



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE ILUMINAÇÃO SOLAR COM FIBRAS ÓPTICAS

Igor Vital Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Regina Célia da Silva Barros

Allil

Rio de Janeiro

Março de 2018

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE ILUMINAÇÃO SOLAR COM FIBRAS
ÓPTICAS

Igor Vital Rodrigues

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Regina Célia da Silva Barros Allil, D.Sc.

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

Prof. Maria Aparecida Gonçalves Martinez, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Rodrigues, Igor Vital

Desenvolvimento de sistema de iluminação solar com fibras ópticas/ Igor Vital Rodrigues. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XII, 57 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Regina Célia da Silva Barros Allil

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 54.

1. Sistema de iluminação solar. 2. Fibra óptica. 3. Rastreamento solar. I. Werneck, Marcelo Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedicatória

Dedico esta dissertação ao meu país que investiu em minha formação possibilitando o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecimentos

A todos que me apoiaram e ajudaram durante a realização deste trabalho, em especial à minha mãe Cleide, a meu pai José Manuel, a meu irmão Tiago e à minha namorada Liana.

Aos meus orientadores, professor Marcelo Martins Werneck e professora Regina Célia da Silva Barros Allil pelos conselhos e ensinamentos prestados.

Aos integrantes da banca, pelos conselhos e comentários que ajudaram a enriquecer o trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Instrumentação e Fotônica pelo auxílio na produção deste trabalho, em especial ao Alexandre Allil que também participou deste projeto.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE ILUMINAÇÃO SOLAR COM FIBRAS ÓPTICAS

Igor Vital Rodrigues

Março/2018

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Regina Célia da Silva Barros Allil

Programa: Engenharia Elétrica

O desenvolvimento do sistema de iluminação solar tem como objetivo iluminar ambientes internos utilizando luz solar concentrada guiada através de fibras ópticas. Como diferencial dos sistemas existentes, este projeto utiliza apenas um motor para mover a lente, não utiliza sensores de luminosidade para localizar o sol e apresenta apenas uma lente para um feixe de fibras ópticas.

Um algoritmo inteligente é implementado em um microcontrolador para controlar um único motor, sem a necessidade de sensores de luminosidade, para que a lente sempre aponte para o sol maximizando a eficiência do sistema.

Um estudo sobre a concentração solar mostra qual o limite que o feixe de fibras suporta sem ultrapassar a temperatura máxima indicada pelo fabricante. Filtros infravermelhos tiveram suas características estudadas e o mais adequado foi utilizado no protótipo com o objetivo de diminuir o aquecimento das fibras.

Duas luminárias foram desenvolvidas sendo uma projetada para iluminar de forma difusa e uniforme, e outra de forma focada e concentrada. Na difusa as fibras foram modificadas para permitir que a luz escapasse pela lateral das fibras e é mostrada uma avaliação comparativa de desempenho de distribuição de luz de cada uma das modificações feitas.

Os resultados mostram a capacidade de o sistema rastrear o sol, a distribuição da luz por cada luminária, o espectro da luz fornecido pelo sistema e a quantidade de luz que o sistema é capaz de fornecer. O sistema fornece 1.850 lúmens em um feixe de 120 fibras ópticas plásticas de 7 metros de comprimento.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT OF A SOLAR ILLUMINATION SYSTEM WITH OPTICAL FIBERS

Igor Vital Rodrigues

March/2018

Advisors: Marcelo Martins Werneck

Regina Célia da Silva Barros Allil

Department: Electrical Engineering

The development of the solar lighting system aims to illuminate internal environment using concentrated sunlight guided through optical fibers. Unlike existing systems, this model uses only one motor to move, do not use the brightness sensors to locate the sun and have only one lens for a bundle of optical fibers.

A smart algorithm is implemented in a microcontroller to control a single motor, without the need of brightness sensors, so the lens always points to the sun maximizing system efficiency.

A study of the solar concentration shows the limit that the fiber bundle supports without exceeding the maximum temperature indicated by the manufacturer. Infrared filters had their characteristics studied and the most appropriate was used in the prototype with the objective of reducing the heating of the fibers.

Two luminaires were developed with one designed to illuminate diffusely and uniformly, and another in a focused and concentrated way. In diffuse the fibers were modified to allow light to escape from the side of the fibers and a comparative evaluation of the light distribution performance of each of the modifications made is shown.

The results show the system's ability to track the sun, the distribution of light by each luminaire, the spectrum of light provided by the system, and the amount of light the system is able to provide. The system delivers 1,850 lumens in a beam of 120 plastic optical fibers 7 meters long.

Sumário

Lista de figuras	x
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 O movimento do sol em relação à Terra e a luz solar.	2
1.4 Composição do sistema de iluminação solar.....	3
1.5 Organização do trabalho.....	4
Capítulo 2 Teoria e revisão bibliográfica	6
2.1 Sistemas de iluminação solar.....	6
2.2 Princípio de funcionamento da fibra óptica.....	6
2.3 Estado da arte.....	8
2.4 Sistemas existentes comercialmente.....	9
2.4.1 Sistema Himawari®	10
2.4.2 Sistema Parans.....	10
2.4.3 Sistema Sollektor®.....	11
Capítulo 3 Rastreamento Solar	12
3.1 Formas de localização do sol.....	12
3.2 Componentes do rastreador	12
3.3 Algoritmo de acompanhamento solar.....	14
Capítulo 4 Análise da concentração solar máxima suportada por um feixe de POF	17
4.1 A fibra óptica	17
4.2 A lente de Fresnel	19
4.3 Experimentos para determinar a concentração solar máxima	22

Capítulo 5	Filtros infravermelhos	31
5.1	Teoria	31
5.2	Tipos de filtro	31
5.3	Concentração solar máxima após instalação do filtro	33
Capítulo 6	Desenvolvimento das luminárias	37
6.1	Luminária pontual	37
6.2	Luminária difusa	38
Capítulo 7	Resultados e discussões	41
7.1	Rastreamento solar	41
7.2	Distribuição da luz	42
7.2.1	Luminária difusa	42
7.2.2	Luminária pontual	43
7.3	Avaliação do espectro da luz das luminárias de fibras ópticas	44
7.3.1	O Espectro solar	44
7.3.2	Atenuação nos componentes ópticos do sistema	45
7.3.3	Espectro teórico da luz das luminárias de POFs	46
7.3.4	Espectro experimental da luz das luminárias de POFs	47
7.4	Valores de iluminância obtidos pelo sistema	49
Capítulo 8	Conclusões	51
8.1	Técnica de rastreamento solar	51
8.2	Concentrador solar	51
8.3	Fibras ópticas	52
8.4	Iluminação fornecida	52
Capítulo 9	Referências bibliográficas	54
Apêndice A	Artigos publicados em congressos	57

Lista de figuras

Figura 1 - Simulação 3D do caminho percorrido pelo sol ao longo do ano [1]	2
Figura 2 - Ilustração do sistema de iluminação solar	3
Figura 3 - Rastreador instalado em um terraço na cidade universitária	4
Figura 4 - Desvio causado pela diferença de índice de refração	7
Figura 5 - Reflexão total.....	8
Figura 6 - Rastreador SOLLEKTOR®.....	11
Figura 7 - Componentes do rastreador solar.....	13
Figura 8 - Motor de passo.....	13
Figura 9 - (a) Placas eletrônicas (b) Acelerômetro.....	14
Figura 10 - Fluxograma do algoritmo de rastreamento	16
Figura 11 - Gráfico de atenuação da fibra óptica CK-80	19
Figura 12 - Formação da lente de Fresnel	20
Figura 13 - O raio da área iluminada em relação às medidas conhecidas	21
Figura 14 - Posição do feixe em relação à lente	22
Figura 15 - Concentração solar calculada em função da distância da lente	22
Figura 16 - Imagem térmica do teste com placa acrílica.....	23
Figura 17 - Testes com feixe de fibras sob a lente ao sol.....	24
Figura 18 - Medida da temperatura do feixe com câmera térmica.....	26
Figura 19 - Medida de temperatura do feixe com termopar	27
Figura 20 - Ilustração da posição do feixe sob a lente.....	29
Figura 21 - Gráfico da transmissão do filtro "IR Cut-off" (Adaptado de Edmund Optics [18])	32
Figura 22 - Gráfico de transmissão do espelho dicróico (Adaptado de Edmund Optics [19])	32
Figura 23 - Gráfico de transmissão do vidro absorvedor de calor (Adaptado de [20])..	33
Figura 24 - Espectro de uma lâmpada halógena.....	34
Figura 25 - Espectro de uma lâmpada halógena após o filtro infravermelho.....	34
Figura 26 - Disposição do filtro infravermelho	35
Figura 27 - Nível de concentração solar por volta de 45 cm de distância da lente	36
Figura 28 - Luminária pontual.....	38
Figura 29 - Fibra com ranhuras transversais vista ao microscópio	39
Figura 30 - Luminária difusa sendo montada com as fibras ópticas	40

Figura 31 - Ângulo real e ângulo desejado sobrepostos ao longo de um dia	41
Figura 32 - Ângulo real e desejado em 30 minutos.....	42
Figura 33 - Distribuição da luz da luminária difusa na sala	43
Figura 34 - Distribuição da luz da luminária pontual em uma mesa.....	44
Figura 35 - Espectro solar.....	45
Figura 36 - Gráfico de transmissão da lente, do espelho dicróico e do feixe de fibras ..	46
Figura 37 - Espectro simulado da luz da luminária de fibras ópticas considerando a atenuação da lente, do filtro e do feixe de POFs.	47
Figura 38 - Espectro da luminária solar.....	48
Figura 39 - Espectro simulado e real da luminária normalizados e sobrepostos.....	49
Figura 40 - Sala iluminada pelas luminárias pontual e difusa.....	50

Lista de tabelas

Tabela 1 - Propriedades da fibra óptica plástica CK-80. [14]	18
Tabela 2 - Medidas do teste de temperatura do feixe em função da irradiância concentrada.....	25
Tabela 3 - Medições realizadas com a parte chanfrada da lente voltada para o sol	28

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A radiação solar é uma fonte de energia limpa, renovável e ainda pouco explorada. Sua potência de pico nominal é de 1 kW/m^2 em dias bem ensolarados. Boa parte dessa energia é luz visível que pode ser usada para iluminar ambientes, diminuindo o uso de fontes artificiais de luz no período diurno e assim diminuir gastos com energia elétrica.

No campus da UFRJ na ilha do Fundão, 40% da energia elétrica é gasta em iluminação e se houvesse um sistema de iluminação solar, esse valor seria reduzido. Lâmpadas, em sua maioria, geram calor e às vezes possuem componentes prejudiciais ao meio ambiente em sua composição, já no sistema que aqui é proposto não há esses componentes e nem transmissão de calor para o ambiente.

Hoje em dia, com o preço das fibras ópticas cada vez menor, a ideia de transportar luz através de fibras ópticas para iluminar ambientes está cada vez mais presente. Havendo uma fonte de luz sem custos e renovável, como por exemplo o sol, o interesse neste tipo de sistema aumenta significativamente.

1.2 Objetivos

Desenvolver um sistema de iluminação de ambientes internos utilizando luz solar guiada através de fibras ópticas plásticas (também chamada de POF, abreviação da forma inglesa). Esse sistema deve: rastrear o sol desde o amanhecer até o anoitecer, consumir pouca ou nenhuma energia da rede elétrica, ser viável economicamente, não gerar poluentes e promover uma iluminação adequada para salas de aula e escritórios.

Como diferencial de outros sistemas existentes, este deve ser mais prático e barato. Para isto, é usada apenas uma lente para concentrar a luz, é baseado na montagem equatorial a fim de utilizar apenas um motor e, para rastrear o sol, não são utilizados sensores de luminosidade a fim de se saber sua localização exata.

1.3 O movimento do sol em relação à Terra e a luz solar.

O movimento de rotação da Terra é constante e tem um ciclo de 24 horas, isso significa que a velocidade que o sol percorre o céu em relação a um ponto fixo na superfície terrestre é constante de 360° por 24 horas, ou então, 15° por hora. Este movimento é o responsável por fazer o sol se deslocar, tendo a Terra como referencial, de leste a oeste todos os dias.

O movimento de translação associado à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de translação faz com que, ao longo do ano, o sol percorra um caminho mais ao norte no inverno e mais ao sul no verão, para um ponto referencial fixo no hemisfério sul. Este fenômeno também é o responsável pelo equinócio (quando o dia possui a mesma duração da noite), solstício (quando o dia ou noite estão em sua duração máxima) e, conseqüentemente, as estações do ano.

No solstício de inverno, para o hemisfério sul, o sol nasce um pouco mais ao norte, enquanto que no solstício de verão nasce mais ao sul. Nos equinócios, o sol nasce exatamente no leste. A Figura 1 mostra o caminho percorrido pelo sol ao longo de um ano. Em vermelho estão os equinócios e as linhas mais externas são os solstícios.

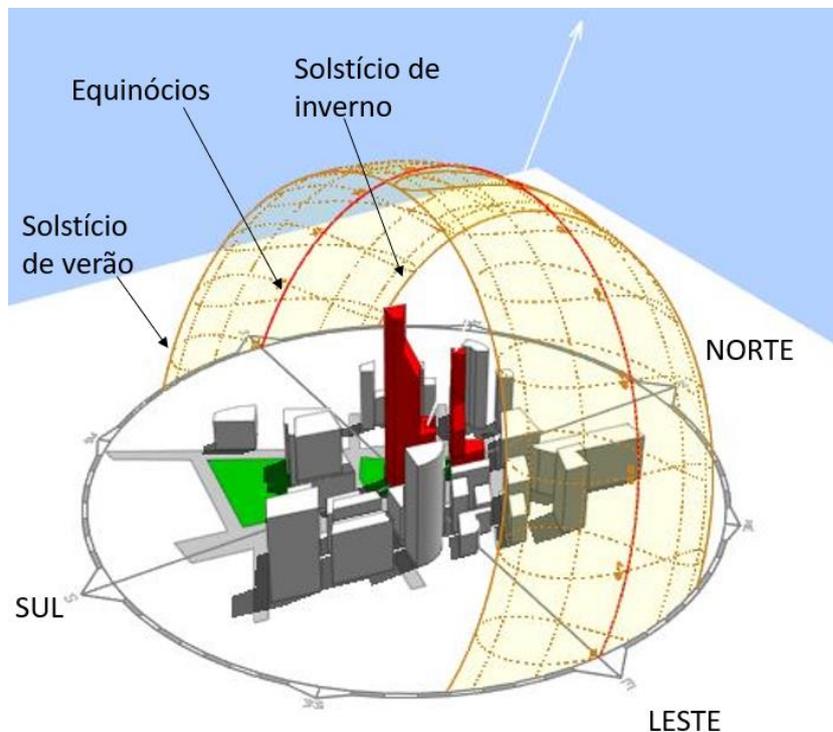


Figura 1 - Simulação 3D do caminho percorrido pelo sol ao longo do ano [1]

Quanto a mecânica, nos sistemas para observação de astros em geral, são comumente usados dois tipos de montagem: a azimutal e a equatorial, que serão vistas a seguir. Cada montagem está relacionada com um sistema de coordenadas.

A montagem azimutal apresenta dois eixos: a elevação, que é o ângulo entre o objeto celeste e o horizonte, e o azimute, que é o ângulo formado pelo ponto do horizonte mais próximo do objeto e o norte. Esta montagem é mais simples de se fazer, porém é mais difícil compensar a rotação da Terra.

A montagem equatorial também apresenta dois eixos: a ascensão reta, que compensa a rotação da Terra, e a declinação, que compensa a variação causada pela inclinação da Terra. Nesta montagem, é possível acompanhar um astro por algumas horas alterando apenas o eixo da ascensão reta pois, a declinação varia muito lentamente, cerca de 50° a cada 6 meses devido a inclinação da Terra.

1.4 Composição do sistema de iluminação solar

O protótipo do sistema desenvolvido é composto de uma lente de Fresnel de 45 cm de diâmetro, motor de passo, microcontrolador, feixe com aproximadamente 120 fibras ópticas plásticas de 2 mm de diâmetro cada e 7 m de comprimento e circuitos eletrônicos de controle do motor e interface dos sensores. A Figura 2 contém uma ilustração com os principais elementos do sistema.

