



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

MARCIO ALEXANDRE DIAS GARRIDO

**Fluxo de Calor Sensível Estimado por
Triangulação de Potências Óticas em Espaço
Livre**

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

MARCIO ALEXANDRE DIAS GARRIDO

Fluxo de Calor Sensível Estimado por Triangulação de Potências Óticas em Espaço Livre

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistema de Comunicações Óticas

Orientador:

Vinicius Nunes Henrique Silva

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

G241f Garrido, Marcio Alexandre Dias
Fluxo de Calor Sensível Estimado por Triangulação de
Potências Óticas em Espaço Livre / Marcio Alexandre Dias
Garrido. - 2022.
71 f.: il.

Orientador: Vinicius Nunes Henrique Silva.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2022.

1. FSO. 2. Turbulência Atmosférica. 3. Constante de
Estrutura. 4. Ótica. 5. Produção intelectual. I. Silva,
Vinicius Nunes Henrique, orientador. II. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD - XXX

MARCIO ALEXANDRE DIAS GARRIDO

Fluxo de Calor Sensível Estimado por Triangulação de Potências Óticas em Espaço Livre

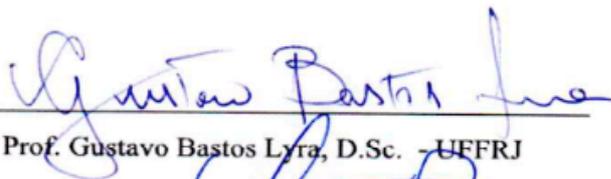
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistema de Comunicações Óticas.

Aprovada em maio de 2022

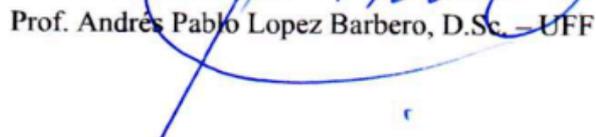
BANCA EXAMINADORA



Prof. Vinicius Nunes Henrique Silva, D.Sc. – Orientador, UFF



Prof. Gustavo Bastos Lyra, D.Sc. – UFFRJ



Prof. Andrés Pablo Lopez Barbero, D.Sc. – UFF

Niterói

Maio de 2022

À minha querida mãe Edméa Dias Garrido (in memoriam), que apesar das dificuldades, sempre tentou me educar. Contrariando as predições da família, que eu seria um presidiário como meu irmão, aqui estão os resultados dos seus esforços. Com muita gratidão, agradeço muito a você.”

Agradecimentos

Agradeço aos meus filhos, esposa e minha mãe, por me motivarem e incentivarem a seguir em frente em todos os meus sonhos. Ao Grande Arquiteto do Universo, que deu, tirou e moldou tudo que ele julgava ser importante ao meu crescimento e aprimoramento pessoal, lapidando a nossa pedra bruta interior para nos tornamos a cada dia uma pessoa melhor. Ao meu professor e orientador Prof. Dr. Vinicius N. Henrique Silva pela paciência, dedicação e ter acreditado que eu poderia aprender sobre o grande universo da ciência. Ao Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero, que infelizmente não tive a oportunidade de frequentar algumas de suas aulas, contudo, me ensinou muito durante a pesquisa em diversas vezes que estivemos no laboratório. Agradeço ainda, a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (E-26/211.184/2019, E-26/202.697/2018) e a Universidade Federal Fluminense (UFF), representadas pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações (PPGEET), que possui um quadro exemplar de professores determinados a multiplicar novos pesquisadores. Não poderia deixar de mencionar também sobre o amigo que tornou toda essa caminhada possível. Manoel Eduardo Varella, carinhosamente chamado de “Manel”. Foi o grande responsável por eu ter retornado ao ambiente acadêmico e ingressado na UFF. Agradeço também ao meu amigo Weber Gaia não somente pelo apoio durante o processo acadêmico, mas pela companhia no LaCop durante os vários finais de semanas dedicados a pesquisa. Por fim, agradeço a cada amigo que também me incentivou ao longo já jornada acadêmica, mas em especial, aos “não amigos”, quando diretamente ou não, proferem as três palavras mágicas que me motivam. “Você não é capaz”

