do Girassol® mostra-se ainda maior. Somente o resultado no ponto distante a 98 cm, o Girassol® teve desempenho inferior às lâmpadas. Esse dado pode ser justificado pela má distribuição de luz na luminária do Girassol®, que sempre se mostrou com redução muito grande dos valores entre um ponto e outro. Analisando estas quatro figuras, é possível observar que os valores das lâmpadas também variam de um ponto ao outro, mas não com uma redução de valores tão grande. Os valores de redução entre o ponto central e o ponto da 98 cm das lâmpadas não superam uma diminuição de 35%. No entanto, a variação do Girassol® chega a 80% em sua grande maioria.

O Gráfico 17, que mostra os valores das lâmpadas a 35cm, indicam que o desempenho do Girassol® é superior em alguns momentos. No ponto a 70 cm e 98 cm essa superioridade torna-se ainda mais evidente como nos mostram os Gráficos 18 e 19.

Os dados de medição de chuva e radiação também mostram coerência no funcionamento do Girassol®. Quanto maior radiação, maior a captação e consequentemente a iluminância. Quanto menor a pluviosidade, maiores os valores da iluminâncias medidas.

Gráfico 16 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALOES FIXOS: CENTRO

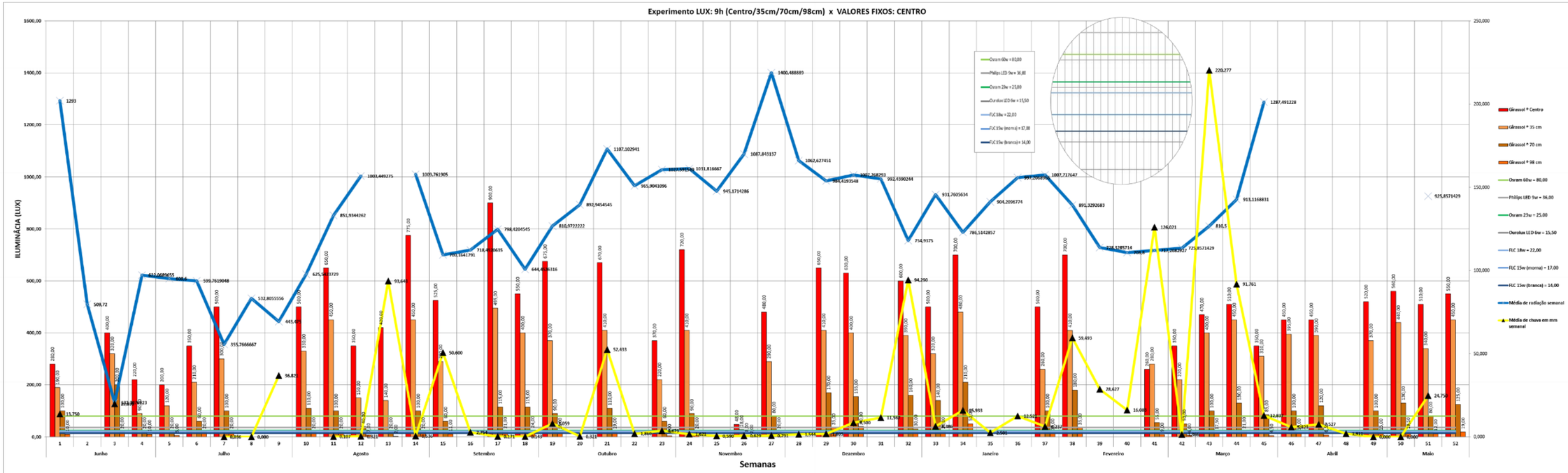


Gráfico 17 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 35cm

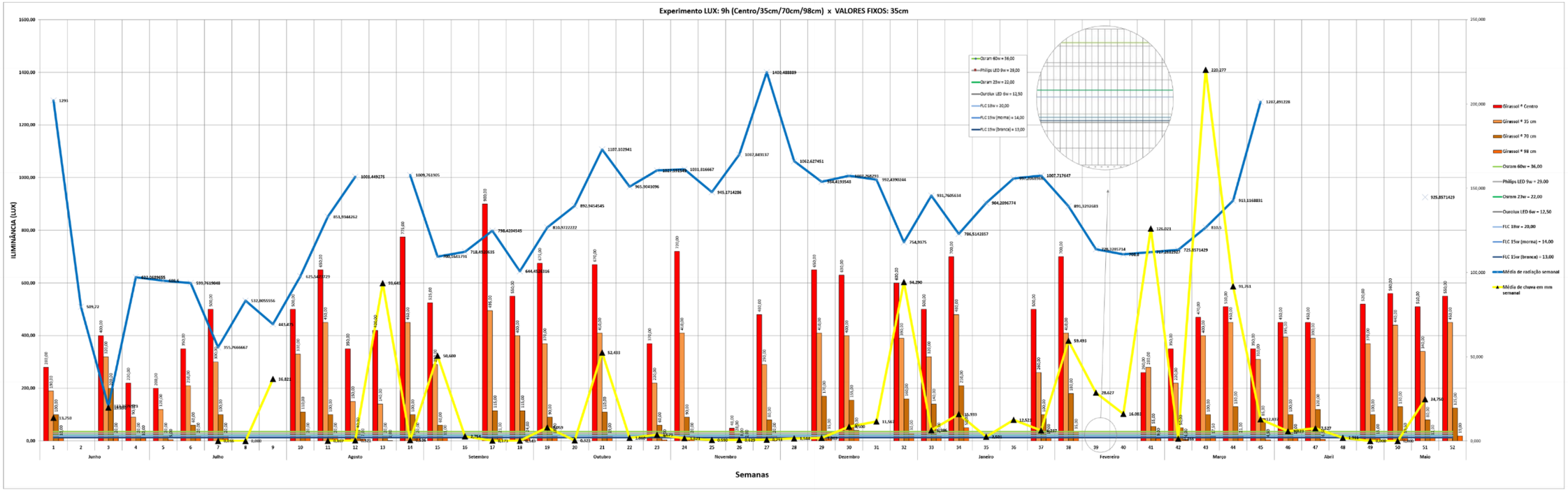


Gráfico 18 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 70cm

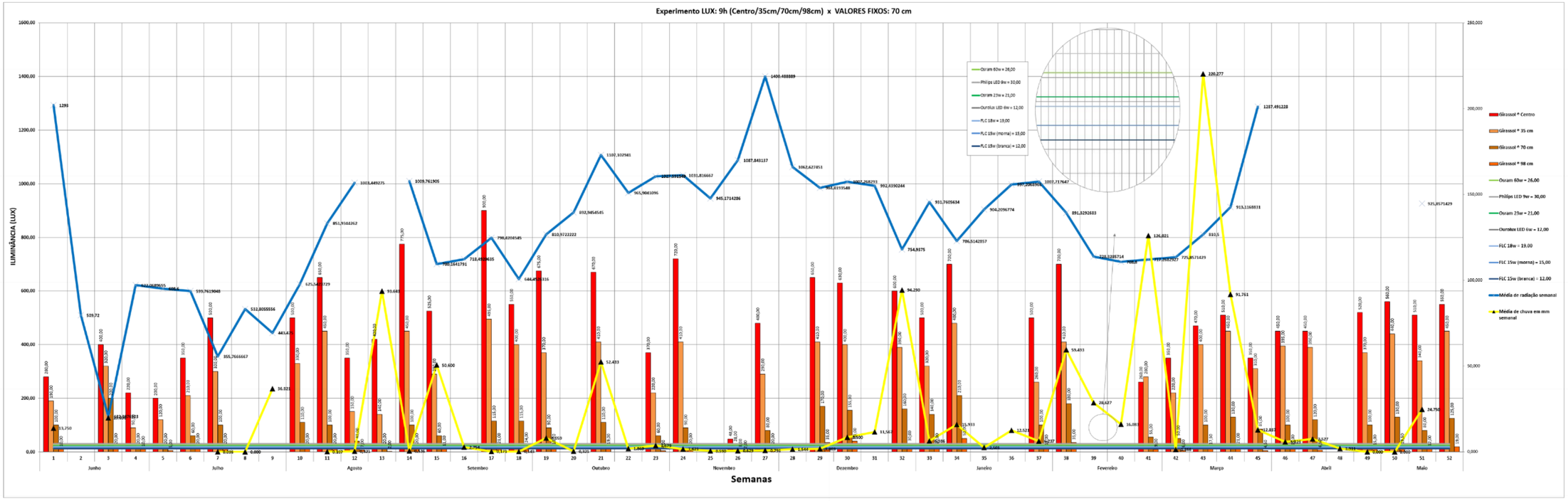
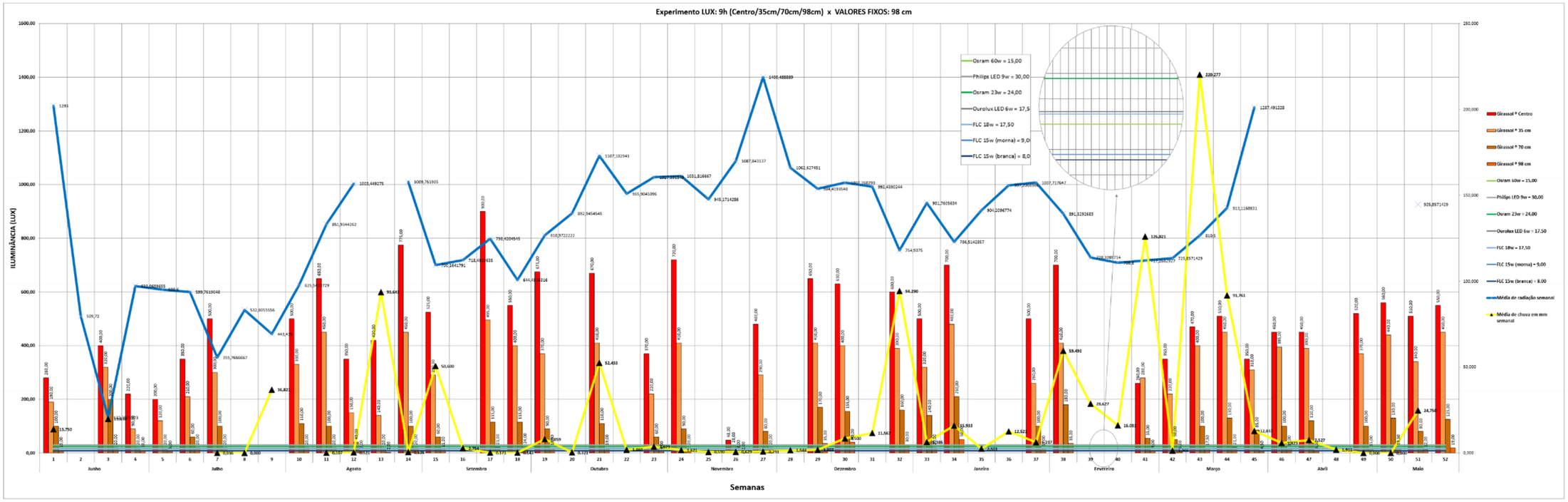


Gráfico 19 – Experimento LUX: 9h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 98cm