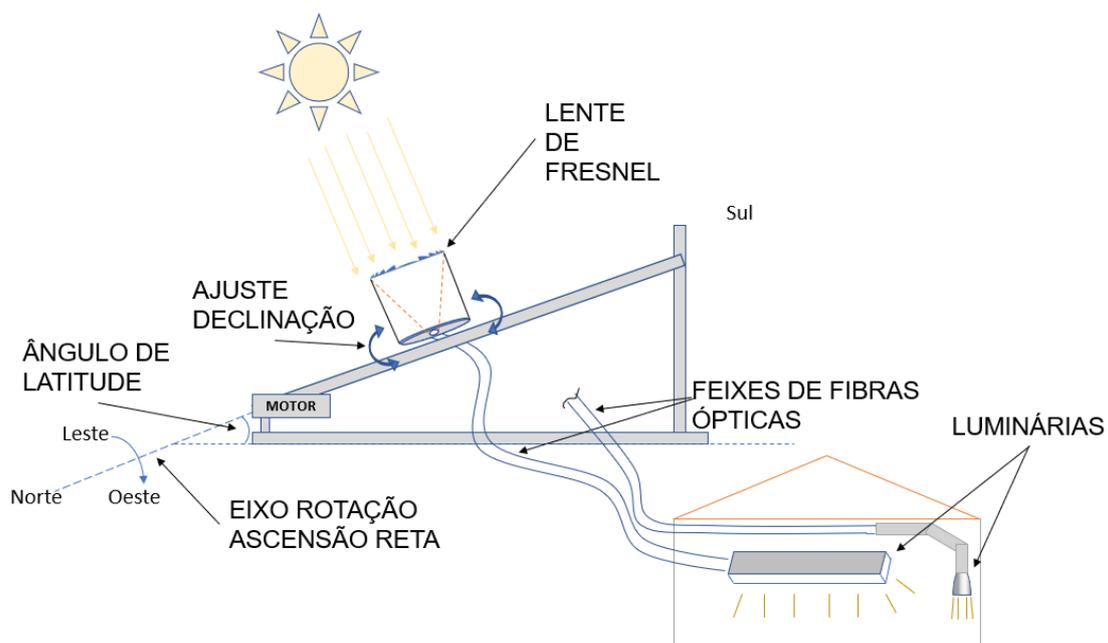


Figura 2 - Ilustração do sistema de iluminação solar

Na Figura 3 é possível observar o protótipo do rastreador que está em funcionamento no terraço de um prédio anexo ao Centro de Tecnologia da Ilha do Fundão. A radiação solar é concentrada pela lente montada no rastreador que acompanha automaticamente o movimento do sol ao longo do dia. A luz concentrada é transportada através de fibras ópticas plásticas até o ambiente que se deseja iluminar.



Figura 3 - Rastreador instalado em um terraço na cidade universitária

Para difundir a luz no ambiente pode-se simplesmente instalar as fibras no teto e apontá-las para o chão, ou pode-se fazer modificações (furos ou ranhuras) na parte lateral do final da fibra para permitir que a luz saia da fibra e se difunda no ambiente.

Há a opção também de se utilizar fibras *side-glow*, que são fibras ópticas projetadas para espalhar a luz pelos lados ao longo da fibra, mas seria necessário fazer uma conexão entre o feixe de fibras normais que sai do rastreador e o feixe de fibras *side-glow* que iluminaria o ambiente. Essa conexão teria muitas perdas e, por isto, esta ideia opção foi descartada.

1.5 Organização do trabalho

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, apresentando-se alguns sistemas de iluminação solar semelhantes existentes atualmente e uma breve explicação teórica dos elementos deste projeto. No terceiro capítulo é mostrado o algoritmo de

rastreamento solar. No Capítulo 4 é feita análise da concentração solar máxima suportada pela fibra, que é fator fundamental na quantidade de luz que será coletada. O Capítulo 5 mostra o estudo de filtros de raios infravermelhos. O Capítulo 6 apresenta o desenvolvimento das luminárias, o Capítulo 7 apresenta os resultados da distribuição, quantidade e espectro da luz das luminárias e discussões, o Capítulo 8 conclusões e o Capítulo 9 as referências bibliográfica.

Capítulo 2

Teoria e revisão bibliográfica

2.1 Sistemas de iluminação solar

A forma mais utilizada para iluminar um ambiente interno com luz solar é com janelas de vidro. São baratas e, por isso, presentes na maioria das construções. Grande parte dos prédios comerciais modernos nas grandes cidades possuem a fachada inteiramente em vidro, justamente para permitir a entrada da luz solar, diminuindo o gasto com iluminação artificial.

Outra forma de aproveitar essa luz natural é através de espelhos e outros tipos de refletores que podem ser fixos ou móveis para acompanhar o movimento do sol durante o dia. Como exemplo, pode-se citar a iluminação das estações de ônibus BRT no Rio de Janeiro onde são utilizados tubos de metal, bem polidos por dentro, para guiar a luz do telhado até as luminárias no interior das estações. Também é possível utilizar garrafas plásticas com água em seu interior posicionando-as em um buraco na laje de modo a manter metade dela para fora e metade para dentro do ambiente.

Por último, a proposta utilizada neste projeto consiste na utilização de fibras ópticas para transportar a luz concentrada por lentes através de um rastreador solar instalado no telhado até o ambiente interno. Nesta proposta, há maior eficiência, maior compactação e conseqüentemente maior intensidade luminosa concentrada.

2.2 Princípio de funcionamento da fibra óptica

A fibra óptica é um meio de propagação e condução de radiação eletromagnética luminosa. É comumente utilizada para os comprimentos de onda contidos na faixa dos 200 aos 2000 nm, o que inclui a radiação ultra-violeta, a luz visível ao olho humano e a radiação infravermelha.

O funcionamento da fibra óptica se baseia na reflexão total da luz. Esse fenômeno ocorre quando a luz é refletida, ao invés de atravessar meios com índices de refração

diferentes. A reflexão total ocorre apenas quando o seno do ângulo de incidência é igual ou maior que a razão entre o índice de refração do segundo meio sobre o primeiro.

A Lei de Snell-Descartes (2.1) descreve o desvio angular da direção do feixe de luz em relação ao índice de refração dos meios. Na Figura 4, é ilustrado um raio luminoso que atravessa do lado de índice de refração n_2 para o n_1 , sendo o meio n_2 de índice de refração maior que o meio n_1 . Na Figura 5, o mesmo raio agora incide com ângulo maior e é totalmente refletido mantendo-se no meio n_2 . Uma fibra óptica contém um núcleo com índice de refração maior que o da casca. Há um ângulo no qual a luz viaja na fronteira dos dois meios e este ângulo recebe o nome de ângulo crítico.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

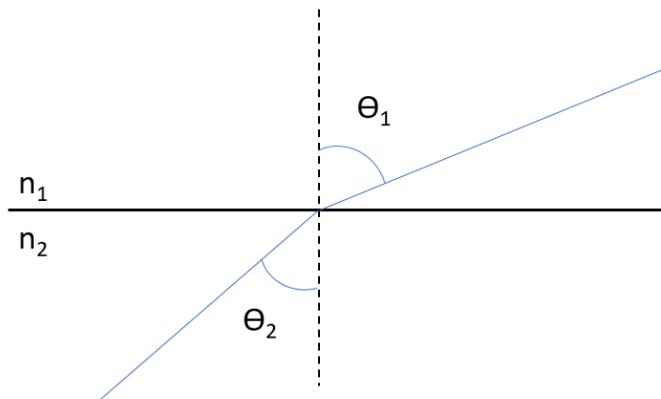


Figura 4 - Desvio causado pela diferença de índice de refração

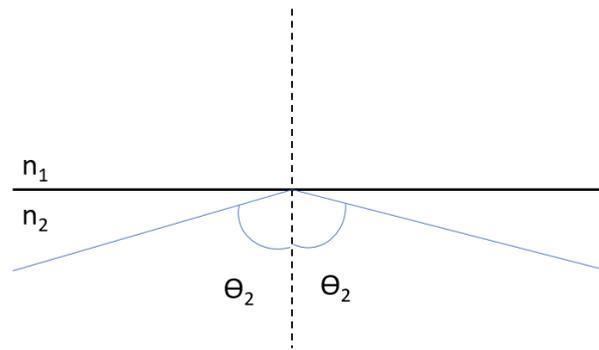


Figura 5 - Reflexão total

Em um caso ideal, não há limite para a quantidade de luz a ser conduzida pela fibra óptica, porém o material de fabricação da fibra (geralmente sílica ou polímero) absorve uma pequena parte da luz transformando-a em calor. Em altas potências, o calor produzido pela passagem da luz pode superaquecer o material a ponto de degradá-lo. No Capítulo 4, há um estudo sobre este fator limitante.

2.3 Estado da arte

Diversas são as maneiras de se iluminar ambientes internos de modo a economizar energia elétrica e/ou aproveitar a energia solar. Atualmente, os prédios comerciais possuem grandes janelas ou fachadas inteiras de vidro que permitem uma vasta penetração dos raios solares. Mesmo com esse aproveitamento da luz natural, a iluminação artificial está muito presente, pois a luz solar varia de direção durante o dia e é difícil de acompanhá-la e guiá-la.

Uma forma de aproveitar a energia do sol para iluminação é utilizar painéis fotovoltaicos associados com luminárias artificiais. Este método, por fazer dupla conversão de energia, é pouco eficiente e apresenta uma iluminação com espectro não natural.

Assim, como o projeto desenvolvido nesta dissertação, há no mundo algumas outras maneiras de se aproveitar a energia solar para iluminação de ambientes de forma a fazer sua captação, seu transporte e sua distribuição de forma eficiente.

Diversos estudos mostram modos de se iluminar um ambiente com luz solar guiada incluindo a utilização de concentradores parabólicos, concentradores secundários

do tipo *taper* (espécie de cilindro com uma extremidade afunilada), fibras de sílica, uma lente para cada fibra, montagem azimutal e etc.

O rastreador solar de SAPIA [2] utiliza espelhos parabólicos para concentrar a luz solar e fibras ópticas de 3 mm de diâmetro. Uma característica deste trabalho é o tamanho do espelho principal que possui 260 cm de diâmetro. Como resultado, cada fibra transmite 350 lúmens.

Já GORTHALA *et al* [3] apresentaram um estudo sobre concentrador composto por uma lente principal e uma lente secundária do tipo *taper*, que é uma espécie de tronco de cone. O foco deste trabalho foi desenvolver e analisar diversos tipos de concentradores secundários.

Conclusões sobre a eficiência do acoplamento dos componentes ópticos de um concentrador solar são feitas por ANAOUTAKIS *et al* [4], no qual o sistema é composto por uma lente e um *taper*.

SONG *et al* [5] fizeram um algoritmo de rastreamento solar de alta precisão que utiliza GPS e uma matriz de fotodiodos para localizar o sol. Neste caso há uma lente para cada fibra óptica plástica de 2 mm de diâmetro e a concentração solar obtida é de 2500 vezes.

COUTURE *et al* [6] projetaram um coletor solar para um sistema de iluminação de fibras ópticas híbrido baseado em ter praticidade e facilidade de implementação e eficiência. Como conclusão, dentre as opções testadas o coletor parabólico foi o mais adequado para prover concentração média de luz solar concentrada.

TSANGRASSOULIS *et al* [7] desenvolveram um rastreador solar com lente de Fresnel e fibras ópticas de núcleo líquido. Este sistema é híbrido, pois conta com luz artificial guiada por *POFs* para complementar a iluminação do ambiente.

Um concentrador de luz com configuração Cassegrain foi usado por ZHU *et al* [8] que em conjunto com um sensor fotoelétrico para rastreamento solar. Como resultado, o sistema mostrou ser de alta acurácia, boa estabilidade, alta eficiência de acoplamento óptico e longa vida útil.

2.4 Sistemas existentes comercialmente

Nesta seção são abordadas as características de alguns dos sistemas de iluminação solar a fibra óptica desenvolvidos e até já comercializados.

2.4.1 Sistema Himawari®

De origem japonesa, esse sistema de montagem azimutal utiliza lentes convexas de vidro de 95mm de diâmetro para convergir a luz solar nas fibras ópticas de sílica de 1 mm de diâmetro cada. Cada lente converge a luz em apenas uma única fibra. Este sistema é capaz de transmitir 320 lúmens por fibra [9] para uma iluminação solar de 98.000 lux.

Esta marca possui dois modelos de coletores solares, sendo um com 12 lentes e outro com 36 lentes. Cada lente converge a luz em uma única fibra e 6 fibras formam um cabo que possui 15 m de comprimento.

Ambos os coletores possuem um domo de acrílico para evitar danos de chuvas e auxiliar na filtragem dos raios ultravioletas. O coletor de 12 lentes consome 2 W e o de 36 lentes 5 W.

2.4.2 Sistema Parans

Sediada na Suécia, a Parans mostrou ser a empresa que mais evoluiu nos últimos anos. Seu sistema SP3 utiliza fibras ópticas plásticas e lentes de Fresnel. Cada lente converge a luz solar em uma única fibra que fornece 100 lúmens para um cabo de 10 m de comprimento. É baseado também na montagem azimutal e consome em média 7 W. O receptor SP3 contém 36 lentes e utiliza 6 cabos com 6 fibras ópticas cada, que podem ter comprimentos de 5 m, 10 m, 15 m e 20 m [10].

Seu sistema mais novo, o SP4, consome até 12 W e utiliza cabos de até 100 m de comprimento. Fornece de 900 até 1300 lúmens por cabo dependendo do tamanho do mesmo para uma iluminância solar de 100.000 lux. Cada cabo contém 4 fibras que recebem luz de 4 lentes de Fresnel. São oferecidos modelos de receptores de 4, 6, 8, 12 e 20 cabos [11].

Além destas melhorias, cada receptor contém geolocalização GPS, bússola e sensor de posição para auxiliarem na instalação e conexão com a internet para monitoramento pela Parans.

Esta evolução se deve, principalmente, ao fato de a Parans ter substituído as fibras ópticas plásticas por fibras de sílica. Além da fibra de sílica apresentar uma atenuação mais baixa se comparada à acrílica, enquanto a antiga apresentava uma luz de coloração

verde/azulada depois de 20 m a nova apresenta um desvio de cor para o amarelo/vermelho somente após 75 m [12].

2.4.3 Sistema Sollektor®

Da Alemanha, o Sollektor é semelhante ao SP3 da Parans, pois também utiliza uma lente de Fresnel para cada fibra óptica plástica e montagem azimutal. Apresenta três modelos de coletores: Jupiter, Mars e Merkur (Figura 6).

O Jupiter é o maior (1,8 m² de área) e fornece um total de 80.000 lúmens. O Mars é o intermediário (0,3 m²) entregando 15.000 lúmens. O menor de todos (< 0,1 m²), Merkur, fornece 3.000 lúmens. Esses valores são para fibras com comprimento entre 10 e 15 m [13].

Não há informações sobre o diâmetro e nem sobre o número de fibras que cada coletor utiliza, mas pelas imagens é possível observar milhares de lentes de fresnel, o que significa que a quantidade de fibras é muito superior aos outros sistemas vistos neste capítulo.

Devido ao elevado grau de trabalho manual, a *Bavarian Optics* parou de fabricar os produtos Sollektor® em junho de 2017, devido aos custos na Alemanha. A empresa agora busca parcerias para desenvolver uma produção automatizada ou com outros países, com custos mais baixos.