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim”

- Nikola Tesla

Resumo

Para realizar a estimativa de fluxo de calor existem vários métodos amplamente difundidos e validados, dentre eles a razão de Bowen e a cintilometria. O último tem como premissa a medida da variação da intensidade de um feixe óptico, em um enlace no espaço livre, que é consequência das flutuações do índice de refração oriundas do fluxo de calor sensível. Nesta proposta de trabalho, ao invés de se medir as variações de intensidade do feixe, mediu-se a posição instantânea do feixe pela Técnica de Triangulação de Potências Ópticas e assim avaliar a turbulência atmosférica provocada pelos fluxos de calor. Além disso, o objetivo era criar um instrumento simples, diferente dos equipamentos previamente utilizados para o mesmo propósito que usavam aparatos com maior grau de complexidade. Assim, o arranjo experimental proposto, utilizou-se apenas de um diodo emissor de luz (LED) operando na faixa da luz visível e quatro fototransistores conectados a um microcontrolador no sistema de recepção. Com isso, foram feitas medidas de fluxo de calor provocados por uma resistência elétrica e medidas de fluxo de calor forçado pela adição de um ventilador para emular condições de vento. O arranjo experimental foi capaz de mensurar turbulências atmosféricas entre 10^{-13} e 10^{-12} ($m^{-2/3}$) com erros de até 2%.

Palavras-chaves: FSO, turbulência atmosférica, cintilação, sistema de rastreamento do feixe, alargamento do feixe, divagação do feixe.

Abstract

To perform an estimation of heat flux, there are several widely disseminated and validated methods, including the Bowen ratio and the scintillometry. The latter has as its premise measurements of the intensity variation of an optical beam, in a link in free space, which is a consequence of the refractive index fluctuations arising from the sensible heat flux. In this work proposal, instead of measuring the variations in the intensity of the beam, the instantaneous position of the beam was measured by the Optical Power Triangulation Technique, thus evaluating the atmospheric turbulence caused by the heat fluxes. In addition, the objective was to create a simple instrument, different from the equipment previously used for the same purpose, which used devices with a greater degree of complexity. Thus, the proposed experimental arrangement used only a light-emitting diode (LED) operating in the visible light range and four phototransistors connected to a microcontroller in the receiving system. In this context, measurements of heat flow caused by an electrical resistance and measurements of heat flow forced by the addition of a fan were made to emulate wind conditions. The experimental arrangement was able to measure atmospheric turbulence between 10^{-13} e 10^{-12} ($m^{-2/3}$) with errors of up to 2%.