Os Gráficos 20 a 23 seguem padrões de formatação idêntico às figuras anteriores. No entanto, são análises com medições feitas ao meio dia. Nestas figuras, os resultados com o Girassol® mostram-se ainda melhores. Comparando o Gráfico 16 com o Gráfico 20 chega-se a um aumento nos resultados em até 80%. Na semana 20, por exemplo, não foi possível fazer a medição pela manhã, mas ao meio dia chegou-se a 250 lux no ponto central. Considerando que neste dia o céu estava parcialmente encoberto, é um resultado excelente, principalmente quando comparado com a norma NBR – ISO nº 8.995/2013 que estabelece os padrões de iluminância de cada ambiente. Várias áreas de uma edificação exigem iluminâncias inferiores a esse resultado. Áreas de circulação, como mostra a Tabela 2, exigem uma iluminância de apenas 100 lux, salas de espera, 200 lux, enfermarias, 100 lux (para iluminação geral) e até sala de jantar, mesmo de restaurantes, têm iluminância exigida de 200 lux. Os Gráficos de 21 a 23 destacam ainda mais o desempenho do Girassol®. No ponto a 70 cm nota-se que as lâmpadas, mesmo sendo mensuradas no ponto a 35cm obtiveram resultado inferior a um ponto mais distante do Girassol®. O resultado do Gráfico 21, que mostra os pontos a 35 cm, revela como o Girassol® foi superior nesse mesmo ponto. No Gráfico 22, com a medição das lâmpadas no ponto a 70 cm, o resultado do Girassol® apresenta uma redução, mas, ainda assim, são poucos os dias em que o resultado foi inferior. Considerando os dias em que não foi possível fazer medição, o Girassol® teve dezesseis resultados abaixo dos valores obtidos com as lâmpadas, somente 30% aproximadamente.

O Gráfico 23 já mostra um resultado menos otimista. Como já explicado na análise das nove horas, o resultado obtido pelo Girassol® a 98 cm é pouco satisfatório, chegando a ter medição com o valor zero. Assim, a possibilidade de melhoria da luminária para melhor distribuição da luz no ambiente torna-se ainda mais evidente.