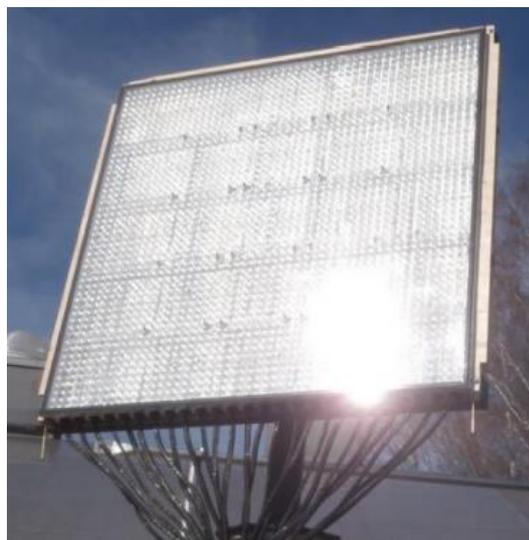


Figura 6 - Rastreador SOLLEKTOR®

Capítulo 3

Rastreamento Solar

3.1 Formas de localização do sol

Para poder acompanhar o movimento do sol ao longo do dia é necessário ter conhecimento de sua posição. Uma forma de se obter essa informação é utilizando sensores de luminosidade, a outra forma é calcular através de equações matemáticas.

A utilização de sensores de luminosidade apresenta a vantagem de funcionar sem a necessidade de configurações individuais, porém, como desvantagem, são facilmente afetados por sombras e dias nublados, além de representarem custo extra.

Calcular a posição do sol através de equações matemáticas depende de informações locais como hora, latitude e longitude, porém é mais confiável devido ao fato de não depender de medições externas, sujeitas a erro.

Para uma melhor confiabilidade, foi escolhido localizar o sol com base nas equações que retornam o horário do nascer e do pôr do sol. Com estes horários, e sabendo que o sol se movimenta de leste a oeste com velocidade angular de 15° por hora, é calculado o ângulo de ascensão reta, no qual o sol se encontra.

3.2 Componentes do rastreador

A Figura 7 mostra os principais componentes do rastreador solar desenvolvido neste trabalho. O motor, as placas eletrônicas e o acelerômetro estão em caixas para proteção.

O motor utilizado é um motor de passo, padrão NEMA 34, conectado a uma caixa de redução de 5 vezes e depois em outra de 30 vezes. Estas reduções permitem ao rastreador ter torque de 150 vezes o torque do motor mas, por outro lado, reduz sua velocidade máxima também em 150 vezes, o que não é um problema, pois a velocidade angular que se deve acompanhar é de apenas 360° em 24 horas.



Figura 7 - Componentes do rastreador solar

O fato de ser escolhido um motor de passo é por causa de seu preciso controle sobre a posição em pequenos deslocamentos e a possibilidade de fornecer elevado torque em baixas velocidades. O motor utilizado é visto na Figura 8.



Figura 8 - Motor de passo

O microcontrolador Arduino é responsável por acionar o motor através de uma placa de interface composta por relés de estado sólido. Além do microcontrolador e da placa de interface do motor, ainda há fonte de alimentação 12 V e placas para condicionamento de sinais dos sensores conforme visto na Figura 9 (a).

A posição atual é obtida através de um acelerômetro instalado no eixo de ascensão reta e conectado ao microcontrolador. O acelerômetro (Figura 9(b)) é capaz de medir o ângulo do vetor da gravidade, através de 3 eixos ortogonais com precisão de 2 casas decimais. O acelerômetro utilizado é um ADXL 362 ligado ao Arduino através de *SPI* (*Serial Peripheral Interface*).

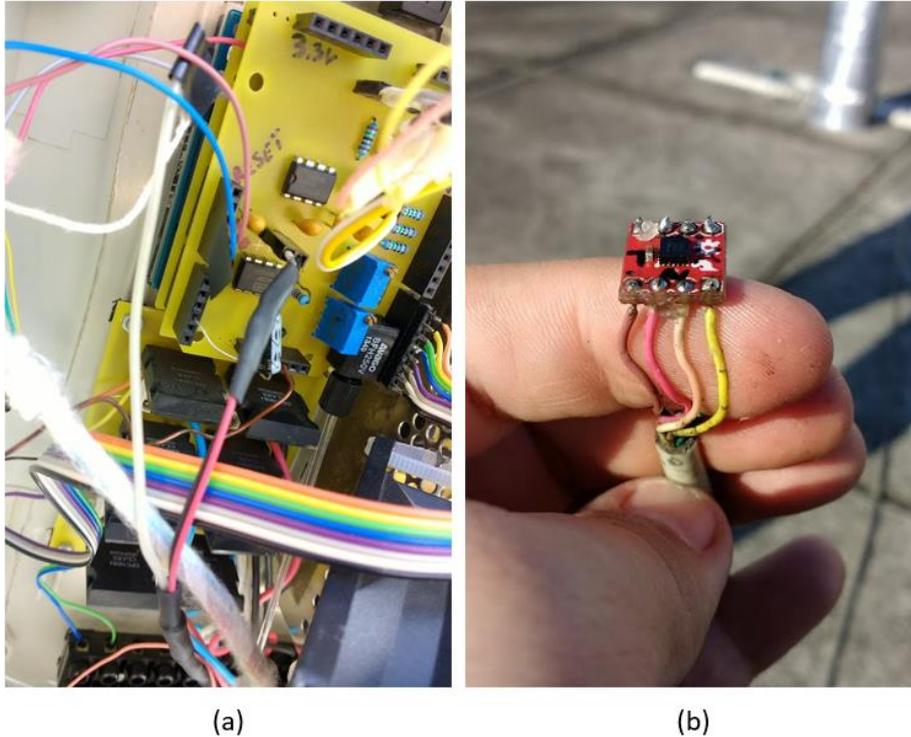


Figura 9 - (a) Placas eletrônicas (b) Acelerômetro

Os limites de segurança adotados são: ângulo do eixo de ascensão reta, sensores de fim de curso e horário.

Os sensores de fim de curso informam ao microcontrolador se o eixo de ascensão reta chegou aos limites de 0° ou 180° (limite da parte mecânica). Esta informação é muito importante, pois se o motor continuar a tentar girar o eixo, pode haver quebra de um componente mecânico ou queima do motor.

3.3 Algoritmo de acompanhamento solar

Para simplificar, foi adotado, considerando a declinação em 0° , que o eixo de ascensão reta do rastreador está em um ângulo de 0° quando ele aponta totalmente para o

leste, 90° quando ele aponta totalmente para a vertical e 180° quando ele aponta para oeste.

Com isto definido, fica mais fácil calcular a posição do sol, pois não há a necessidade de trabalhar em ângulo horário (unidade oficial da ascensão reta). Trabalhar com a ascensão reta em ângulo horário é mais simples para a localização de astros que estejam distantes, a ponto de não se moverem em relação a Terra, desconsiderando o movimento de rotação terrestre. Esta simplicidade ocorre porque desta forma a rotação da Terra já é descontada neste tipo de montagem.

O cálculo da posição do sol em um determinado horário é feito ao associar um ângulo a um horário, mas isto não é tarefa simples. Se o meio-dia solar (momento em que o sol cruza o meridiano local) acontecesse sempre ao meio-dia local, bastaria consultar uma tabela que relacionasse um horário a um ângulo. Como isto não ocorre, é necessário também calcular o horário do meio-dia solar, para então calcular um ângulo do sol em determinado momento.

Como a rotação da Terra possui velocidade constante, o momento do meio-dia solar é o horário que corresponde à metade do período em que o sol está no céu, que é definido pelo horário do crepúsculo menos o horário da alvorada.

Com o horário do meio-dia solar calculado, é feita a associação deste horário com o ângulo de 90° . A partir disto, para saber o ângulo que o rastreador deve apontar em um determinado horário, basta obter a diferença em horas até o meio-dia solar e descontar de 90° associando, proporcionalmente, 15° a cada hora da diferença.

Uma vez definido para qual ângulo o rastreador deve apontar em cada horário, é feito o algoritmo de controle do motor. O algoritmo desenvolvido calcula o ângulo da posição do sol, compara com o ângulo atual do eixo de ascensão reta do sistema e, em seguida, movimenta o eixo dependendo do resultado da comparação.

A Figura 10 apresenta um fluxograma do algoritmo que é executado repetidamente dentro de limites de segurança para evitar que o motor gire o rastreador além dos ângulos de operação.

Para evitar problemas em caso de falha dos sensores de fim de curso, há também neste protótipo uma limitação do ângulo calculado. Quando este ângulo for menor que 0° ou maior que 180° , o algoritmo o limita em 0° e 180° , respectivamente. Quanto ao horário, o algoritmo calcula o ângulo desejado a partir de 40 minutos antes do horário do sol nascer até o horário do sol se pôr.

Há uma histerese de $0,3^\circ$ no acionamento do motor, com o objetivo de não ligar o motor muitas vezes, para não gastar energia elétrica em excesso e nem superaquecê-lo. Ou seja, o motor só será acionado quando a diferença entre o ângulo calculado pelo algoritmo e o ângulo real medido através do acelerômetro for superior a $0,3^\circ$. Este valor de $0,3^\circ$ foi obtido experimentalmente considerando os erros da medida do acelerômetro causados por fatores externos tais como vibrações no sistema devidas ao vento e ao motor, etc. Como a área do feixe de fibras é menor que a área iluminada, esta diferença de $0,3^\circ$ não causa prejuízo para a iluminação.

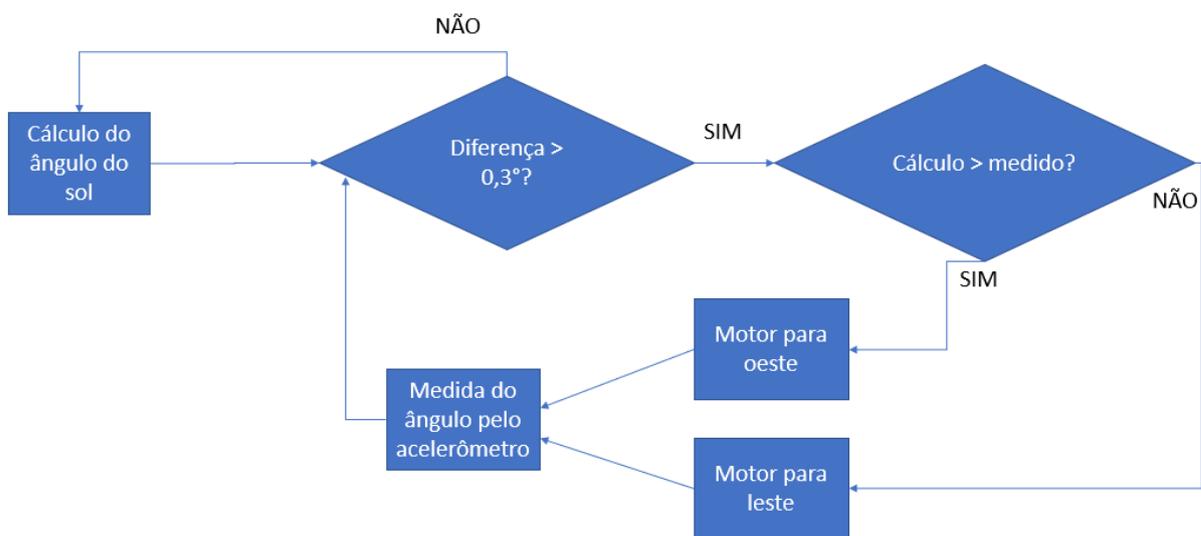


Figura 10 - Fluxograma do algoritmo de rastreamento

Capítulo 4

Análise da concentração solar máxima suportada por um feixe de POF

Este capítulo tem como objetivo determinar o comportamento do feixe de fibra óptica plástica Eska™ CK-80 de 2 mm de diâmetro, ao ficar exposta à luz solar concentrada por uma lente de Fresnel. O resultado esperado é a obtenção de um valor máximo de concentração solar que a fibra suporta sem derreter e perder suas propriedades ópticas.

Para um dia sem nuvens, costuma-se medir $1.000\text{W}/\text{m}^2$ de radiação solar total, o que é equivalente fotometricamente a aproximadamente 100.000 lux, ou seja, 100.000 lúmens por metro quadrado. Para efeitos de cálculos, são considerados 100 klux como radiação média solar e 130 klux como radiação solar de pico.

A seguir são apresentados os componentes da parte óptica do sistema, juntamente com suas características limitantes e alguns experimentos para determinação da concentração solar máxima.

4.1 A fibra óptica

A fibra óptica CK-80 utilizada neste experimento possui as propriedades [14] descritas na Tabela 1 e o gráfico das perdas de transmissão pode ser visto na Figura 11, onde é possível observar que esta fibra atenua mais a faixa do vermelho e atenua menos a faixa do verde. Segundo o *DataSheet* do fabricante, as fibras CK-80 operam, sem perdas estruturais, até a temperatura de $70\text{ }^\circ\text{C}$. Se o ambiente de operação apresentar alta umidade a temperatura limite passa a ser de $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 1 - Propriedades da fibra óptica plástica CK-80. [14]

Item		Critério de aceitação	Unidade	Mín.	Típ.	Máx
Máximo suporte	Temperatura de armazenamento	Sem danos nas propriedades ópticas	°C	-55	-	+70
	Temperatura de operação	Sem danos nas propriedades ópticas (Atmosfera seca)	°C	-55	-	+70
		Sem danos nas propriedades ópticas (Umidade do ar em 95%)	°C	-	-	+60
Propriedades ópticas	Perda de transmissão	Luz colimada de 650 nm	dB/km	-	-	200
	Abertura numérica				0,5	
Características mecânicas	Mínimo raio de dobra	Perda $\leq 0,5$ dB	mm	80	-	-
	Tensão suportada	Força longitudinal	N	260	-	-
Índice de refração	Núcleo				1,49	
Diâmetro	Núcleo		μm	1840		2080
	Casca			1880		2120

As vantagens de utilizar fibras ópticas plásticas são: elevada abertura numérica, flexibilidade, casca muito fina em comparação à área da seção reta do núcleo, maior maleabilidade e maior robustez na manipulação e em impactos. As desvantagens são: maior atenuação, maior desvio de cor, menor temperatura máxima suportada.

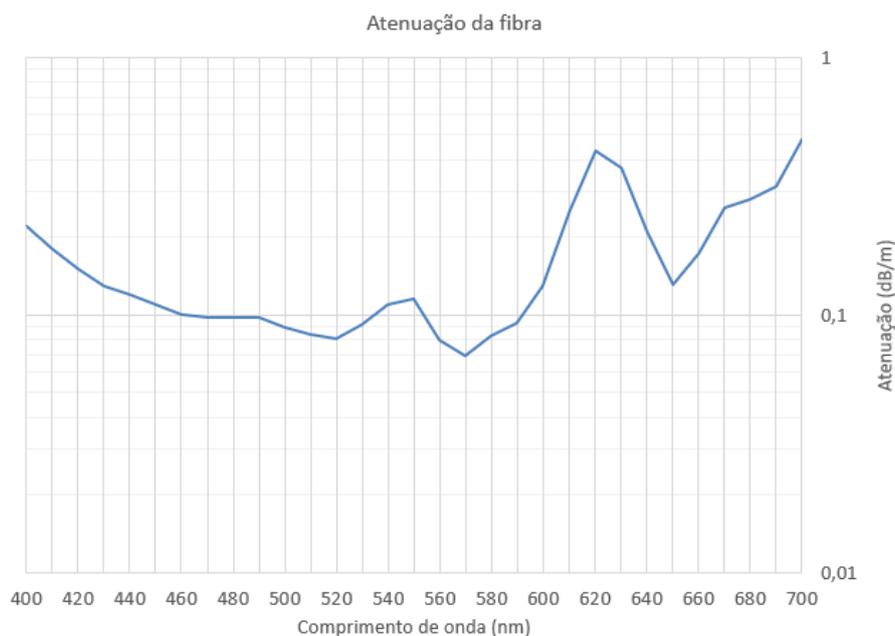


Figura 11 - Gráfico de atenuação da fibra óptica CK-80

4.2 A lente de Fresnel

A lente utilizada foi adquirida na *Edmund Optics* [15] com as seguintes características: distância focal de 45,72 cm, diâmetro efetivo de 45 cm, transmitância de 92 % (entre 400 nm e 1100 nm), índice de refração de 1,49 e temperatura máxima suportada de 80°C.