Keywords: FSO, atmospheric turbulence, scintillation, beam tracking, beam spread, beam wander.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - EFEITOS DA CINTILAÇÃO NO FEIXE. FONTE: AUTOR	15
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DO EFEITO BEAM WANDER. FONTE: AUTOR	18
FIGURA 3 - DIVAGAÇÃO DO FEIXE. FONTE: ADAPTAÇÃO [26]	19
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO CARTESIANA NO ANTEPARO. FONTE: AUTOR	20
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO PLANO DO RECEPTOR COM OS FOTODETECTORES. FONTE [28]	21
FIGURA 6 – ESQUEMÁTICO DO CONJUNTO DE ABRIGO DO LED. FONTE: AUTOR.....	24
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL I. FONTE: AUTOR.....	24
FIGURA 8 - ARRANJO EXPERIMENTAL I. FONTE: AUTOR.....	25
FIGURA 9 - CONJUNTO TRANSMISSOR (1), FONTE DE CALOR (2), SISTEMA DE RECEPÇÃO (3).....	26
FIGURA 10 - HOTPLATE (1), VENTILADOR (2), T1(3), SENSOR DE FLUXO (4) E T2(5).....	27
FIGURA 11 – ANTEPARO DE COM FOTODETECTORES (A), SENSIBILIDADE ESPECTRAL DO FOTODETECTOR (B). FONTE: DATASHEET DO COMPONENTE.....	28
FIGURA 12 - CIRCUITO DE RECEPÇÃO	28
FIGURA 13 - BIBLIOTECA DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA.....	29
FIGURA 14 - ABRIGO DE CALIBRAÇÃO. FONTE: AUTOR.	30
FIGURA 15 - SATURAÇÃO TOTAL (A) E PARCIAL (B)	33
FIGURA 16 - CAPTURA COM ISO 100, F/5.6 E 1/4000s	33
FIGURA 17 - FITTING PROCESSADO NO ORIGIN. FONTE: AUTOR	34
FIGURA 18 - MEDIÇÃO DA LUZ PROJETADA NO ANTEPARO. FONTE: AUTOR	35
FIGURA 19 – (A) VALOR DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO (B) ANTEPARO. FONTE: AUTOR	35
FIGURA 20 - DESLOCAMENTO DO ANTEPARO EM X.	36
FIGURA 21 - RASTREAMENTO DO FEIXE EM TEMPERATURA AMBIENTE.	37
FIGURA 22 – DESLOCAMENTO DO FEIXE COM FLUXO DE CALOR ATÉ 50 GRAUS.....	37
FIGURA 23 - CN2 X TEMPERATURA	38
FIGURA 24 – VARIÂNCIA DE r_c EM 28°C (A), EM 30 °C (B), EM 32°C (C) E EM 35°C (D) X FLUXO DE AR - ARDUINO	39
FIGURA 25 – VARIÂNCIA DE r_c X FLUXO DE AR.....	40
FIGURA 26 – VARIAÇÃO DO r_c EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E FLUXO DE AR	40
FIGURA 27 – FEIXE CENTRALIZADO (A), FEIXE DESLOCAMENTO APÓS INCIDÊNCIA DE TEMPERATURA(B)	42
FIGURA 28 – VARIÂNCIA DE r_c EM 26°C (A), EM 27 °C (B), EM 30°C (C), EM 32°C (D), EM 32°C (E), E CONSOLIDADO (F) X FLUXO DE AR - NI	43
FIGURA 29 - VARIAÇÃO DO r_c EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E FLUXO DE AR - NI	44

Lista de Tabelas

TABELA 1 - EQUAÇÕES POR TIPO DE FEIXE	19
TABELA 2 - POSICIONAMENTO DOS FOTOTRANSTORES	27
TABELA 3 - AJUSTE DE GANHO DOS FOTOTRANSTORES PARA O MESMO NÍVEL DE LUZ	30
TABELA 4 - PARÂMETROS DE TENSÃO DO VENTILADOR E TEMPERATURA AJUSTADA NO HT.	32
TABELA 5 – RESULTADO DA COMPARAÇÃO Cn2 POR TÉCNICAS DISTINTAS.	38
TABELA 6 - DADOS COLETADOS ARRANJO EXPERIMENTAL III	43
TABELA 7 - RELAÇÃO COMPORTAMENTAL DO rc X TEMPERATURA E FLUXO NA VERTICAL - NI	45
TABELA 8 - RELAÇÃO COMPORTAMENTAL DO rc X TEMPERATURA E FLUXO NA HORIZONTAL - NI.....	45
TABELA 9 - COEFICIENTES – ARDUINO	45
TABELA 10 - COEFICIENTES – NI.....	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
PPGEET	Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica de Telecomunicações
ADC	<i>Analogic Digital Converter</i>
FSO	<i>Free Space Optical</i>
BEST	Balanço de Energia da Superfície Terrestre
CinLA	Cintilômetro de Larga Abertura
PID	Proporcional Integral Derivativo
LaCop	Laboratório de Comunicações Ópticas
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
CFM	<i>Cubic Feet per minute</i>
RPM	<i>Revolutions per minute</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>