A variação da chuva e da radiação é mais uma vez comprovada como fator de alteração nos resultados. Mesmo a oscilação não sendo constante, os resultados comprovam a interferência direta na capacidade de iluminação do Girassol®. Quanto maior a radiação e menor a pluviosidade, maiores são os resultados do Girassol®,

Gráfico 20 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: CENTRO

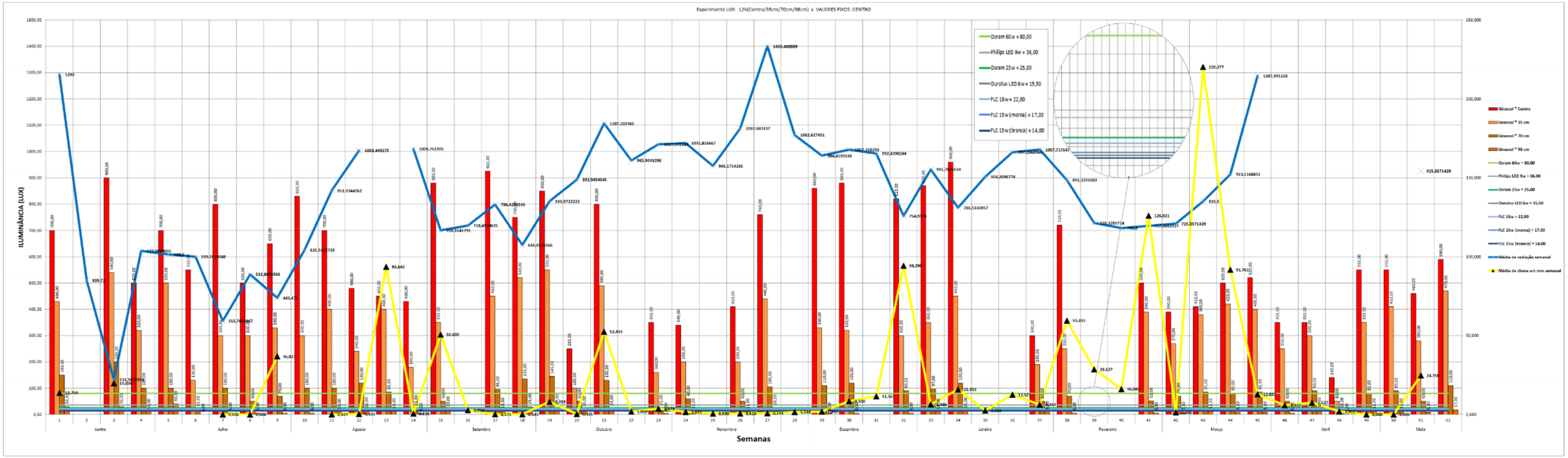


Gráfico 21 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: CENTRO

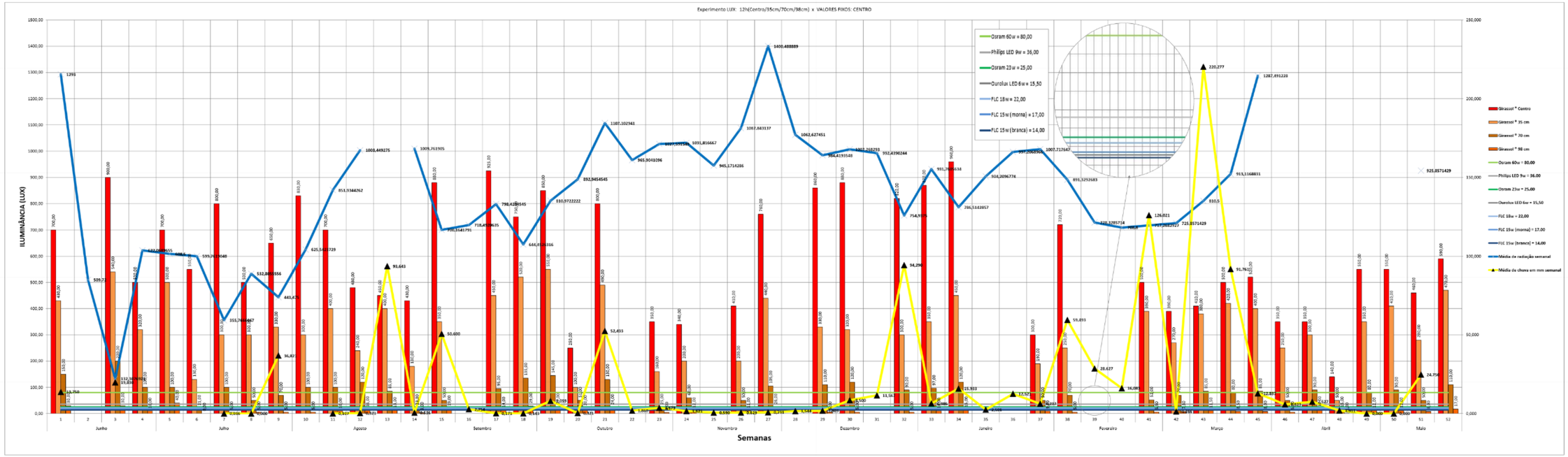


Gráfico 22 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 70cm

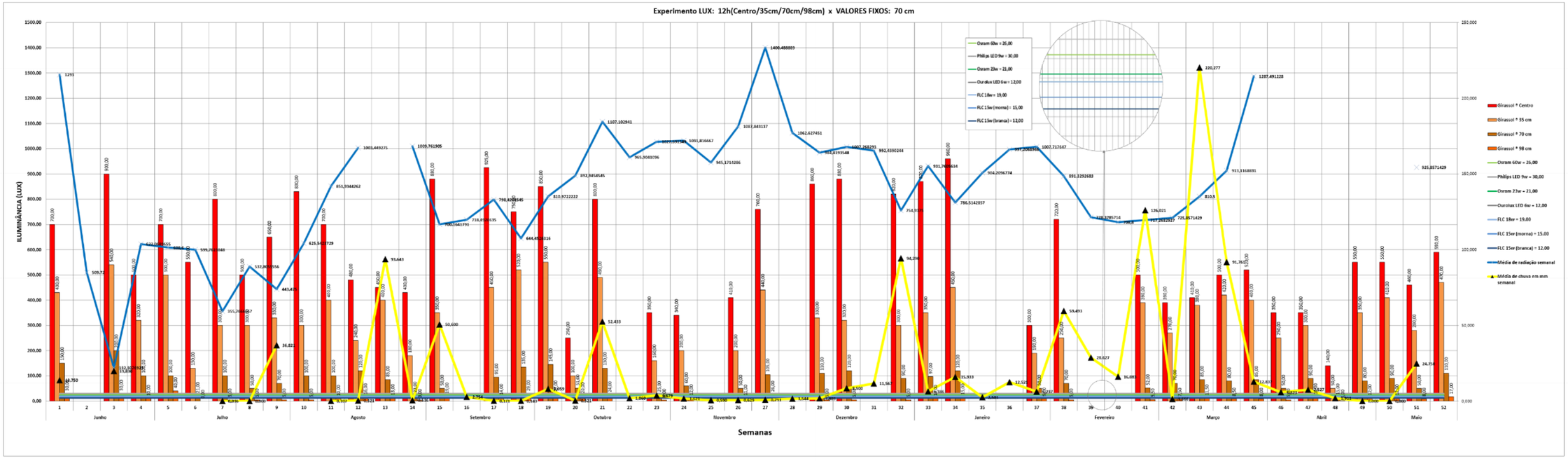
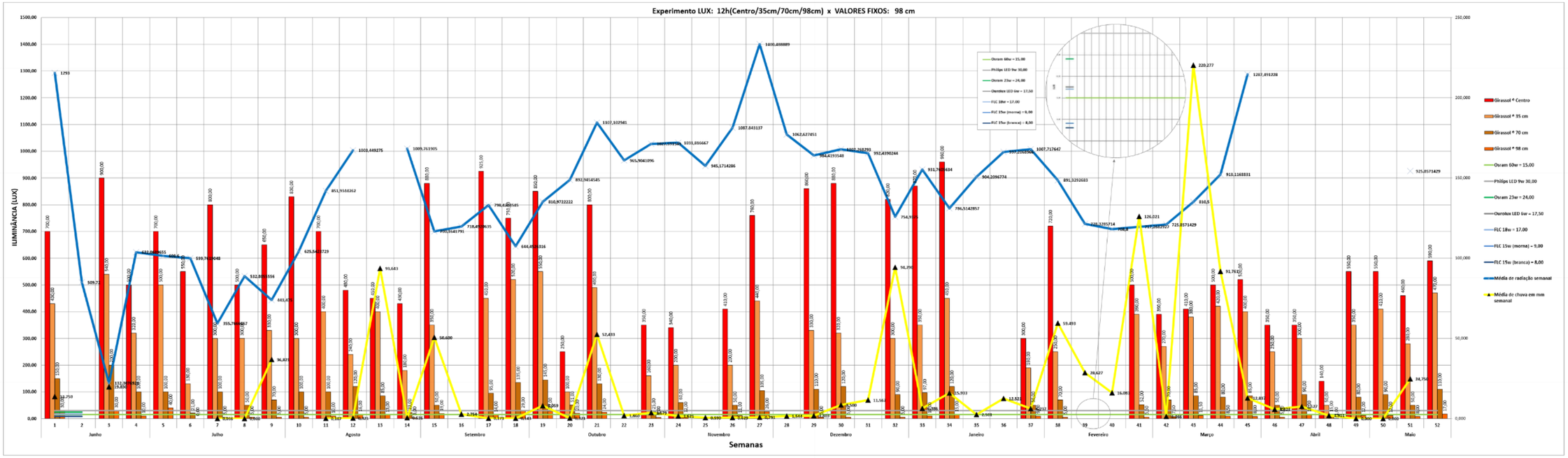


Gráfico 23 – Experimento LUX: 12h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 98cm