Uma lente de Fresnel possui um dos lados totalmente liso e o outro possui as ranhuras, que desviam os raios luminosos. Sua forma é proveniente de uma lente plano-convexa, conforme a Figura 12, na qual são retirados volumes de sua parte plana.

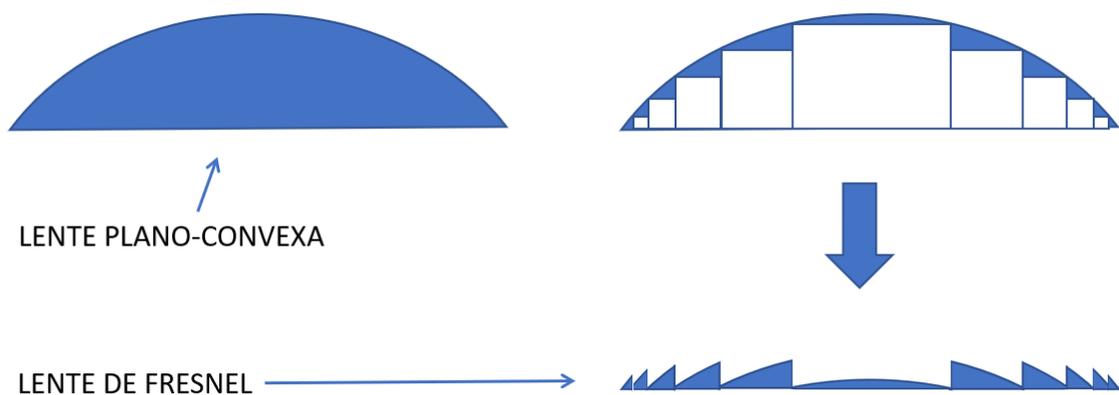


Figura 12 - Formação da lente de Fresnel

As principais vantagens de uma lente de Fresnel em relação a uma lente convexa são a menor espessura e a menor peso. Como não há no manual da lente uma indicação sobre qual lado deve ter os raios incidindo paralelamente, foi definido que o lado com ranhuras ficaria para baixo com o objetivo de acumular menos poeira ficando mais fácil sua limpeza.

O nível de concentração da luz solar depende da distância do feixe de fibras ópticas até a lente, conforme a Figura 14. Quanto mais próximo ao ponto focal, maior será a concentração. O nível de concentração para cada distância foi calculado através da razão da área da lente sobre a área iluminada naquela distância, conforme a equação (4.1), e o resultado está na Figura 15.

O cálculo da concentração é feito conforme mostrado abaixo, onde:

Φ_L = diâmetro da lente

C = concentração solar

A_L = área da lente

A_i = área iluminada

d = distância entre a lente e o feixe

d_f = distância focal

r_i = raio da área iluminada

$$C = \frac{A_L}{A_i} \quad (4.1)$$

$$A_L = \pi \left(\frac{\Phi_L}{2} \right)^2 \quad (4.2)$$

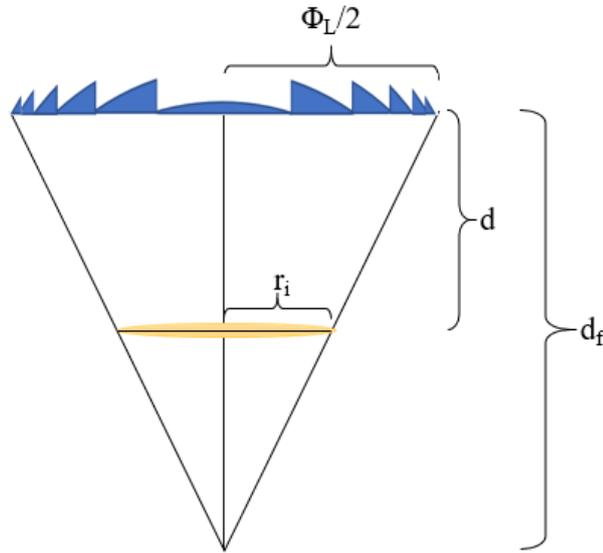


Figura 13 - O raio da área iluminada em relação às medidas conhecidas

De acordo com a Figura 13, através de semelhança de triângulos é possível obter r_i em função das medidas conhecidas d , d_f e Φ_L .

$$A_i = \pi(r_i)^2 = \pi \left[\frac{(\Phi_L/2)(d_f - d)}{d_f} \right]^2 \quad (4.3)$$

Por fim, aplicando as equações (4.2) e (4.3) na equação (4.1), obtém-se a fórmula (4.4) utilizada para calcular a concentração solar.

$$C = \frac{\pi \left(\frac{\Phi_L}{2} \right)^2}{\pi \left[\frac{(\Phi_L/2)(d_f - d)}{d_f} \right]^2} \quad (4.4)$$

Como o aumento da concentração é muito rápido perto do foco, o eixo de concentração está em escala logarítmica. Analisando o gráfico é possível notar que em um trecho de 10 cm a concentração varia de cerca de 20 até mais de 1000.

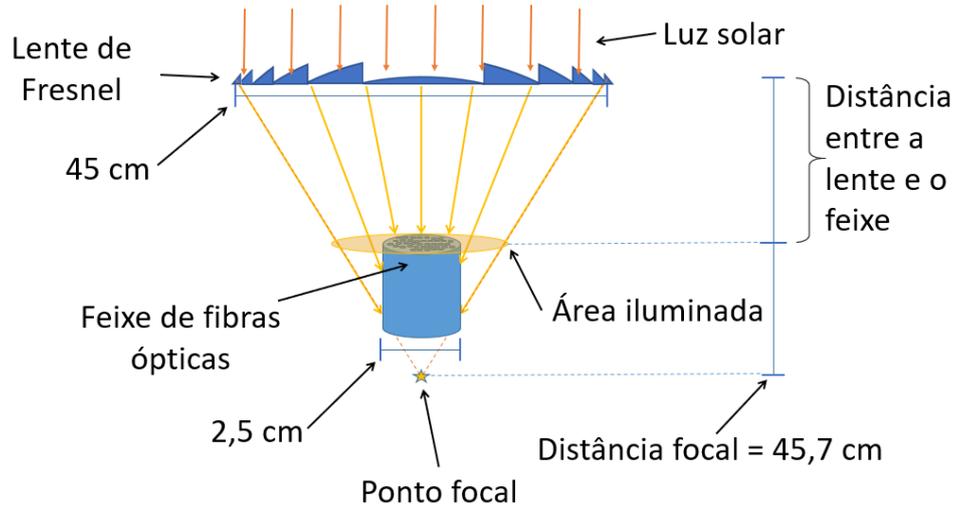


Figura 14 - Posição do feixe em relação à lente

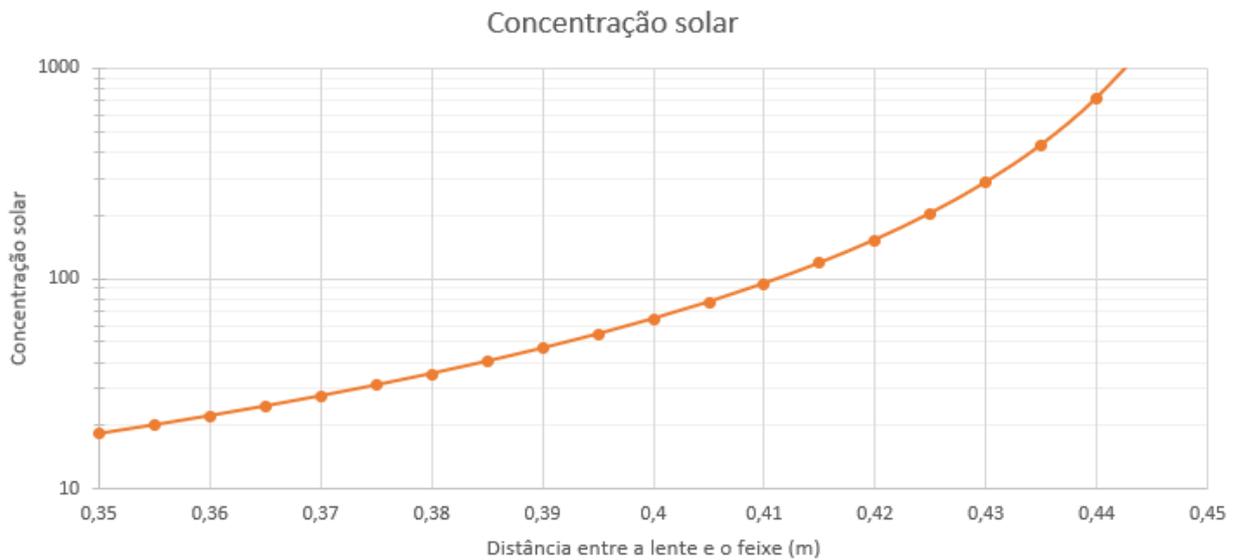


Figura 15 - Concentração solar calculada em função da distância da lente

4.3 Experimentos para determinar a concentração solar máxima

Para determinar a concentração máxima foram utilizados os seguintes materiais: lente de Fresnel [15] de 45 cm de diâmetro e de 45,7 cm de distância focal, um feixe de 2,5 cm de diâmetro com aproximadamente 120 fibras ópticas de 2 mm de diâmetro com 4 cm de comprimento, uma placa de acrílico retangular de 10 cm x 9 cm x 3 mm em um ambiente com exposição solar direta. Os equipamentos utilizados para fazer as medidas foram: luxímetro EXTECH HD450, termovisor FLIR E60 e termômetro termopar ICEL TD-990.

Num primeiro experimento a placa acrílica foi posicionada perto da lente, de modo que os raios solares concentrados incidissem na placa e aos poucos foi sendo afastada da lente, em direção ao ponto focal. Com um termovisor foi constatada qual a distância entre a lente e placa em que a placa apresentou temperatura igual à máxima suportado pela fibra.

Este procedimento com a placa acrílica foi realizado, pois ainda não havia no laboratório a fibra óptica CK-80, que é fabricada com o mesmo material da placa. Com isso, determinamos a concentração máxima suportada pelo material em condições ideais, ou seja, superfície plana, polida e contínua.

A Figura 16 mostra uma imagem térmica de um dos testes com a placa acrílica, na qual a temperatura da placa chegou a 61,2°C. É possível notar um pequeno círculo mais quente no meio da placa, o qual mostra a área atingida pelos raios solares concentrados.

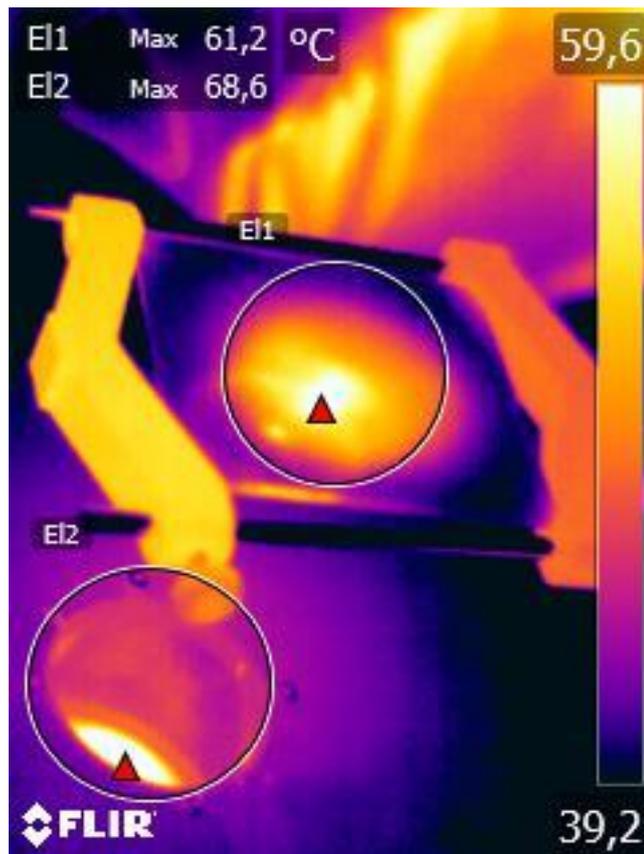


Figura 16 - Imagem térmica do teste com placa acrílica

Posteriormente, após conseguir alguns metros da fibra CK-80, foi realizado um experimento com o feixe de fibras ópticas. A Figura 17 mostra o feixe de fibras sendo ajustado de forma a alterar sua distância em relação ao foco e assim receber diferentes níveis de concentração solar.

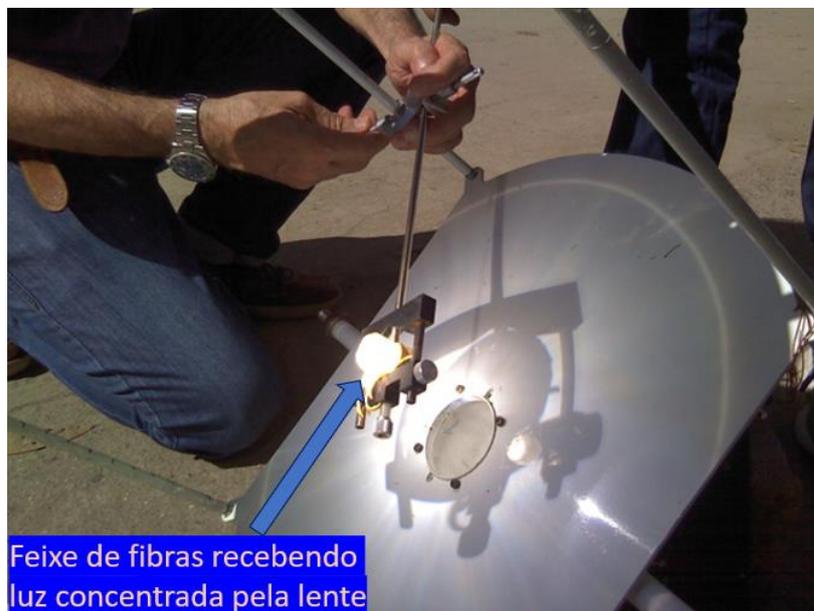


Figura 17 - Testes com feixe de fibras sob a lente ao sol

Na Tabela 2 são apresentados os valores das distâncias do feixe de fibras ao plano focal da lente (em centímetros), os horários das medidas, as iluminâncias registradas pelo Luxímetro (em k.lux) e as temperaturas aferidas pelo Termovisor (em °C).

É possível observar pela Tabela 2 que o nível de iluminância se manteve constante, validando a confiabilidade nas temperaturas registradas em relação à luz incidida no feixe. Todas as medidas foram realizadas à tarde por volta das 13h, no mês de julho, um dia ensolarado e com poucas nuvens.

A concentração solar foi calculada a partir da razão entre a área da lente e a área iluminada pela lente em um plano paralelo à lente, afastado do ponto focal pela distância da primeira coluna da Tabela 2. A densidade de potência foi calculada a partir do valor em lux obtido pelo luxímetro e a relação de 1 W/m^2 para 107 lux [16].

Tabela 2 - Medidas do teste de temperatura do feixe em função da irradiância concentrada

Distância do Feixe ao Ponto Focal [cm]	Horário [hh:mm]	Iluminância [k.lux]	Temperatura Máxima no Feixe [°C]	Concentração Solar
9	12:58	82,0	235	25
11	13:05	80,0	220	17
14	13:06	80,0	140	10
14	13:14	81,9	120	10
25	13:17	82,0	70	3,24

Temperaturas muito elevadas para a fibra foram registradas, como podem ser observadas na Tabela 2, porém as fibras não foram prejudicadas, pois o termovisor fornece a medida instantaneamente e logo que a temperatura de 70°C é ultrapassada, as fibras foram retiradas da exposição à luz concentrada. Para fins de registro, a Tabela 2 contém a maior temperatura registrada.

Em alguns momentos a fibra não esfriou o suficiente antes de iniciar o próximo teste e por isso há duas medidas, quando a distância do feixe ao ponto focal foi de 14 cm. A partir desta constatação o feixe passou a ter sua temperatura verificada antes dos testes seguintes.