Sumário

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	5
1.1 Motivação	8
1.2 Objetivos.....	9
1.3 Organização da Dissertação.....	9
Capítulo 2 - Aspectos Teóricos	11
2.1.1 Método da Razão de Bowen.....	11
2.1.2 Covariância de Vórtices Turbulentos	11
2.2 Turbulência Atmosférica	13
2.2.1 Constante de estrutura do Índice de Refração	13
2.2.2 Cintilômetria.....	15
2.2.3 Divagação do Feixe (Beam Wander).....	18
2.2.4 Triangulação de Potência Ópticas	20
Capítulo 3 - Materiais e Métodos	22
3.1 Arranjo Experimental I – Caracterização do Feixe Óptico	23
3.2 Metodologia Experimental - Arranjo I.....	24
3.3 Arranjo Experimental II - Arduino.....	25
3.4 Metodologia Experimental - Arranjo II.....	29
3.5 Arranjo Experimental III – National Instruments.....	32
Capítulo 4 - Resultados e Discussão	33
4.1 Resultados do Arranjo Experimental I	33
4.2 Resultados do Arranjo Experimental II.....	34
Capítulo 5 - Conclusões	47
5.1 Trabalhos Futuros	48
Referências	49

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

As preocupações com o meio ambiente, biomas e ecossistemas levantam questões importantes para a vida humana, como o ciclo hidrológico e a gestão sustentável dos recursos hídricos. O ciclo hidrológico determina a transferência de água da atmosfera para a Terra, principalmente na forma de precipitação, e de volta para a atmosfera na forma de evaporação e/ou transpiração (evapotranspiração). Segundo o livro “*Evaporation into the atmosphere*” as teorias sobre a evapotranspiração tiveram início na Grécia antiga, contudo, somente nos séculos XVII e XVIII iniciaram as medições iniciais e a experimentação [1]. O balanço energético da Terra descreve o equilíbrio entre a energia radiante solar que atinge a terra e a energia que flui da terra de volta para o espaço. Ao receber a energia do sol, e de acordo com a primeira lei da termodinâmica, a soma das diferentes formas de energia mantém-se constante, independentemente das transformações energéticas que nele ocorram. Apesar disso, várias propriedades gerais e fenômenos típicos que ocorrem no sistema terrestre podem ser derivados de análises energéticas, como é o caso do balanço de energia da superfície terrestre (BEST) [2]. A estimativa do componente do BEST é importante em diversas áreas de pesquisa. A partir desses componentes, é possível definir se a radiação solar absorvida pela superfície é transferida para o solo (calor sensível do solo), aquece o ar (calor sensível) ou retorna à atmosfera na forma de vapor d'água (calor latente - evapotranspiração).

A necessidade de um método para medir a transferência vertical de vapor de água e calor nas camadas mais baixas da atmosfera têm sido uma demanda constante em diversas áreas de pesquisa. É possível relacionar as magnitudes desses fluxos com outros parâmetros meteorológicos utilizando modelos empíricos [3]. A evapotranspiração (ET) é um processo atribuído pelo fenômeno da evaporação da água do solo, rios e mares, assim como pela transpiração das plantas. Os fatores determinantes são a combinação da radiação solar, temperatura da superfície, temperatura e umidade do ar, vento e aspectos fisiológicos [4]. A ET pode ser medida ou estimada, sendo seus métodos considerados diretos ou indiretos. Dentre os métodos diretos destaca-se a utilização de lisímetros e balanço hídrico do solo. No caso de transferência de vapor d'água, ou evaporação, o uso da lisimetria pode ser bastante eficaz, no entanto, apesar da baixa tecnologia embarcada, não é um método portátil e de fácil instalação.

Revisão Bibliográfica

A dificuldade de medição do fluxo de calor no solo ocorre devido a existência processos de transferência de calor por condução e convecção. Nesse sentido, Heitman et al [5] propôs o uso de sensores de pulso de calor em conjunto com microlisímetros pesáveis (MLs) para medição de fluxo de calor latente (LE). Os resultados demonstraram a importância de incluir o calor latente quando são feitas tentativas de vincular ou extrapolar as medições do fluxo de calor do solo do subsolo para o fluxo de calor do solo da superfície.