Os Gráficos 24 a 27 permanecem seguindo os padrões das figuras anteriores. Neste horário das 15 horas os resultados ficaram um pouco abaixo dos anteriores devido à maior frequência de nuvens que provocou iluminação mais difusa. Ainda assim, o Gráfico 24 mostra um resultado excelente em relação às lâmpadas no ponto central. O nível mais baixo foi de 180 lux sendo ainda superior ao da lâmpada Øsram Concentra que obteve como melhor resultado, 80 lux. Os Gráficos de 25 a 27, que comparam os pontos a 35, 70 e 98 cm, respectivamente também mostraram resultado abaixo dos anteriores mas ainda assim superiores aos das lâmpadas.

Gráfico 24 – Experimento LUX: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: CENTRO

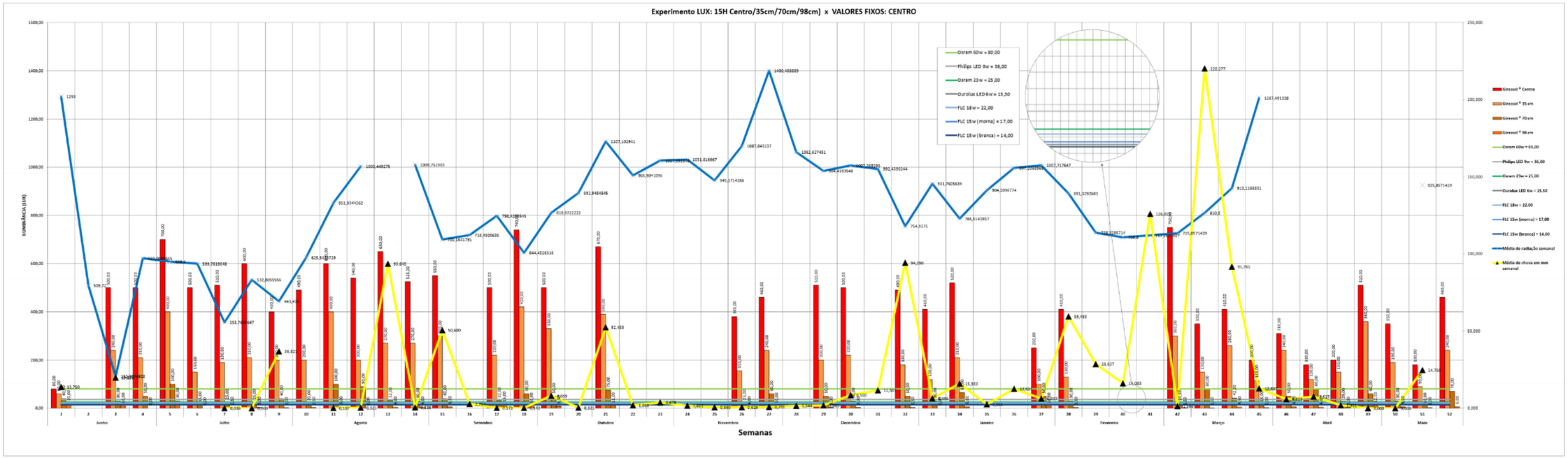


Gráfico 25 – Experimento LUX: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 35cm