Pela Tabela 2, o resultado obtido foi a distância de 20 cm entre o feixe de fibras e a lente, ou equivalentemente, 25 cm entre o feixe de fibras e o plano focal. Nessa distância a temperatura máxima no feixe foi de 70°C. (última linha da Tabela 2).

A Figura 18 mostra a medição feita pela imagem térmica. Pode-se ver o luxímetro na parte inferior da imagem e ao centro, o feixe de fibras e o suporte do feixe com as

partes metálicas protegidas do sol por um pedaço de isopor. Na área do feixe há um quadrado que contém a imagem térmica correspondente, e no centro do quadrado foi medida a temperatura de 67,7°C.

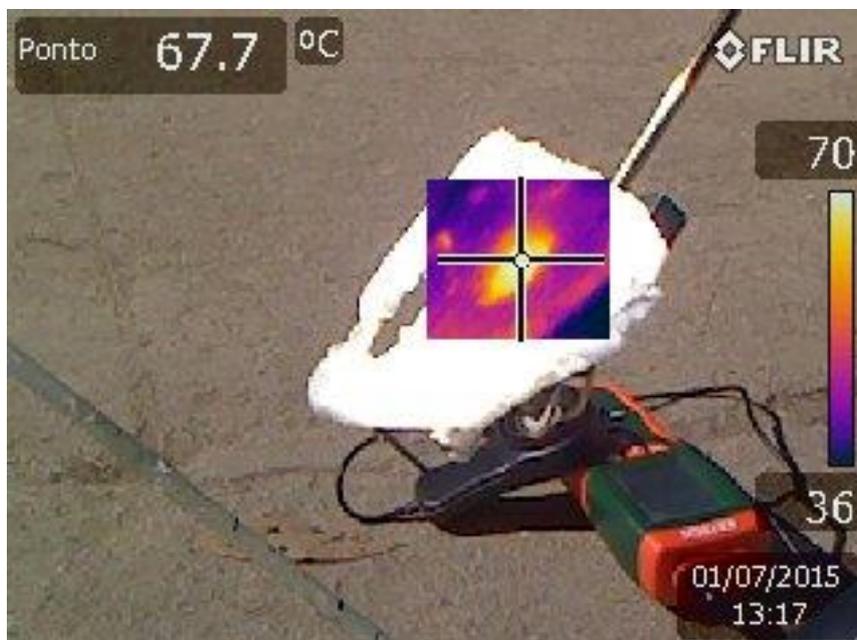


Figura 18 - Medida da temperatura do feixe com câmera térmica

Os resultados obtidos com este experimento mostraram que as fibras suportam uma concentração solar de 3,24. Ao final do experimento foi percebido, no círculo iluminado que se forma na região entre o ponto focal e a lente quando cortado por um plano paralelo a lente, um ponto muito brilhante no centro. Este ponto faz com que as fibras do centro atinjam uma temperatura muito mais alta do que as fibras da borda do feixe.

Ao tentar identificar o que seria responsável por essa distribuição irregular da luz, foram feitos testes com lentes de Fresnel. Foi descoberto que a lente possui melhor distribuição da luz quando os raios paralelos incidem pelo lado chanfrado e, ao virar a lente deixando o lado liso voltado para o feixe, o ponto brilhante desapareceu e o círculo ficou iluminado de forma uniforme.

Com isso, um experimento com a parte chanfrada virada para o sol foi feito para determinar qual a máxima concentração solar seria suportada pelo feixe. Para este segundo experimento as hastes que suportam a lente foram substituídas por barras rosqueadas, de modo a permitir um melhor controle da distância entre a lente e o local onde fica o feixe das fibras.

Para este experimento, a lente foi posicionada tocando no feixe e depois foi gradualmente elevada, de modo a descobrir qual a concentração máxima que o feixe suporta sem ultrapassar a temperatura de 70°C.

Estas medidas foram realizadas no mês de fevereiro às 12h e a irradiação solar estava em 110.000 lx. Nesta ocasião não se tinha o termovisor e foi utilizado um termômetro do tipo termopar que era devidamente encostado no feixe, imediatamente após se cobrir a lente de modo a fazer sombra no momento da medida e evitar erro, causado pelo aquecimento do sensor pelo sol.

No local desejado foi usado como suporte ao feixe um tarugo de alumínio de forma cilíndrica com um furo no meio. O material foi escolhido de forma a dissipar rapidamente o calor gerado pela concentração dos raios solares.

Depois de diversas medidas, quando a distância da lente estava em 37,5 cm, a temperatura do feixe estava em 69°C e a do tarugo de alumínio em 55°C. O diâmetro da área iluminada era aproximadamente 8 cm. A Figura 19 mostra a medida de temperatura do feixe com o termopar.



Figura 19 - Medida de temperatura do feixe com termopar

Para obter os valores de irradiância nas fibras da Tabela 3, foi feita a multiplicação da iluminância pela concentração solar. A concentração solar foi calculada da mesma forma que na Tabela 2.

Ao analisar as medidas apresentadas na Tabela 3, pode-se perceber que com uma concentração solar abaixo de 50 vezes, a temperatura se mantém dentro do limite máximo da fibra. Para o pior caso, com cerca de 4 Mlx incidindo nas fibras a temperatura já chega ao limite.

Tabela 3 - Medições realizadas com a parte chanfrada da lente voltada para o sol

Distância do Feixe ao Ponto Focal [cm]	Horário	Iluminância [k.lux]	Temp. Máxima no Feixe [°C]	Concentração Solar	Temperatura do tarugo [°C]	Irradiância nas fibras [Mlux]
4,5	12:02	106	78	105	48	11,1
5	12:12	110	78	85	58	9,3
6,5	11:55	106	48	50	38	5,3
6,5	12:24	112	69	50	48	5,6
7,5	12:35	110	69	37	55	4,1

Observando a Tabela 3 é possível observar inconsistência entre os valores de temperatura e de irradiância nas fibras. Isto se deve, ao fato das temperaturas terem sido obtidas posicionando um termômetro tipo termopar encostado nas fibras. Durante a medida foi observada grande variação da temperatura mostrada no visor do termômetro e também percebido que o vento ajudava a resfriar o sensor atrapalhando a medida. Por isto, algumas medidas foram repetidas e apresentaram resultados diferentes.

As medidas de temperatura registradas foram as máximas observadas no termômetro e devido a dificuldade de se obter um valor confiável, foi adotado o menor valor de concentração solar para os cálculos abaixo, enquanto um termômetro visual infravermelho estava sendo adquirido junto com um filtro infravermelho.

Com este valor, considerando-se uma iluminância de pico máxima de 130.000 lux, a concentração máxima deve ser de 31 para dar uma iluminância máxima nas fibras de 4,1Mlux. O valor de 130.000 lux foi escolhido, pois representa o pior caso da irradiação solar de acordo com as medidas realizadas em campo em dias de recorde de temperatura.

Os resultados do experimento com a lente na posição anterior mostraram que a concentração solar máxima para o feixe de fibra óptica foi obtida quando o feixe está a uma distância de 20 cm da lente, ou equivalentemente, 25 cm do plano focal, conforme apresentado na Figura 20.

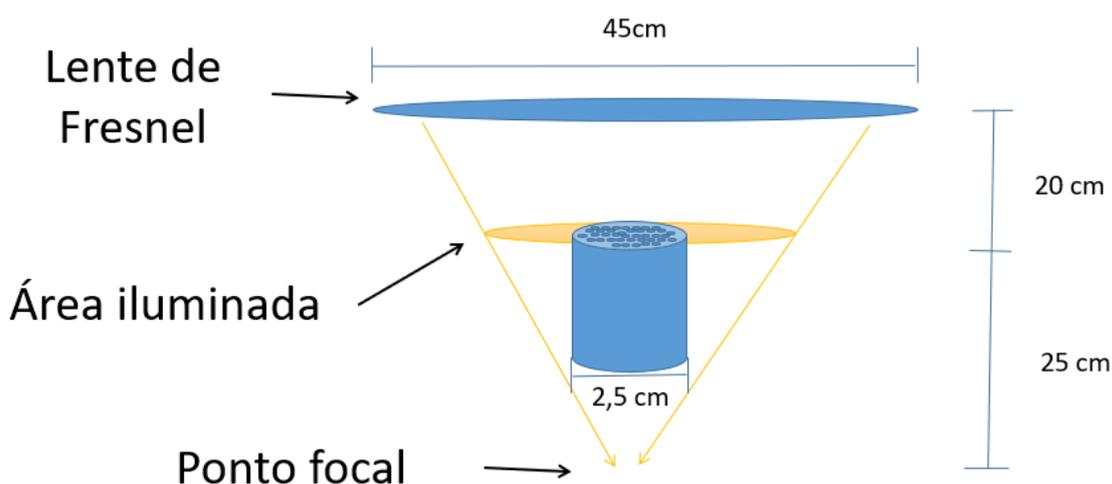


Figura 20 - Ilustração da posição do feixe sob a lente

Nesta distância de 20 cm entre a lente e o feixe, as fibras não apresentaram perdas em suas características mecânicas. Com isso, a concentração solar incidente nas fibras é a área efetiva da lente dividida pela área iluminada a 20 cm da lente. A concentração máxima no primeiro experimento, portanto, foi de 3,24 vezes a potência solar.

No experimento com a parte chanfrada da lente virada para o sol, a concentração passou para 31 já considerando o pior caso (130.000 lux). Nesta concentração, para

irradiação solar de 100.000 lx, há 3Mlx incidindo nas fibras e como a fibra tem uma área de $3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, cada fibra capta cerca de 10 lúmens.

Portanto, para um feixe de 2,5 cm de diâmetro (com aproximadamente 120 fibras) é necessária uma lente de 13,7 cm de diâmetro para se ter uma concentração de 30 vezes. Esta lente tem uma área de $0,0147 \text{ m}^2$ e sob uma iluminância de 100.000 lux capta até 1470 lúmens.

De acordo com a Figura 11, na parte visível do espectro (400~700 nm) a fibra apresenta uma atenuação média de aproximadamente 0,1 dB/m. Para 30 metros, a perda seria de 3 dB, ou seja, 50%.

Em consequência, considerando uma distância de 10 metros (equivalente a 3 andares) do rastreador até o ambiente onde se deseja iluminar, perde-se nas fibras 16,67% da luz captada, ou seja, se as fibras captassem 1200 lúmens, 1.000 lúmens chegariam ao ambiente. Esta quantidade de luz é suficiente para iluminar uma sala de 16 m^2 com 63 lux, ou então, uma sala de 5 m^2 com 200 lux.

Capítulo 5

Filtros infravermelhos

5.1 Teoria

A radiação solar é composta aproximadamente de 53% de radiação infravermelha, 8% de ultravioleta e 39% de visível [17]. A parte visível é a única necessária para este projeto e portanto, o resto poderá ser filtrado. A princípio não havia previsão para o uso deste tipo de filtro, mas devido às possíveis vantagens o mesmo foi adquirido e houve um levantamento de sua curva de resposta espectral.

Como a fibra óptica plástica absorve a radiação infravermelha e a transforma em calor, é necessário filtrá-la para poder diminuir a temperatura do feixe e aumentar a concentração solar.

Além do problema do superaquecimento das fibras, este tipo de radiação, se transmitido ao ambiente também eleva a temperatura, o que gera mais gastos com refrigeração. Com base nesses problemas, foram estudadas algumas formas de filtrar estes raios para se obter uma maior eficiência no sistema. Dentre as possibilidades de se filtrar os raios infravermelhos, as formas estudadas foram baseadas no uso de: espelho dicróico, película de controle solar e vidro absorvedor de calor.

5.2 Tipos de filtro

A primeira opção estudada foi o “Filtro infravermelho *Cut-Off*”, que transmite aproximadamente 90% na parte visível do espectro, 0% a partir de 710 nm e suporta temperaturas de até 250 °C. Seu formato é quadrado de 50 mm de lado [18]. A Figura 21 mostra o gráfico de transmissão fornecido pela Edmund Optics, fabricante do filtro.



Figura 21 - Gráfico da transmissão do filtro "IR Cut-off" (Adaptado de Edmund Optics [18])

A segunda opção foi o “*hot mirror*” que é um espelho dicróico, ou seja, um filtro que transmite uma faixa do espectro e reflete outra faixa, que neste caso transmite a luz visível e reflete o infravermelho (>700 nm). O seu uso neste projeto é indicado, pois permitiria o aproveitamento da parte infravermelha por um painel fotovoltaico, que geraria energia para o rastreador. Transmite aproximadamente 90% do visível e reflete 99% do infravermelho. O formato é quadrado medindo 50 mm de lado e é fabricado pela *Edmund Optics*. Seus gráficos de transmissão e reflexão são vistos na Figura 22.

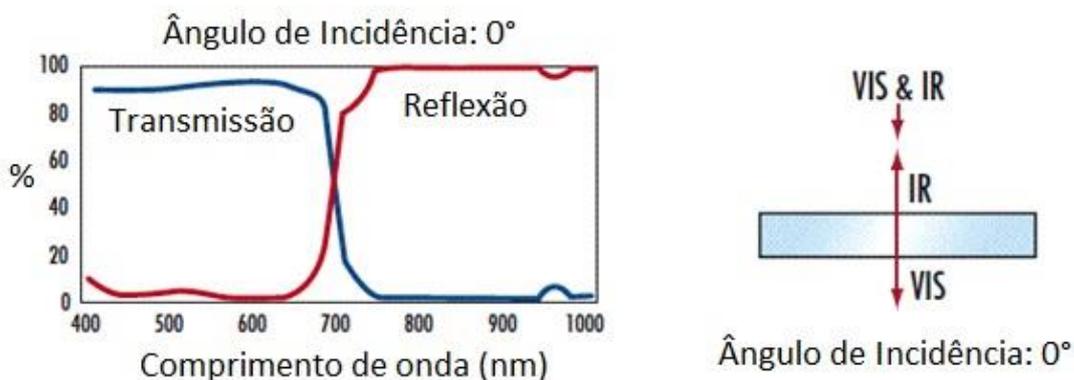


Figura 22 - Gráfico de transmissão do espelho dicróico (Adaptado de Edmund Optics [19])

Uma outra alternativa seriam as películas de controle solar, que são largamente utilizadas em janelas de automóveis para reduzir o calor proveniente do sol no interior do veículo, porém nenhum modelo apresentou satisfatoriamente as características desejadas para esta aplicação. O modelo mais indicado apresentava atenuação de 70% da luz visível.

A última opção foi o filtro absorvedor de calor que transmite aproximadamente 87% do visível e absorve 99% a partir de 800 nm. É fabricado pela Schott e suporta até 300 °C e tem o formato redondo medindo 50 mm de diâmetro [20]. A principal desvantagem é que ele absorve o calor e, como a aplicação é para raios solares concentrados, poderia superaquecer e trincar.

A Figura 23 mostra o gráfico de transmissão deste filtro, que é fabricado pela *Schott*, e pode-se observar que a faixa de transição entre o visível e o infravermelho é muito longa se comparada às opções anteriores.



Figura 23 - Gráfico de transmissão do vidro absorvedor de calor (Adaptado de [20])

5.3 Concentração solar máxima após instalação do filtro

O filtro escolhido foi o espelho dieletrico, pois possui características mais favoráveis às necessidades e também porque reflete os raios infravermelhos ao invés de absorvê-los, evitando assim um superaquecimento do filtro.

Foi feito um experimento em bancada com este filtro utilizando uma lâmpada halógena e um analisador de espectro óptico HR-400 da Ocean Optics. Na Figura 24 é visto o espectro da lâmpada halógena e na Figura 25 é possível ver o gráfico do espectro da lâmpada após passar pelo espelho dicróico. É possível observar claramente que a partir de 700 nm há uma atenuação e que a partir de 750 nm já não há mais transmissão significativa.



Figura 24 - Espectro de uma lâmpada halógena



Figura 25 - Espectro de uma lâmpada halógena após o filtro infravermelho

Após este experimento de bancada, foi feita a instalação do filtro conforme a Figura 26 e então novos experimentos foram feitos em campo para determinar a concentração solar máxima. O novo experimento já foi feito com a utilização de um termômetro visual infravermelho FLUKE VT-04.