Durante os últimos anos, o uso da termografia por infravermelho (IR) tornou-se um meio poderoso de análise termodinâmica dos fluidos para medição de fluxos de calor convectivo e estudar o comportamento dos fluxos em superfícies de formas complexas. A termografia é uma técnica bidimensional, sem contato, de medição de temperatura. Em suma, o radiômetro de varredura infravermelha (IRSR) detecta a energia eletromagnética irradiada em uma banda espectral infravermelha por um objeto (cuja temperatura da superfície deve ser medida e que deve ser totalmente opaco à banda detectada) e converte-o em um sinal de vídeo. Giovanne et al [6] propôs o uso da termografia para realizar medições de transferência de calor por convecção. Nesta proposta, o autor comparou a técnica de medição direta que utiliza termopares e detectores resistivos de temperatura (RTDs) em relação a medidas não invasivas com uso de câmeras operando no (IR). Os resultados apresentaram uma grande vantagem no modelo termográfico por possuir sensibilidade de até 20mK com tempo de resposta até 20 μ s. Algumas aplicações para esse tipo de monitoramento são indicadas para avaliar fluxo geotérmico de vulcões adormecidos. Essa avaliação é necessária tanto para a identificação de riscos quanto para o estudo de sistemas hidrotermais. O calor de um corpo de magma localizado em profundidade é transportado por vapor para a superfície, onde é expelido em fumarolas se o fluxo de calor exceder 500 W/m². Se o fluxo de calor for inferior a 500 W/m², o vapor se condensa principalmente no solo próximo à superfície e produz uma anomalia térmica detectável[7]. Gaudin et al [8] propôs o uso de câmera termográfica para quantificar fluxos de calor a partir de anomalias de temperatura medidas na superfície. As imagens térmicas infravermelhas são usadas para calcular o excesso de fluxo radiativo, o excesso de fluxo sensível e o fluxo de vapor do solo para a atmosfera. Os experimentos foram realizados em várias horas do dia, em condições de chuva fraca ou nula nas últimas 24 h (precipitações < 5 mm). A temperatura do ar variou

de 17,3 a 21,0 °C e a velocidade do vento variou de 1,4 a 2,8 m/s. O fluxo sensível foi estimado em mais de 80% do fluxo total. A variabilidade do fluxo de calor em torno da média é inferior a 20% indicando que o método é robusto.

Outro método comumente utilizado para estimar o fluxo de calor é a cintilometria. O método de cintilação consiste em transmitir um feixe de luz pela atmosfera e medir as variações da intensidade ótica entre uma determinada distância. Essas variações são proporcionais as variações do índice de refração do meio (n), que são diretamente relacionadas com as trocas de energia e conseqüentemente os fluxos. Essas variações (n) são caracterizadas pela constante de estrutura do índice de refração (C_n^2) que está relacionada com a constante de estrutura de temperatura C_T^2 [9]. Hemakumara et al. [10], usou um cintilômetro de larga abertura (CinLA) para estimar os fluxos de evapotranspiração sobre áreas de vegetação mista. Essa pesquisa estimou fluxos (ET) para uma área de vegetação mista na cidade de Colombo - Sri Lanka. As estimativas de ET derivadas do cintilômetro foram comparadas com estimativas obtidas de um algoritmo de balanço de energia de superfície baseado em sensoriamento remoto (SEBAL). O desvio médio das estimativas de ET entre SEBAL e CinLA para períodos de 10 dias foi de 17%. No entanto, esse desvio diminuiu para 1% quando foram consideradas as estimativas mensais. Uma outra pesquisa foi feita utilizando métodos similares, na Cidade Universitária – Ilha do Fundão/RJ por Sampaio et al [2], que propôs o uso do CinLA como uma ferramenta em potencial para estimar o fluxo de calor sensível (H) em superfícies complexas e heterogêneas. Os resultados mostram a viabilidade de emprego do cintilômetro para mensurações diárias e contínuas de fluxo de calor sensível de forma representativa com aplicação a grandes áreas e a superfícies com uma cobertura heterogênea e complexa, como as que, geralmente, são encontradas em áreas urbanas. Geli et al [11], propôs o uso do cintilômetro para estimar o crescimento da vegetação e melhorar a gestão agrícola. Nessa pesquisa, o CinLA foi usado para fornecer essas estimativas com o objetivo de quantificar os efeitos da heterogeneidade da superfície devido à umidade do solo e variabilidade do crescimento da vegetação.