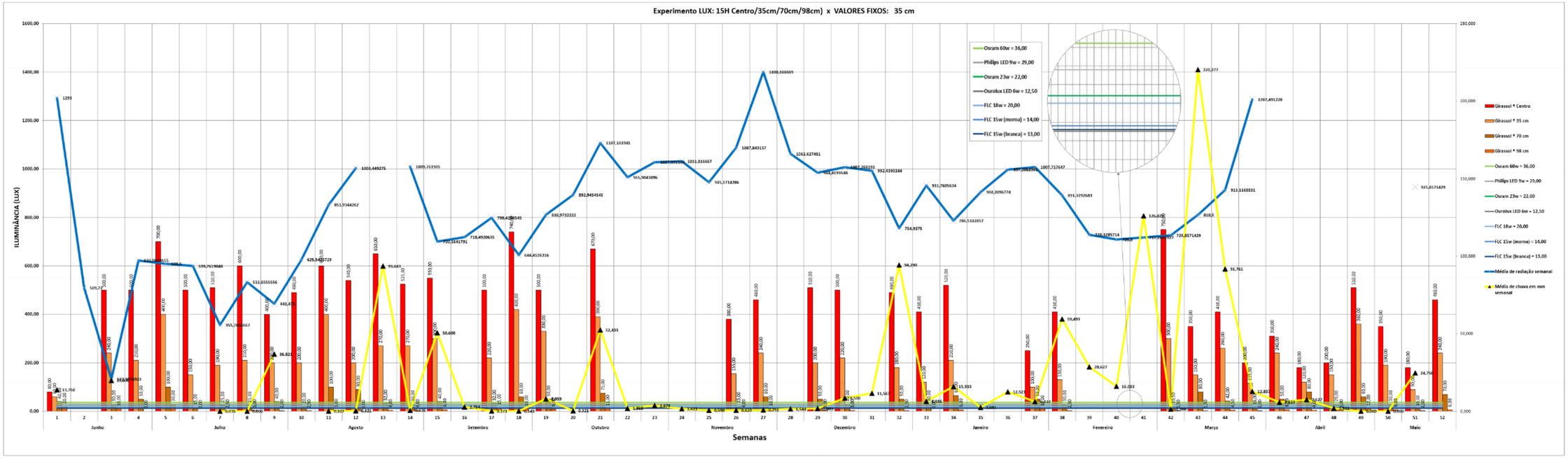


Gráfico 26 – Experimento LUX: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 70cm

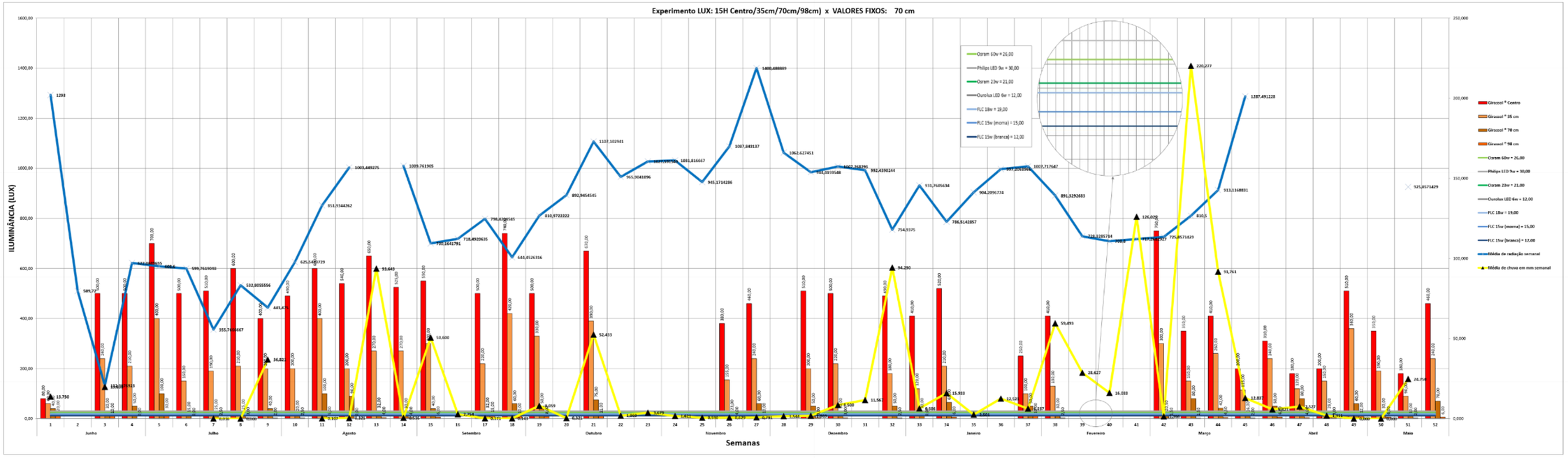
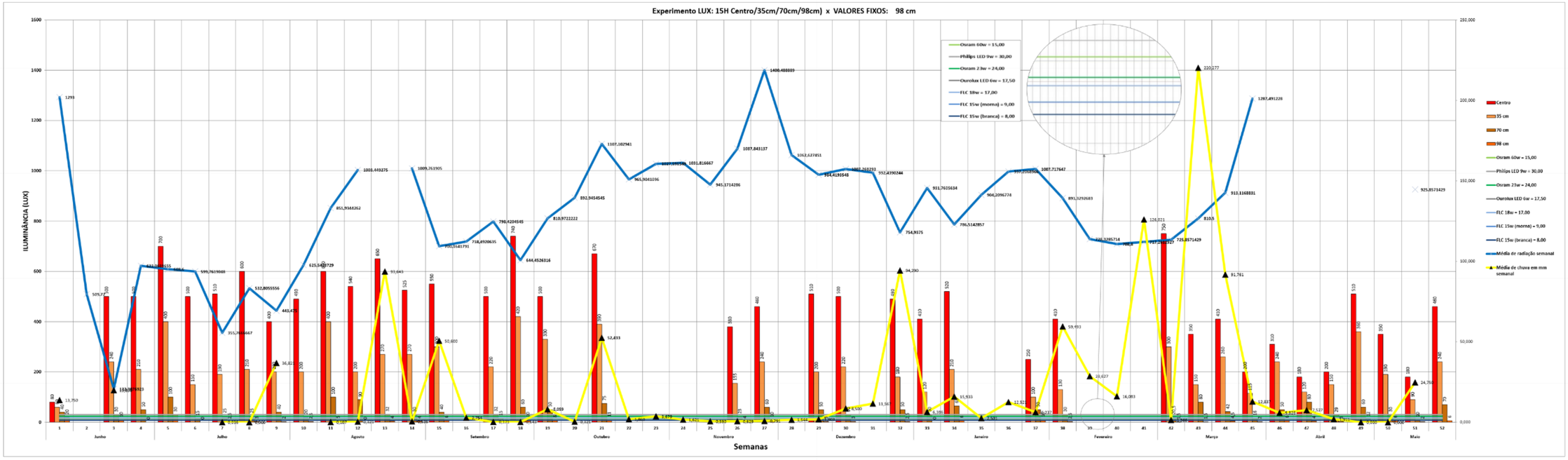


Gráfico 27 – Experimento Lux: 15h (Centro/35cm/70cm/98cm) × VALORES FIXOS: 98cm



Como visto nas figuras anteriores as captações foram variáveis de acordo com o horário de medição. O horário do meio dia foi o que teve melhor resultado devido ao fato de neste momento o Girassol® captar maior quantidade de luz devido ao fato de ser o horário com maior radiação emitida pelo sol.