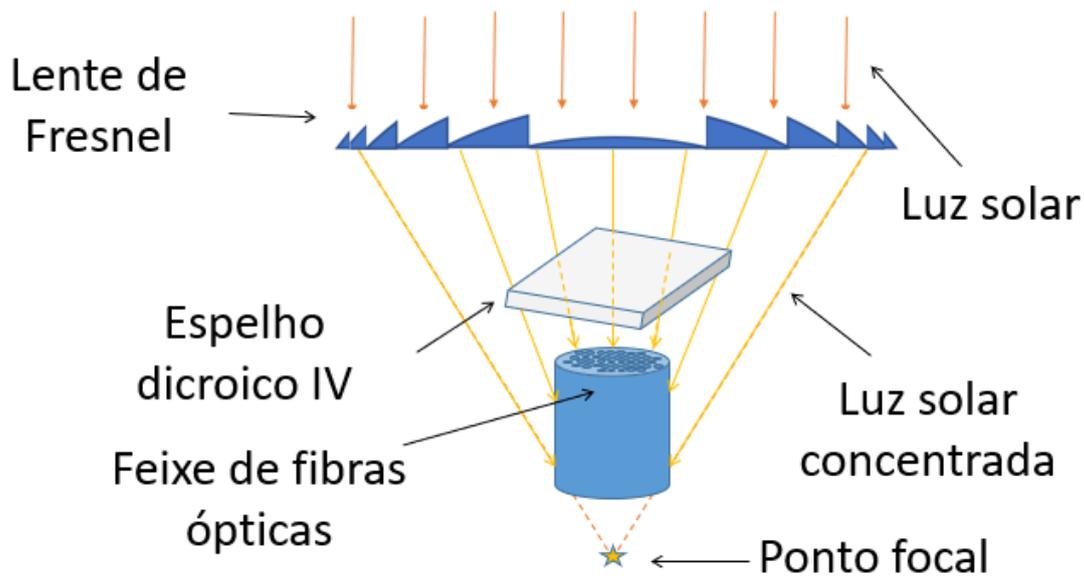


Figura 26 - Disposição do filtro infravermelho

Desta vez a concentração foi sendo aumentada até o termômetro indicar a temperatura máxima de 70°C. O resultado obtido foi de uma concentração de 94,5 para uma iluminância solar de 102 klux. Para que o sol em seu valor de pico (130.000 lux) não ultrapasse a irradiância máxima suportada pelas fibras (9.639.000 lux), foi calculada a nova concentração e o resultado foi de 74 vezes.

Este valor de concentração ideal é obtido quando a distância entre a lente e o feixe é de aproximadamente 40,5 cm. Na Figura 27 é visto a variação da concentração solar na região próxima a distância de 40,5 cm. É notável que um erro de 1 cm na distância entre o feixe e a lente pode elevar a concentração para 120. Por isto, é necessário medir com atenção para não colocar em risco a integridade das fibras.

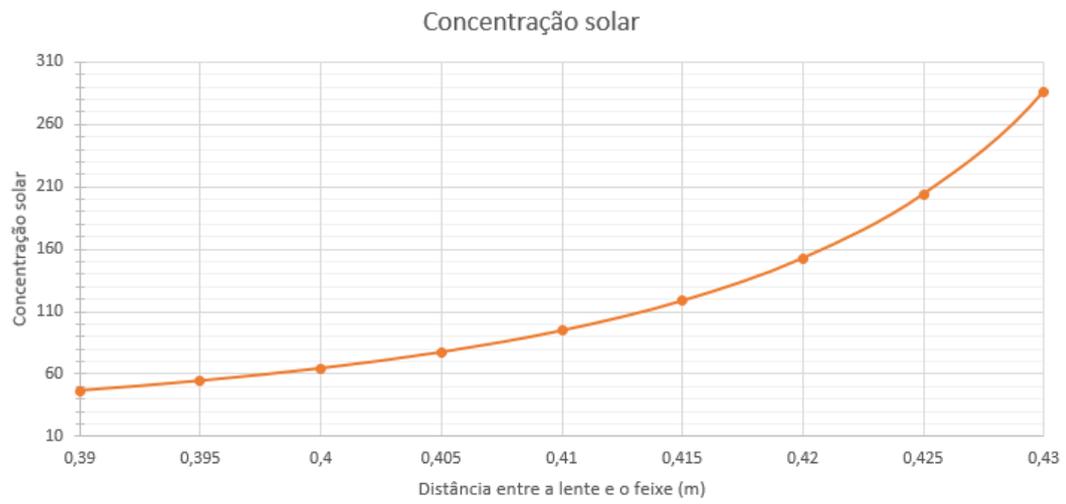


Figura 27 - Nível de concentração solar por volta de 45 cm de distância da lente

Capítulo 6

Desenvolvimento das luminárias

A iluminação de ambientes pode ser difusa quando se deseja iluminar uma área uniformemente ou pode ser focada em um local, de modo a lhe conferir um destaque como, no caso de quadros decorativos, esculturas e etc.

Para abranger essas formas de iluminação, foram desenvolvidas duas luminárias de fibras ópticas, sendo uma planejada para iluminar de forma focada/pontual e a outra de forma uniforme/difusa.

6.1 Luminária pontual

A luminária projetada para ter efeito focado é chamada neste trabalho de pontual. A fibra óptica utilizada emite luz pela extremidade em um ângulo máximo dado pela abertura numérica (NA) da fibra óptica indicada na Tabela 1. Desenvolvendo a equação que relaciona a abertura numérica com o ângulo (6.1), após o cálculo, chega-se ao resultado do ângulo de abertura do feixe de 30° (6.2).

$$NA = \text{sen}\theta \quad (6.1)$$

$$0,5 = \text{sen}\theta$$

$$\theta = 30^\circ \quad (6.2)$$

Com este ângulo da abertura numérica da fibra, já é possível cumprir com o objetivo desta luminária e, portanto, nenhuma alteração na fibra é necessária. A única preparação da fibra é o polimento, que deixa a face de saída da luz com menos imperfeições e, após isto, a luminária pode ser montada.

A montagem foi feita utilizando-se um feixe de 120 fibras ópticas, um refletor parabólico de uma luminária comercial e um disco de acrílico com 120 furos, sendo 1 por fibra, afastados entre si em 1 cm. O disco foi fixado na boca maior do refletor e as fibras

entram pela boca menor e são fixadas no disco de acrílico. A luminária pontual pode ser vista na Figura 28.



Figura 28 - Luminária pontual

6.2 Luminária difusa

A luminária difusa foi projetada para espalhar a luz em uma sala de forma homogênea. Para isto, foi necessário modificar a fibra para que a luz pudesse sair lateralmente em diversos ângulos. Como o objetivo é espalhar a luz o máximo possível, a parte a ser modificada não está restrita à ponta podendo se estender por alguns centímetros do final da fibra.

Diversas formas de alterar a fibra de modo a permitir o escape da luz pelas laterais foram estudadas, dentre elas: abrasão mecânica com lixas, abrasão química com clorofórmio, acetona e acetato de etila, furos e ranhuras longitudinais com laser de CO₂ e ranhuras transversais feitas mecanicamente.

A abrasão com lixa retira a casca, melhorando a fibra pois o ar possui índice de refração menor que a casca, e cria pequenas imperfeições na superfície da fibra, porém insuficientes para deixar escapar toda a luz pela lateral. As abrasões químicas, dependendo da substância utilizada, ou surtiram nenhum efeito ou danificaram

severamente a fibra a ponto de quebrá-la em vários pequenos pedaços ao menor dos toques. Os furos e ranhuras com laser apresentaram um resultado razoável, mas as fibras se tornaram frágeis e quebradiças após o processo. As fibras com ranhuras transversais foram elaboradas com a ajuda de um cossinete (ferramenta utilizada para abrir roscas em parafusos) e apresentaram bastante perda de luz pela lateral.

Cada uma das fibras modificadas foram dispostas na bancada recebendo luz da lâmpada halógena e foram observadas a quantidade de luz que cada uma deixava passar pela ponta. Não foi necessário fazer medição pois visualmente foi constatado que a alteração da fibra que promovia menor saída de luz na ponta, e portanto maior saída de luz pelas laterais, foi a última. A Figura 29 mostra a fibra com as ranhuras transversais feitas mecanicamente vista ao microscópio.

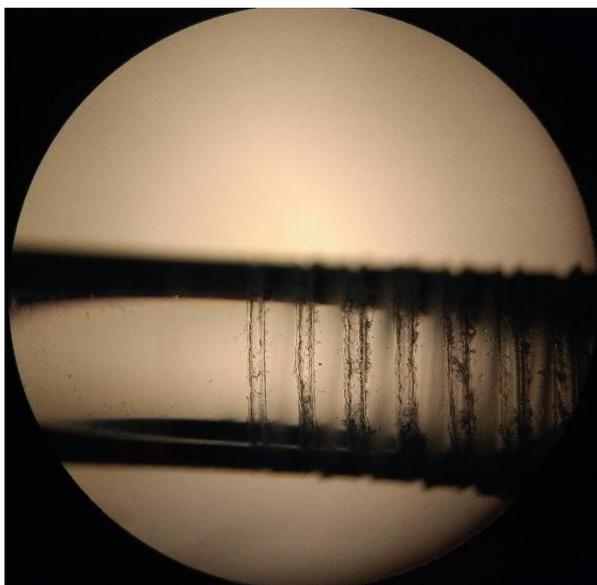


Figura 29 - Fibra com ranhuras transversais vista ao microscópio

As fibras desta luminária sofreram ranhuras em seus 20 últimos centímetros, pois com este comprimento foi constatado experimentalmente que já não saía luz significativamente pela ponta das fibras. Durante a montagem das luminárias foi constatado que curvas feitas nas partes com ranhuras das fibras aumentavam consideravelmente a saída de luz pelas laterais.

Como a luminária possui mais de 1,2 m de comprimento, foi definido que haveria 6 seções de 20 cm de fibras iluminando lateralmente. A Figura 30 mostra a luminária

difusa no processo de montagem. Das 6 seções de fibras, 5 já estavam instaladas e iluminando com o auxílio de uma lanterna na outra ponta do feixe.



Figura 30 - Luminária difusa sendo montada com as fibras ópticas

Capítulo 7

Resultados e discussões

7.1 Rastreamento solar

O rastreador se mostrou capaz de rastrear o sol com apenas um motor e sem o uso de sensores de luminosidade para localizar o sol. Para compensar a variação da declinação do sol, é necessário ajuste manual a cada 15 dias em média. A Figura 31 mostra um gráfico comparativo entre o ângulo calculado pelo algoritmo e o ângulo real medido através do acelerômetro. O ângulo real está em amarelo e coincidente com o ângulo desejado que está em azul.

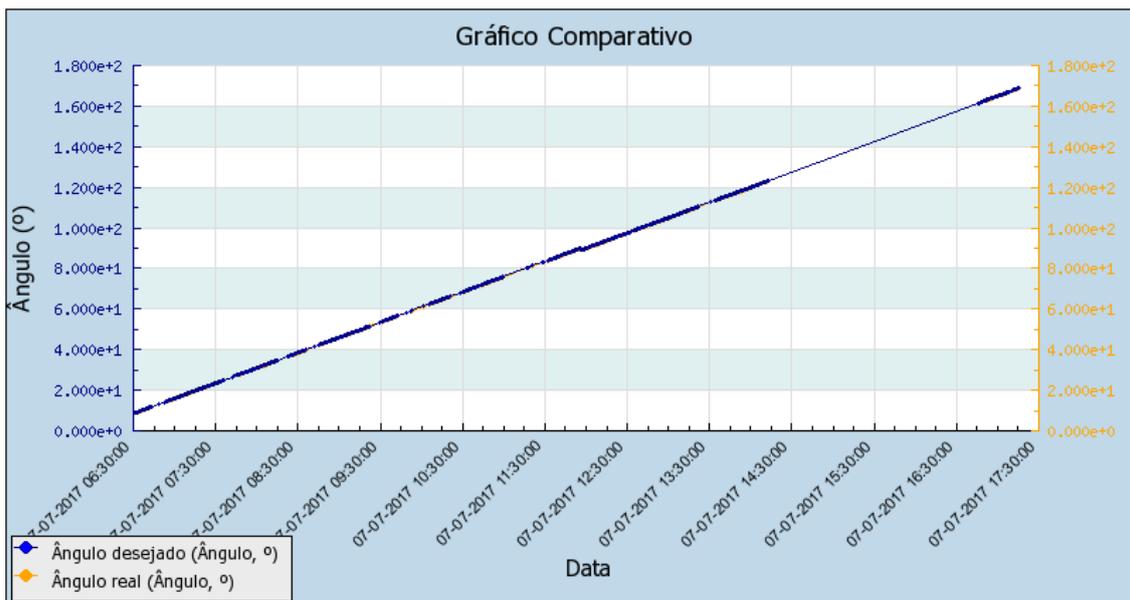


Figura 31 - Ângulo real e ângulo desejado sobrepostos ao longo de um dia

Para melhor visualização da diferença, a Figura 32 mostra o ângulo real e o ângulo desejado em um intervalo de 30 minutos. Neste gráfico o ângulo real está em azul e o ângulo desejado em amarelo.

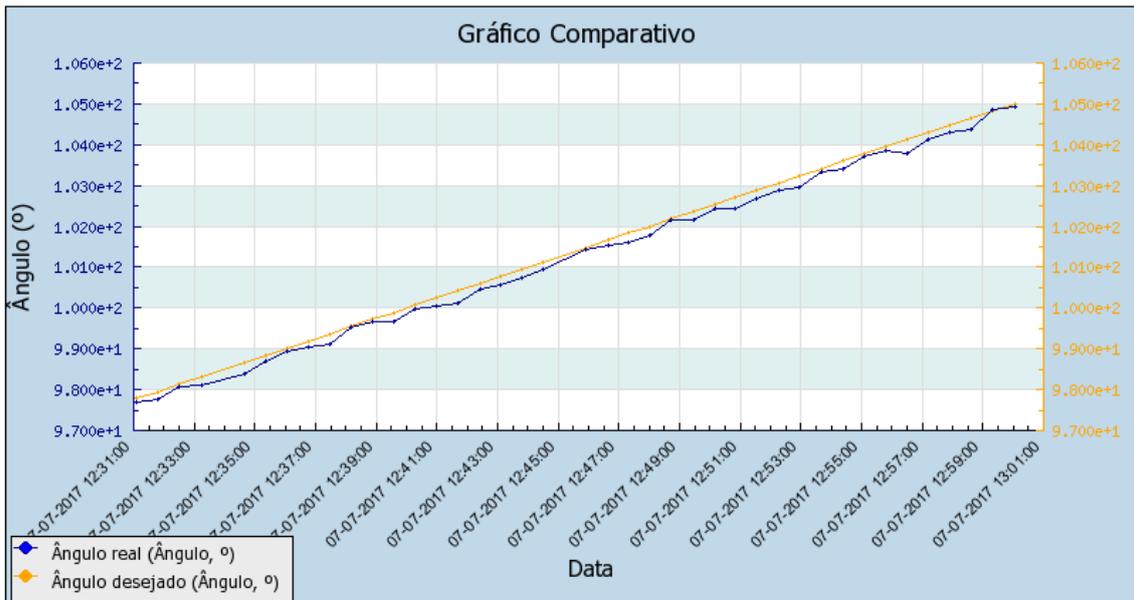


Figura 32 - Ângulo real e desejado em 30 minutos.

7.2 Distribuição da luz

Para avaliar a distribuição da luz nas áreas iluminadas pelas luminárias de fibras ópticas, foram feitas medidas de intensidade luminosa em vários pontos da sala utilizando o luxímetro Extech HD450.

As medidas da base dos gráficos estão expressas em metros e os valores de iluminância foram tomados pelo luxímetro a uma altura de aproximadamente 80 cm do chão, o que corresponde à altura de uma mesa de estudo/trabalho. A distância das luminárias até o luxímetro é de 118 cm para a difusa e 91 cm para a pontual.