Outro paralelo que é necessário nesta análise é com a norma ISO/CIE nº 8.995-I. Como explicado anteriormente, os valores estabelecidos pela norma foram estipulados em condições ideais de medição (com esfera integradora), tanto que os valores obtidos pelas lâmpadas são muito inferiores aos apresentados pelos fornecedores, que atendem as normas. Ainda assim, nas condições deste experimento, o Girassol® apresentou resultados que atendem plenamente aos valores solicitados para edificações residenciais e para a maioria de edificações comerciais, educacionais e de saúde. A norma estabelece valores de iluminância entre 100 lux e 500 lux para a maioria dos ambientes como pode ser visto na Tabela 2. Somente algumas áreas específicas exigem um valor maior que este de iluminância. Considerando as sugestões de modificação do Girassol® e da luminária já feitas, este resultado poderá ser ainda superior ao aqui apresentado.

As empresas apresentadas no Capítulo 2 – Parans, Himawari e HSL – não ofereceram dados para poderem ser comparados à norma ou a este experimento pois nenhum foi testado nas mesmas condições. Em primeiro lugar, as condições atmosféricas onde esses equipamentos se encontram instalados são muito diferentes devido às suas localizações (Suécia, Japão e EUA). Sabe-se que estão atendendo condições exigidas pelo mercado comercial tanto que têm sido comercializados os seus produtos. No entanto para uma comparação com o Girassol® seria necessária uma análise de resultados quando todos os equipamentos puderem ser expostos às mesmas condições de teste. Neste trabalho não foi possível realizar esta análise devido ao alto custo dos equipamentos para importação. Por outro lado, este alto custo potencializa o desenvolvimento do Girassol® para possível comercialização no Brasil uma vez que não incidirá sobre ele os impostos de importação.

5 CONSIDERAÇÕES

Esse estudo comprovou a possibilidade de iluminação natural em ambientes com iluminação inadequada. Essa iluminação pode gerar economia de energia e redução de lixo advindo de lâmpadas, colaborando para a sustentabilidade do planeta. Além disso, ainda favorecerá a qualidade de vida dos usuários nesses ambientes uma vez que a influência da luz natural é essencial para a qualidade de vida do ser humano.

Dentre as principais observações, destaca-se a necessidade do aperfeiçoamento na resistência do Girassol® a qualquer intempérie. Sendo o equipamento utilizado para este experimento um protótipo, as melhorias de estrutura possibilitarão uma capacidade ainda maior do Girassol® em ficar exposto à qualquer tipo de condição climática e captar a luz solar.

O Girassol® encontrou várias dificuldades técnicas para que pudesse ser concluído. Apesar deles, a metodologia desenvolvida, que envolveu testes por período prolongado e medições constantes, comprova a qualidade dos resultados obtidos, pois foi um estudo experimental, realizado *in loco*, no qual não foram utilizadas suposições a priori ou simulações as quais muitas vezes divergem do contexto real. A metodologia avaliou o equipamento sob todas as condições climáticas e em diferentes épocas do ano, diminuindo a possibilidade de alguma alternativa de teste não ter sido experimentada. Durante os períodos de instalação até o fim das medições, foram encontrados percalços devido a falhas no funcionamento do Girassol®. Por esse motivo, foram necessárias reinstalações e acompanhamentos de reparo no laboratório LACTEC em Curitiba, e as considerações deste estudo permitirão que o protótipo seja comercializado. Dentre as principais observações, destacam-se a necessidade do aperfeiçoamento na resistência do Girassol® a qualquer intempérie, melhorias na captação da luz solar através das lentes, alimentação do motor via energia solar e implementação de autocalibração do motor.

São necessárias também melhorias na captação da luz solar através das lentes, aumentando sua capacidade de detecção dos raios solares e colimação dos mesmos na direção da fibra óptica, mesmo quando a radiação for mais indireta e com menor intensidade, já que mais de 50% de perda de iluminância foi detectada no interior da célula teste, com o luxímetro posicionado em frente à lente do Girassol, coletando a iluminância do sol e no interior da célula teste no ponto central.

Em condições ideais, o Girassol® mostrou-se muito eficiente atingindo níveis de captação e transmissão altos. Contudo, uma fibra óptica com melhor e maior capacidade de transmissão de luz poderá contribuir para melhores resultados.

Uma luminária que pode colaborar para os resultados serem ainda superiores deve ter capacidade de espalhar a luz uniformemente no ambiente. Como visto nos resultados, a iluminância do Girassol® é sempre maior no centro, com variações grandes à medida em que se afasta do ponto central da parede. Uma luminária que possibilite uma luz mais uniforme no ambiente poderá melhorar essa qualidade na distribuição da luz. Houve a tentativa da utilização de um difusor acrílico colocado à frente da luminária, mas o resultado não atendeu à expectativa proposta e por isso não foi utilizado durante o período do experimento. A solução de uma luminária híbrida foi apresentada por Purim et al. (2015) com consultoria do especialista Sr. Walen de Souza Cruz Jr. em um projeto de luminária indireta. No entanto, o projeto não foi executado a tempo de ser utilizado neste estudo. Além disso, a possibilidade de trabalhar com uma luminária híbrida, que utilize a luz artificial somente quando indispensável e em quantidade proporcional à real necessidade do ambiente, proporciona um potencial ainda maior de contribuição na qualidade de iluminação do ambiente e na economia de energia da edificação.

Outra possibilidade é o equipamento poder ser instalado em superfície que não seja plana, como no caso de telhados residenciais e paredes laterais. Isso possibilitaria uma maior aplicabilidade no uso do Girassol® e facilitaria a instalação em locais com melhores condições de captação da luz solar.

Há algumas hipóteses que podem ser desenvolvidas em estudos futuros. Se as paredes internas da célula-teste fossem pintadas de branco, ela teria um alto fator de reflexão para todas as fontes de luz utilizadas em seu interior. Assim, os resultados seriam diferentes, mas a variação, inicialmente, seria proporcional para todas as fontes de luz. Isto possibilitaria avaliar de maneira mais eficiente os resultados para o Girassol®. Nessas condições, a probabilidade de observar iluminâncias ainda mais altas seria grande.

A sugestão mais importante, contudo, diz respeito à eficiência energética e motriz no motor de rotação do Girassol®. É necessário que o mesmo seja revisado para ter a capacidade de se autocalibrar em qualquer situação, de forma que não seja necessário o controle manual. Além disso, seria interessante que pudesse ser abastecido por energia solar, evitando, assim, qualquer dependência de energia elétrica. Desta forma, o Girassol® se tornaria auto eficiente e muito mais sustentável.

Por fim, esta tecnologia apresentou potencial para transformar ambientes de forma sustentável, mais saudável e de custo acesso a longo prazo, contribuindo com políticas de preservação do meio ambiente e de promoção da qualidade de vida das pessoas em ambientes urbanos.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho comprova a grande viabilidade de implementação do Girassol® apesar das dificuldades na execução dos experimentos e dos obstáculos a serem superados para o funcionamento ideal do Girassol®. Os resultados do Girassol® aqui apresentados são muito superiores se comparados aos resultados da iluminação artificial testada. Acredita-se no potencial do Girassol® e na possibilidade real de sua implementação podendo se obter resultados ainda superiores quando as recomendações de aprimoramento forem atendidas.

Com base em todo o estudo feito e nos testes realizados, é possível concluir que o Girassol® cumpre a sua proposta de captar a luz solar e iluminar um ambiente através da condução dessa luz pelos cabos de fibra óptica. No entanto, é uma tecnologia que ainda necessita de aprimoramentos aqui no Brasil.

A compreensão do funcionamento do Girassol® foi feita a partir do acompanhamento dos testes feitos no LCC e também nas visitas ao Laboratório LACTEC, onde foi possível identificar os problemas detectados nos testes e procurar soluções para viabilização desta pesquisa.

A eficiência foi avaliada e, apesar dos resultados terem se revelado muito positivos, devem-se levar em consideração as melhorias que podem ser feitas. Citadas nos capítulos anteriores, elas orientam para uma maior eficiência do equipamento quando introduzido no mercado para vendas.

Nas comparações feitas com as lâmpadas e o Girassol®, expostos às mesmas condições de teste, ficou comprovada a superioridade no potencial de iluminação deste. Além de atender aos parâmetros mínimos de iluminação estabelecidos pela norma ISO/CIE 8995, mesmo não utilizando a esfera integradora para testes, o Girassol® ainda comprovou sua capacidade em transmitir comprimentos de onda semelhantes aos irradiados diretamente do sol no espectro visível e filtrar os comprimentos de onda do infravermelho inibindo o aquecimento do ambiente. As tecnologias existentes no mercado mundial atualmente – Parans, Himawari e HSL – não disponibilizaram seus equipamentos para testes comparativos com o Girassol®. Os dados obtidos foram analisados mostrando que as tecnologias já são utilizadas e comercializadas no exterior, mas que o alto custo para importação ainda não permitiu que as mesmas fossem utilizadas no Brasil.

Concluindo, desde que feitos os aprimoramentos sugeridos neste trabalho, a viabilidade do uso e eficácia do Girassol® para captação e transmissão da luz solar está comprovada.

REFERÊNCIAS

ALLCOTT, Hunt; GREENSTONE, Michael. Is there na energy efficiency gap? **Journal of Economic Perspectives**, v. 26, n. 1, p. 3-28, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5382**: Verificação de iluminância de interiores – procedimento. Rio de Janeiro, 1985, 6 p.

___. **NBR 5413**: Iluminância de interiores – procedimento. Rio de Janeiro, 1992, 13p.

___. **NBR 5461**: Tecnologia em iluminação. Rio de Janeiro, 1991.

___. **NBR 8895**: Iluminação de ambientes de trabalho. Rio de Janeiro, 2013.

BAIMA, C. Entenda a pesquisa sobre ciclo circadiano que ganhou o Nobel de Medicina de 2017. **O Globo**, 03 out. 2017. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/sociedade/saude/entenda-pesquisa-sobre-ciclo-circadiano-que-ganhou-nobel-de-medicina-de-2017-21899952#ixzz5NJj5JoS9>. Acesso em: 08 jan. 2018.

BASTOS, F. C. **Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes do mercado brasileiro**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

BÄUMER, S. **Handbook of plastic optics**. Veinheim: Wiley-VCH, 2005.

BESHEARS, David et al. First-generation hybrid solar lighting collector system development and operating experience. In: **Nonimaging Optics**: Maximum Efficiency Light Transfer VII. International Society for Optics and Photonics, 2004. p. 56-67.

CAMPOS, S. M. C. Luz, sono e saúde: os benefícios da iluminação e sua interferência no ciclo biológico. **Revista Lume Arquitetura**, v. 10, p. 72-82, 2011.

CICLO VIVO. **Sistema traz luz do sol para dentro de casa através de um cabo**. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/sistema-traz-luz-sol-para-dentro-de-casa-atraves-de-um-cabo/>. Acesso em: 13 nov. 2017.

DUBOIS, Marie-Claude; BLOMSTERBERG, Åke. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office building: A literature review. **Energy and Building**, v. 43, p. 2572-2582, 2011.

EARL, D.; MUHS, J. Preliminary results on luminaire designs for hybrid solar lighting systems. **Solar Engineering**, p. 119-122, 2001.

ESPECTRO VISÍVEL. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro_vis%C3%ADvel&oldid=50807475>. Acesso em: 20 dez. 2017

FARIA, Leonel Marques; SELLITTO, Miguel Afonso. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

FARIA, A. C. **Iluminação sustentável: os benefícios da tecnologia LED nos projetos de iluminação**. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Sustentável) – PUC Goiás, Goiânia, 2014.

FREITAS, A. C. Como funciona o nosso relógio biológico? Três cientistas ganharam o Nobel da Medicina com a sua resposta. **Público**, 02 out. 2017. Disponível em: <https://www.publico.pt/2017/10/02/ciencia/noticia/nobel-da-medicina-vai-para-descobertas-sobre-mecanismos-do-ritmo-circadiano-1787380>. Acesso em: 08 jan. 2018.

GANSLANDT, R.; HOFMANN, H. **Handbook of lightning design**. Braunschweig: ERCO Leuchten, 1992.

GHATAK, A. **Optics**. Nova York: McGraw-Hill, 2010.

GHISI, E. **The use of fibre optics on energy efficient lighting in buildings**. 2002. 312 f. Tese de Doutorado. University of Leeds (School of Civil Engineering), Leeds, 2002.

GORTHALA, Ravi; TIDD, Meg; LAWLESS, Sean. Design and development of a faceted secondary concentrator for a fiber optic hybrid solar lighting system. **Solar Energy**, v. 157, p. 629-640, 2017.

HECHT, J. **City of light**: the story of fiber optics. Londres: Oxford University Press, 1999.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

HIMAWARI. **Lens focusing and optical fiber transmission devides**. Solar lighting system Himawari, 2018. Disponível em: <www.himawari-net.co.jp>. Acesso em: 3 jan. 2018.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGIA (IDAE). **Guía técnica**: aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios. Mai. 2005. Disponível em: < http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10055_GT_ aprovechamiento_luz_natural_05_ff12ae5a.pdf>. Acesso em: 26 out. 2016.

INFOESCOLA. Fibra óptica. 2018. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/fibra-optica>. Acesso em: 03 jan. 2018.

JADHAV, A.; GODE, P.; GARDI, K.; BHANDARI, S. R. Photoplumbing (Optical Fiber Lightning). **International Organization of Scientific Research - Journal of Computer Engineering**, p. 4-8, 2016.

JOO HAN, Hyun; RIFFAT, Saffa B.; LIM, Sang Hoon; JIN OH, Seung. Fiber optic solar lighting: Functional competitiveness and potential. **Solar Energy**, v. 94, p. 86-101, 2013.

KICKSTARTER. **Solros: Dish + optic cable brings real light to dark rooms**. Disponível em: < https://www.kickstarter.com/projects/615127051/solros-dish-optic-cable-brings-real-light-to-dark?ref=nav_search&result=project&term=solros%20 >. Acesso em: 13 nov. 2017.