7.2.1 Luminária difusa

A Figura 33 mostra um gráfico 3D da iluminância gerada pela luminária difusa ao longo da sala. É notável que a luz se distribui por uma área de aproximadamente 3 x 2 m. O eixo vertical do gráfico é a iluminância em lux, porém nesta ocasião o sistema não estava em sua concentração máxima o que explica os valores baixos. Os eixos da base estão em metros.

Distribuição da luz na sala pela luminária difusa

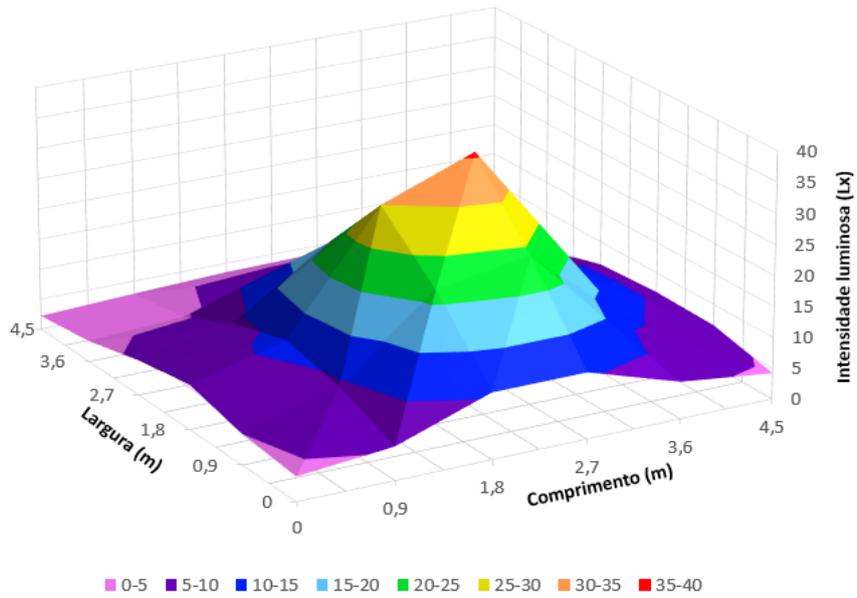


Figura 33 - Distribuição da luz da luminária difusa na sala

7.2.2 Luminária pontual

A luminária pontual, como planejado, iluminou uma área menor com maior intensidade se comparada à difusa. O gráfico 3D, que foi feito com medidas em uma área menor (tamanho de uma bancada de trabalho) para melhor visualização da distribuição, está na Figura 34. Estas medidas foram feitas com o sistema na mesma concentração do item 7.2.1.

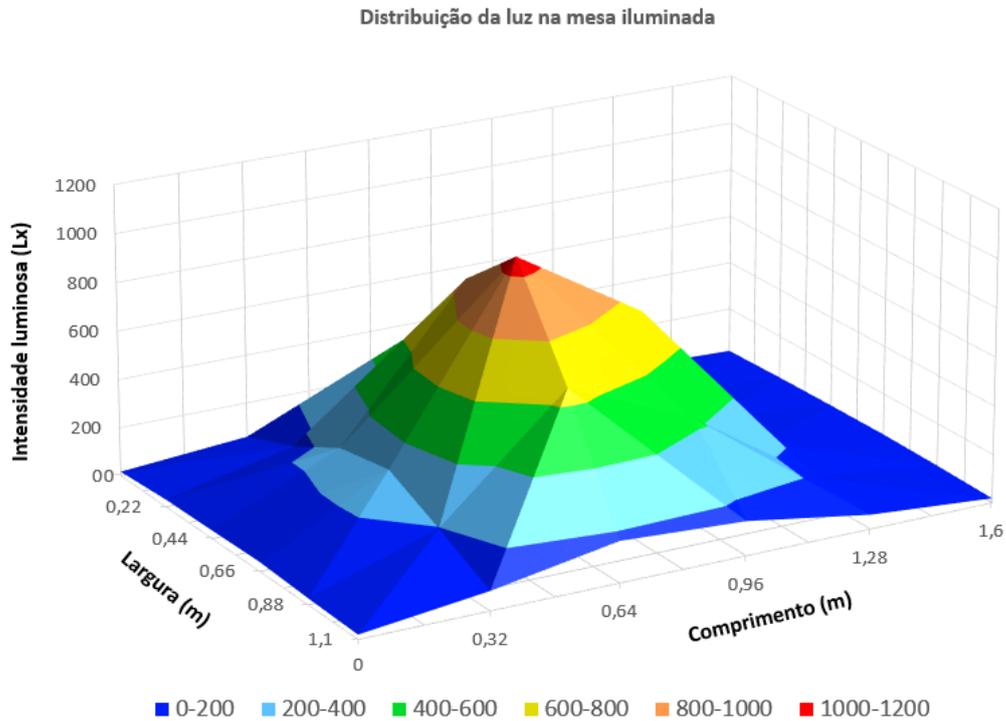


Figura 34 - Distribuição da luz da luminária pontual em uma mesa

7.3 Avaliação do espectro da luz das luminárias de fibras ópticas

7.3.1 O Espectro solar

O espectro fornecido diretamente pelo sol foi obtido através de um analisador de espectro óptico HR4000 da marca *Ocean optics*. Para isto, foi utilizado um pequeno pedaço de fibra óptica plástica para conduzir a luz até o interior do aparelho. Na Figura 35 é visto o espectro obtido pelo HR4000 onde é observado um pico na cor verde (550 nm) e menor intensidade no violeta e azul (entre 400 e 450 nm) do que na parte cor de laranja e vermelha (entre 600 e 700 nm) conforme o esperado.

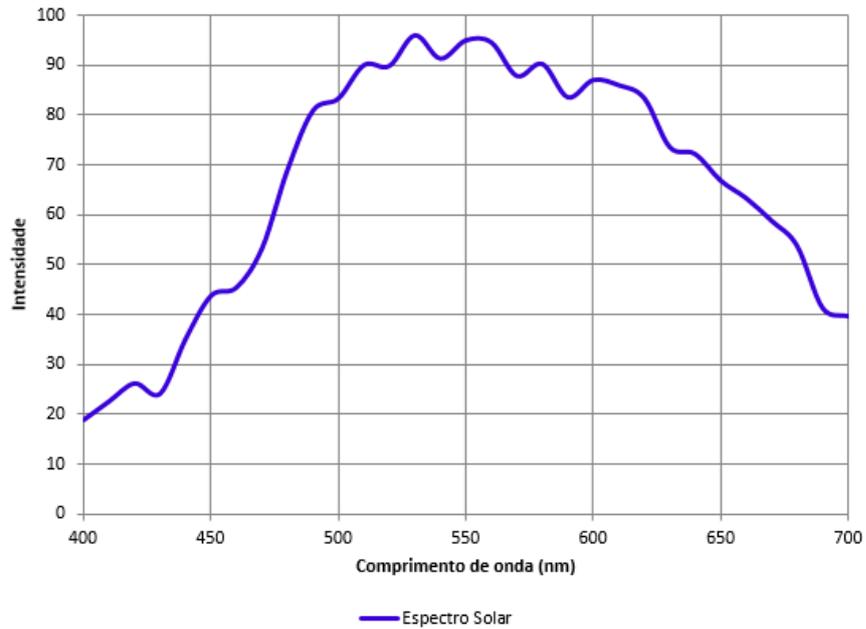


Figura 35 - Espectro solar

7.3.2 Atenuação nos componentes ópticos do sistema

Os componentes do sistema não são 100% transparentes possuindo diferentes níveis de atenuação de acordo com o comprimento de onda. Um gráfico aproximado foi feito a partir de alguns pontos dos gráficos fornecidos pelos fabricantes de cada componente. Na Figura 36 é visto este gráfico de transmissão (em porcentagem) da lente de Fresnel, do espelho diótrico infravermelho e de um feixe de 7 metros da fibra óptica utilizada.

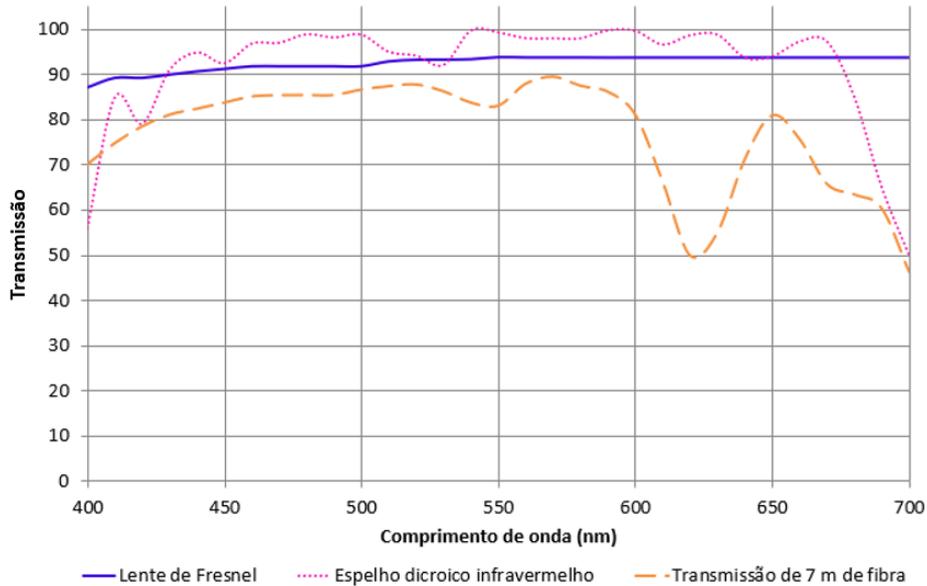


Figura 36 - Gráfico de transmissão da lente, do espelho dicroico e do feixe de fibras

7.3.3 Espectro teórico da luz das luminárias de POFs

O espectro que se espera obter na luminária de POFs é calculado a partir dos pontos do gráfico do espectro solar multiplicados pelos valores de transmissão de cada um dos componentes ópticos do sistema.

Utilizando os dados que deram origem aos gráficos da Figura 35 e da Figura 36 foi feita uma simulação do espectro fornecido pela luminária. O resultado é visto na Figura 37 onde é possível observar uma forte atenuação próxima ao comprimento de onda de 630 nm que, analisando a Figura 36, é proveniente da atenuação da fibra óptica.

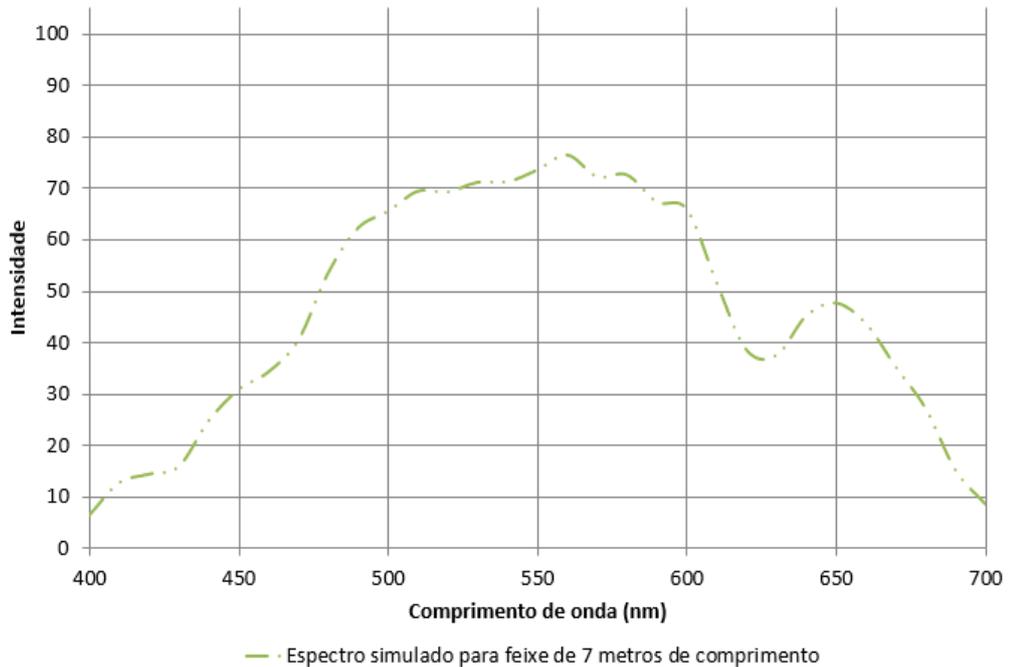


Figura 37 - Espectro simulado da luz da luminária de fibras ópticas considerando a atenuação da lente, do filtro e do feixe de POFs.

7.3.4 Espectro experimental da luz das luminárias de POFs

O espectro da luz fornecida pela luminária foi obtido com a utilização do analisador de espectro óptico HR4000 da Ocean Optics e um pequeno pedaço de fibra óptica para guiar a luz até o interior do aparelho.

Para realizar a medição, a outra ponta da fibra óptica que estava conectada ao aparelho foi sendo aproximada da luminária difusa até analisador de espectro óptico indicar um nível de intensidade forte o suficiente para não ser influenciada pela luz de fundo da sala e não muito intensa a ponto de saturar o gráfico gerado pelo HR4000. Os dados obtidos nesta medida foram utilizados para gerar o gráfico da Figura 38.

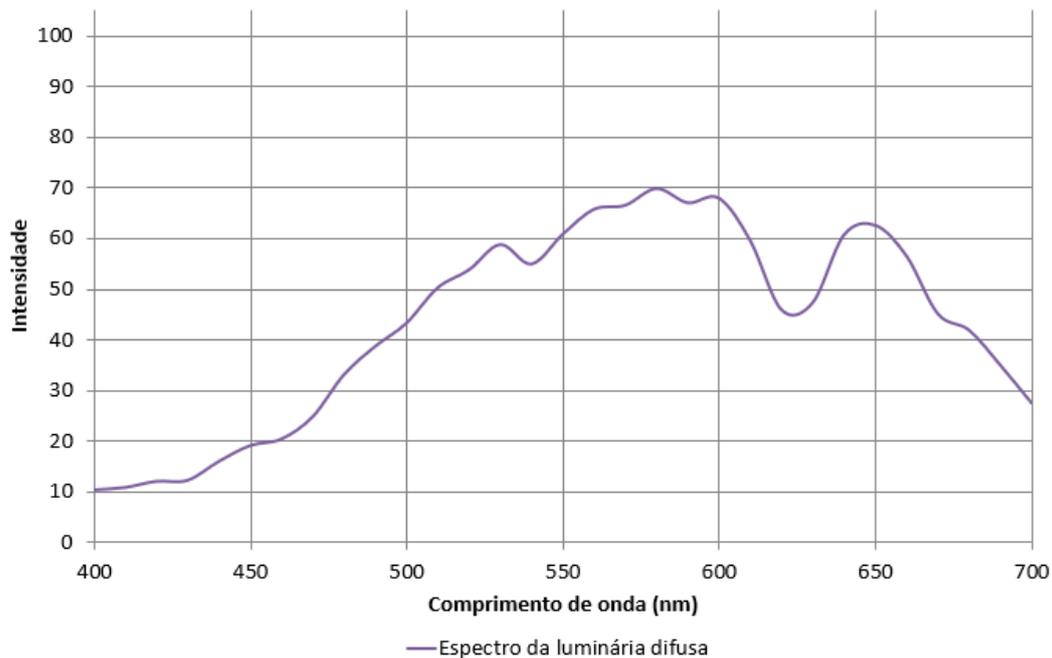


Figura 38 - Espectro da luminária solar

Para comparação, a Figura 39 mostra os gráficos da Figura 37 e da Figura 38 normalizados e sobrepostos. É possível notar semelhança entre as duas curvas porém a curva experimental mostra uma atenuação maior do que a esperada na faixa de 400 nm até cerca de 600 nm.

Esta diferença pode ser explicada pela degradação das fibras ópticas devido à exposição aos raios solares concentrados durante vários meses de funcionamento. Com envelhecimento da POF, a atenuação perto da parte ultravioleta aumenta conforme mostrado por MOHAPATRA [21].

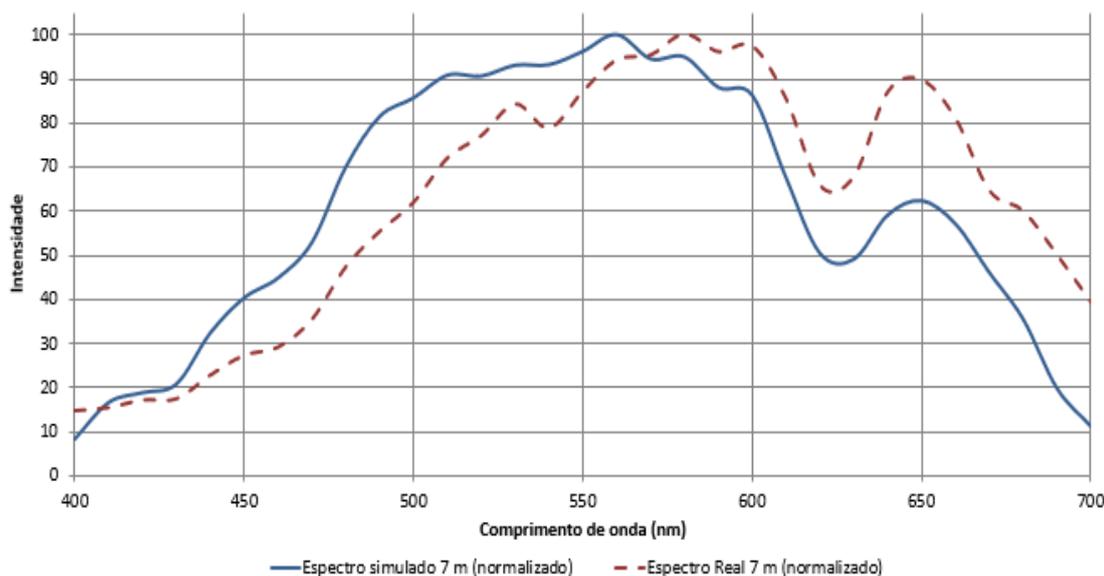


Figura 39 - Espectro simulado e real da luminária normalizados e sobrepostos

7.4 Valores de iluminância obtidos pelo sistema

Como o rastreador não possui ajuste automático da distância focal, a lente deve ficar posicionada de modo a fornecer a concentração de 74 determinada no subcapítulo 5.3. Nesta concentração as fibras recebem em um dia normal (iluminância de 100.000 lux) 7,4 Mlux. Já que a fibra óptica possui área de $3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, a quantidade de lúmens recebida por cada uma é de 23,25 lúmens.

Cada luminária desenvolvida possui 120 fibras, então cada uma recebe 2.790 lúmens. Para se determinar quantos lúmens as luminárias fornecem ao ambiente a ser iluminado, é indispensável saber o comprimento do feixe de POFs.

Utilizando dados do gráfico da Figura 36 foi feito um cálculo para obter a transmissão média de um feixe de 7 m de comprimento. O valor calculado foi de 66,3%, o que significa que um feixe de 7 m é capaz de fornecer cerca de 1.850 lúmens ao ambiente.

Para descobrir os valores máximos de iluminância que o sistema é capaz de fornecer, foi feito um ajuste da concentração da lente até que a temperatura do feixe de fibras atingisse a temperatura máxima suportada pela fibra, que é 70°C de acordo com a Tabela 1.

Para a luminária pontual, o valor máximo obtido a uma distância de 91 cm entre a luminária e o luxímetro foi de cerca de 3500 lux e para a luminária difusa foi cerca de 120 lux para uma distância de 118 cm.

A Figura 40 mostra uma sala iluminada pelas luminárias de fibras ópticas desenvolvidas neste trabalho. Neste caso, a pontual está conectada ao rastreador que está em funcionamento e a difusa foi iluminada manualmente com uma outra lente de Fresnel de modo a ilustrar a sala sendo iluminada apenas pelas duas luminárias ao mesmo tempo.

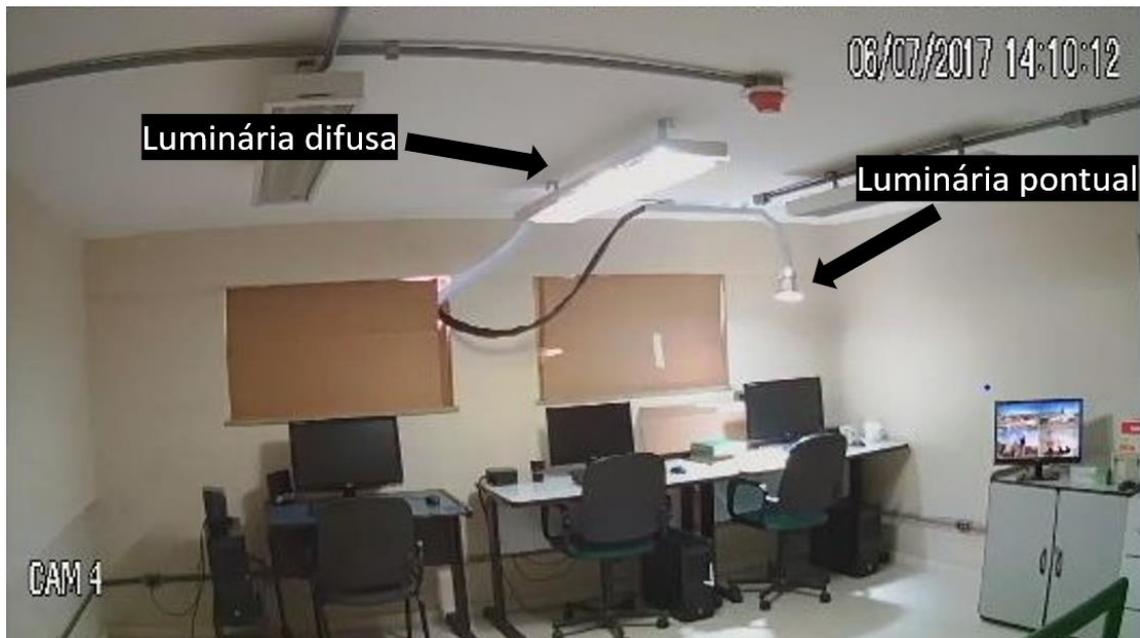


Figura 40 - Sala iluminada pelas luminárias pontual e difusa

Capítulo 8

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e discussões sobre os resultados deste trabalho. Comparações com outros sistemas semelhantes são feitas de modo a destacar vantagens e desvantagens do sistema desenvolvido neste trabalho.

8.1 Técnica de rastreamento solar

A técnica de rastreamento solar mostrada no Capítulo 3 nos permite concluir que o erro entre o ângulo que o rastreador está e o ângulo no qual ele deveria estar é de $0,3^\circ$ para mais ou para menos, o que pode ser confirmado ao observar a Figura 32. Como a lente utilizada está superdimensionada, ou seja, maior do que o necessário para iluminar a área do feixe, a área iluminada que atinge o feixe é maior que ele permitindo erros da ordem de alguns graus. Com isso, uma precisão alta como a do trabalho de SONG *et al* [5] não é necessária desde que haja uma lente superdimensionada.

A escolha da montagem equatorial se mostrou muito eficiente, pois apenas utiliza um motor e não causa prejuízo ao rastreamento. O ajuste manual de declinação durante os testes do protótipo se mostrou necessário ser feito a cada 7 ou 15 dias (dependendo da estação do ano) com a lente superdimensionada.

Dessa forma, a técnica de rastreamento adotada neste trabalho é considerada de baixo custo, pois não utiliza sensores de luminosidade para localizar o sol e utiliza apenas um motor para movimentar o rastreador.

8.2 Concentrador solar

O método de concentração solar usando lentes de Fresnel de 45 cm de diâmetro feitas de polímero se mostrou muito eficiente pois já alcançou a concentração máxima suportada pelo feixe fibra óptica plástica.

A concentração até poderia ser maior se ao invés de se trabalhar com um feixe, fosse utilizada uma lente para cada fibra permitindo a fibra dissipar melhor o calor, no

entanto um dos objetivos deste trabalho é simplificar o sistema de modo a reduzir custos e complexidade da instalação. Caso fosse utilizada uma lente para cada fibra, a complexidade na fabricação seria muito maior em termos de mão-de-obra e tempo.

Isto exposto, o método de concentração solar aqui utilizado atende o limite suportado pelo feixe de fibras e é mais simples de se fabricar se comparado aos sistemas comerciais existentes.

8.3 Fibras ópticas

As POFs determinaram o nível de concentração solar suportado pelo sistema devido à baixa temperatura máxima suportada. Fibras de sílica, embora sejam mais rígidas, atenuam menos e de modo mais plano, ou seja, não causam tanto desvio de cor como as POFs.

Assim como feito pela empresa Parans, visto no subcapítulo 2.4.2, fica como sugestão de trabalho futuro a substituição do feixe de POF por um feixe de fibras de sílica e posterior comparação com os resultados obtidos com a POF. Um outro ponto a ser observado é comparação da vida útil da POF com a de sílica, o que levaria alguns anos até se obter os resultados.

Uma tabela comparativa entre as características físicas das fibras sílicas e de polímero é apresentada por CHIANG *et al* [22], onde é possível observar as inúmeras vantagens da fibra de sílica no contexto de iluminação.

Após alguns meses de testes as POFs utilizadas no feixes já apresentam sinais de degradação. Ao observar a ponta do feixe que recebe a luz concentrada é possível notar que as fibras não estão tão transparentes como no dia da instalação apresentando pequenas trincas e um aspecto esbranquiçado.

8.4 Iluminação fornecida

Como o sistema não apresenta um ajuste de concentração automático, deve-se deixar em uma concentração de forma que o valor de pico de iluminância solar após concentrado não ultrapasse o valor máximo suportado pelas fibras. Com isso, o sistema só fornece iluminação máxima quando a iluminância solar estiver em seu momento de pico.

De acordo com a norma ABNT de iluminação de ambientes de trabalho [23], a iluminância média a ser mantida em salas de aulas é de 300 lux. Com isto, como sistema

desenvolvido neste trabalho fornece 1.850 lúmens por luminária (com 7 metros de feixe), a iluminação fornecida é suficiente para iluminar 6 m² de uma sala de aula seguindo a norma de iluminação.

É possível aumentar a quantidade de luz colocando mais do que 120 fibras, pois a área iluminada é maior do que a área do feixe de 120 fibras, porém o ajuste de declinação deverá ser feito com uma frequência maior. Portanto, fica a critério do usuário, utilizando as informações contidas neste trabalho, definir qual a melhor forma de iluminar seu ambiente levando em conta o custo das fibras e a periodicidade dos ajustes manuais na lente.

Capítulo 9

Referências bibliográficas

- [1] D. A. Marsh, “andrewmarsh.com,” 2014. [Online]. Available: <http://andrewmarsh.com/apps/releases/sunpath3d.html>. [Acesso em 08 03 2018].
- [2] C. Sapia, “Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber,” *Solar Energy*, vol. 89, pp. 113-121, 2013.
- [3] R. Gorthala, M. Tidd e S. Lawless, “Design and development of a faceted secondary concentrator for a fiber-optic hybrid lighting system,” *Solar Energy*, vol. 157, pp. 629-640, 2017.
- [4] G. E. Arnaoutakis, J. Marques-Hueso, T. K. Mallick e B. S. Richards, “Coupling of sunlight into optical fibres and spectral dependence for solar energy applications,” *Solar energy*, vol. 93, pp. 235-243, 2013.
- [5] J. Song, Y. Zhu, Z. Jin e Y. Yang, “Daylight system via fibers based on two-stage sun-tracking model,” *Solar Energy*, vol. 108, pp. 331-339, 2014.
- [6] P. Couture, M. Mostefa e A. Al-Azzawi, “Designs of Solar Collector for Hybrid Fiber Optic Lighting System,” em *IEEE electrical Power & Energy Conference*, Halifax, 2010.
- [7] A. Tsangrassoulis, L. Doulos, M. Santamouris, M. Fontoyntont, F. Maamari, M. Wilson, A. Jacobs, Zimmerman, A. Zimmerman, W. Pohl e G. Mihalakakou, “On the energy efficiency of a prototype hybrid daylighting system,” *Solar Energy*, vol. 79, pp. 56-64, 2005.
- [8] Z. Zhu, Y. Xu e G. Shao, “An Automatic Sun Tracking System for Solar Energy Based Optical Fiber Lighting,” em *IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Kuta, Indonesia, 2015.
- [9] Himawari, “<http://www.himawari-net.co.jp/>,” Abril 2014. [Online]. Available: <http://www.himawari-net.co.jp/e-pdf/New-Himawari-Catalogue-140331-1.pdf>.
- [10] Parans, “ParansProductSpecifications,” [Online]. Available: www.parans.com. [Acesso em 11 01 2016].

- [11] Parans, “ParansProductSheet-http://www.parans.com/the_product-en.cfm?id=49,” [Online]. Available: <https://www.dropbox.com/s/cx310vnx8x300cs/Parans%20Product%20Sheet.pdf?dl=0>. [Acesso em 03 11 2017].
- [12] T. Arnardottir e A. Hartmann, *Creating a simulation script for a fiber optic daylighting system*, Lund, Suécia: Lund University, 2014.
- [13] Bavarian Optics, “SOLLEKTOR,” [Online]. Available: <https://www.bavarianoptics.de/solutions/sollektorr/>. [Acesso em 03 Novembro 2017].
- [14] MITSUBISHI RAYON CO., LTD., “<http://i-fiberoptics.com>,” Fevereiro 2010. [Online]. Available: <http://i-fiberoptics.com/pdf/ck80.pdf>. [Acesso em 20 novembro 2017].
- [15] “Edmund Optics,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/18.5quot-diameter-18quot-focal-length-fresnel-lens/>. [Acesso em 25 09 2017].
- [16] R. W. Thimijan e R. D. Heins, “Photometric, radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion,” *HortScience*, pp. 818-822, dezembro 1983.
- [17] J. E. Frederick, H. E. Snell e E. K. Haywood, “Solar ultraviolet radiation at the earth's surface,” *Photochemistry and Photobiology*, pp. 443-450, October 1989.
- [18] “Edmund Optics,” [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/shortpass-edge-filters/ir-cut-off-filters/54516/>. [Acesso em 20 03 2017].
- [19] “Edmund Optics,” [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-mirrors/hot-cold-mirrors/hot-mirrors/54515/>. [Acesso em 20 03 2017].
- [20] “Edmund Optics,” [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/bandpass-filters/schott-kg-heat-absorbing-glass/49095/>. [Acesso em 20 03 2017].
- [21] B. N. Mohapatra, R. K. Mohapatra e M. R. Kumar, “A Review of Solar Fiber Optic Lighting Systems,” em *International Conference and Workshop on Electronics & Telecommunication Engineering*, Mumbai, India, 2014.

- [22] S.-Y. Chiang, T.-H. Chiang, C.-C. Wei e C.-L. Peng, “Fiber Optic Lighting Development Trends in Asia,” em *IITA International Conference on Services Science, Management and Engineering*, Zhangjiajie, China, 2009.
- [23] ABNT, *Norma ABNT NBR ISSO/CIE 8995-1 Iluminação de ambientes de trabalho*.

Apêndice A

Artigos publicados em congressos

Alexandre Allil, Alfredo Manchego, Igor Rodrigues, Regina Allil and Marcelo Werneck, "Solar Tracker Development Applied to Ambientes Illumination and Microalgae Cultivation", Paper 80, Proceedings of the 26th International Conference on Plastic Optical Fibres, POF2017, held at Melia Ria Hotel & Spa, Aveiro, Portugal, ISBN: 978-989-97345-2-4, September 13 to 15, 2017.

Alexandre S. Allil, Igor V. Rodrigues, Alfredo O. C. Manchego, Regina C. S. B. Allil and Marcelo M. Werneck, "Solar Lighting System for Smart Buildings", presented at the Light Transmission session, XL Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, held at Armação dos Búzios, RJ, Brasil, from August 27 to 31, 2017.