KONIS, K. A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. **Building and Environment**, v. 113, p. 22-38, 2017.

KÖSE, Tarsus; MUHURCU, Aydin. Indoor daylight systems design for dark sections of the building with plastic optical fiber. In: 1st INTERNATIONAL MEDITERRANEAN SCIENCE AND ENGINEERING CONGRESS (IMSEC 2016), October 26-28, 2016. Adana, Turkey.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F. O. R.; DUTRA, L. **Eficiência energética na arquitetura**. 2. ed. São Paulo: PW, 2004.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, Juliana Oliveira. **Casa eficiente:** Consumo e geração de energia. Florianópolis: LabEEE, 2010. 82 p.

LEAL, L. Q. **Sistemas avançados de iluminação: uma abordagem teórica dos coletores solares com fibra óptica como contribuição para eficiência energética no Brasil**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)–Instituto de Pós Graduação, João Pessoa, 2011.

LIGHTEFX. Distributing natural sun light with fibre optics. 2018. Disponível em: <http://www.lightefx.com.au/solar-light-collector/>. Acesso em: 18 jan. 2018.

LUIZ, A. M. **Energia solar e preservação do meio ambiente**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2013.

LUME ARQUITETURA. Fibra óptica: um revolucionário conceito em iluminação. **Lume Arquitetura**, 2009. Disponível em: <http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed17/ ed_17_Aula.pdf>. Acesso em: 26 out. 2016.

MACÊDO, C. C. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MALDONADO, E. P.; MATOS, D. C. Aspectos Fundamentais da Tecnologia de Fibras Ópticas. **Teleaulas**, 2003. Disponível em: < https://pt.scribd.com/document/43931914/Fibras-oticas>. Acesso em: 26 out. 2016.

MANI, P; NITHIYANANTHAN, K.; NAIR, P. Energy saving hybrid solar lighting system model for small houses. **World Applied Sciences Journal**, v. 33, n. 3, p. 460-465, 2015.

MANUAL FASA. 2014. Disponível em: <www.fasa.com.br>. Acesso em: 05 out. 2014.

MANUAL FASA. 5 imperdíveis lançamentos com fibras ópticas da FASA na Expolux 2016. 2016. Disponível em: <http://fibraotica.com.br/noticias/3665>. Acesso em: 13 jul. 2016.

MAYHOUB, M. S.; CARTER, D. J. Towards hybrid lighting systems: A review. **Lighting Research & Technology**, v. 42, n. 1, p. 51-71, 2010.

MAYHOUB, M. S.; CARTER, D. J. How hybrid lighting systems can be integrated into building design. **Proceedings of PLEA 2012**, 2012.

MAYHOUB, M. S. Innovative daylighting systems challenges: A critical study. **Energy and Building**, v. 80, p. 394-408, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/263281385_Innovative_daylighting_systems'_challenges_A_critical_study>. Acesso em: 23 jul. 2017.

MUHS, J. D. Hybrid solar lighting doubles the efficiency and affordability of solar energy in commercial buildings. **CADDET Energy Efficiency Newsletter**, v. 4, p. 6-9, 2000.

NARDELLI, A.; DEUSCHLE, E.; AZEVEDO, L. D.; PESSOA, J. L. N.; GHISI, E. Assessment of light emitting diodes technology for general lighting: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 368-379, 2017.

NILSSON, Karl Richard. Informação pessoal enviada para a autora por e-mail.

VU, Ngoc-Hai; SHIN, Seoyong. Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators. **Solar Energy**, v. 136, p. 145-152, 2016.

PARANS. Case. 2016. Disponível em: <https://www.parans.com/cases/>. Acesso em: 13 jul. 2016.

PÉREZ-LOMBARD, Luís; ORTIZ, José; POUT, Christine. A review on building energy information. **Energy and Building**, v. 40, p. 394-398, 2008.

PINTO, F. B. F. **Dicas preciosas em iluminação**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2014.

PURIM, C. A. **Desenvolvimento de um coletor solar para iluminação direta com fibra óptica**. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologias – PRODETEC. Curitiba, 2008.

PURIM, C.A. et al. **Sistema eletrônico de captação e direcionamento de iluminação natural para edificações utilizando fibras ópticas** – Girassol® Eletrônico. 17 ago. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/301201685_Sistema_Eletronico_de_Captacao_e_Direcionamento_de_Iluminacao_Natural_para_Edificacoes_Utilizando_Fibras_Opticas_-_Girassol®_Eletronico>. Acesso em: 08 jan. 2018.

RAMSTEDT, J. Informação pessoal por meio de envio de e-mails, 2018.

RONCAYOLO, Marcel. Transfigurações noturnas da cidade: O império das luzes artificiais. **Proj. História**, São Paulo, v. 18, p. 97-101, maio 1999.

SALLOUTI, W. Q. **Guia rápido sobre iluminação com fibra óptica**. 3. ed. São Paulo, 2011.

SANTOS, T. S. Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. **Eng Sanit Ambient**, v. 20, n. 4, p. 595-602, 2015.

SAPIA, C. Daylighting in building: Developments of sunlight addressing by optical fiber. **Solar Energy**, v. 89, p. 113-121, 2013.

SCHIRBER, M. Bringing a Little Sunshine into Our Lives. **Live science**, 23 mar. 2005. Disponível em: < https://www.livescience.com/6925-bringing-sunshine-lives.html>. Acesso em: 18 jan. 2018.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto**: reflexões sobre o ambiente construído. Curitiba: Pacto Ambiental, 2006.

SILVA, Bruno Galdino. **Análise da implantação de um sistema de iluminação solar utilizando cabos de fibra óptica no centro de tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro**. 2012. 89 p. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, M. L. **Luz, lâmpadas & iluminação**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004.

___. **Iluminação**: simplificando o projeto. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

STEVENS, W. R. **Seeing in the artificial environment**. Oxford: Pergamon Press, 1969.

SUN TO MOON. **Himawari: the sunflower**. 2018. Disponível em: <http://suntomoon. wordpress.com/2012/01/03/himwari-the-sunflower-light/>. Acesso em: 18 jan. 2018.

ULLAH, Irfan; WHANG, Allen Jong-Woei. Development of optical fiber-based daylighting system and its comparison. **Energies**, v. 8, n. 7, p. 7185-7201, 2015.

VILLAS BOAS, N. **Tópicos de Física**. 19. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

WANG, Chen; ABDUL-RAHMAN, H.; RAO, S. P. Daylighting can be fluorescent: Development of a fiber solar concentrator and test for its indoor illumination. **Energy and Building**, v. 42, p. 717-727, 2010.

WEBB, Ann R. Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, pp. 721-727, 2006.

WERRING, Christopher G. **Design and application of fiber optical daylighting systems**. Master of Science, Kansas State University, 2009. 77 p.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Óptica e física moderna**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.