Augustine et al [12] apresentou uma modificação no sistema proposto em 2013 [13]. Nesta pesquisa, o autor classificou os efeitos térmicos do laser ao atravessar um meio turbulento. O autor também relacionou a intensidade da turbulência C_n^2 com a temperatura e seu comportamento em relação a altitude. Apesar do experimento ocorrer totalmente *indoor*, permitiu novos dados fossem medidos com sucesso. A intensidade da turbulência obtida nesse experimento apresentou valores na faixa de $1.1 \times 10^{-12 (m-2/3)}$ a $2.7.1 \times 10^{-12 (m-2/3)}$.

Oliveira et al [19], propôs o uso da técnica de triangulação de potências (TTP) ópticas em meios turbulentos para a realização de medidas de evapotranspiração. A fonte de turbulência consistiu de um recipiente com água aquecida por um ebulidor. A nova técnica, mesmo na condição *indoor*. O modelo correlacionou o aumento do deslocamento radial do feixe com a intensidade da taxa de evaporação (calor latente).

Nos dois métodos citados, existem fatores que devem ser observados para determinar o tipo de medição a ser aplicada. Nas medições diretas, lisimetria por exemplo, é necessário estar atento ao tipo do solo, as dimensões do lisímetro, área de interesse a medir a ET e as distancias entre equipamentos e calibração. Os métodos indiretos, entre as vantagens, destacam-se que não requerem alterações da superfície e podem ser empregados com grande grau de mobilidade. Por outro lado, requerem medidas contínuas dos elementos meteorológicos necessários à determinação de (ET), sendo alguns deles de difícil determinação, e em alguns casos, ainda existem cálculos complexos e alta tecnologia embarcada.

Nesta proposta de trabalho, que também se utiliza da TTP, tem como premissa desenvolver um dispositivo com o objetivo de menor custo em comparação ao proposto por Oliveira et al [9], e que agregue as vantagens do método direto como simplicidade e capacidade de medir em períodos menores que um dia [14], fácil instalação e sem alterações na superfície. Além disso, que seja escalável e modular.

A validação do novo dispositivo foi realizada por meio da caracterização do C_n^2 em função de um fluxo de calor latente proveniente de uma fonte (resistência elétrica). Concomitantemente, introduziu-se um sistema de insuflamento variável com o intuito de emular o efeito do vento no comportamento do feixe óptico e consequentemente o C_n^2 .

1.1 Motivação

Este trabalho tem como objetivo criar um dispositivo simples que seja capaz de medir os fluxos de calor por meio dos efeitos *Beam Wander* gerado pela turbulência atmosférica sobre um feixe óptico. O método da Bowen é utilizado frequentemente em culturas, por outro lado, o cintilômetro é utilizado em áreas urbanas, com múltiplas funções (urbano, solo nu, água, culturas agrícolas e floresta).

As vantagens observadas nesta proposta, visam não somente demonstrar a aplicação da técnica na medição em tempo real dos vórtices turbulentos, mas também desenvolver um dispositivo de fácil instalação, baixo investimento e que seja modular. Para tanto, realizou-se a análise constante de estrutura do índice de refração pela técnica de triangulação de potências ópticas e posteriormente relacionando a mesma grandeza com coeficiente de estrutura de temperatura obtida por outra técnica.

1.2 Objetivos

▪ *OBJETIVO GERAL*

Desenvolver um sistema de medição de fluxos de calor sensível com microcontrolador de baixo custo utilizando luz visível. Esse tipo de dispositivo tem como alvo a medição direta da (ET) utilizando a técnica de triangulação de potências ópticas. É possível determinar ainda a direção do fluxo de calor.

▪ *OBJETIVO ESPECÍFICO*

Esta proposta de trabalho tem como objetivos específicos caracterizar a turbulência utilizando-se da técnica de triangulação de potências ópticas [15], quantificando a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 em função das variações de calor e fluxo gerados pelo módulo de calor. Esta Técnica usa um dos efeitos da turbulência sobre a luz propagante, a divagação do feixe óptico ou *beam wander*. O uso da luz visível facilita o alinhamento do sistema, maior simplicidade no conjunto óptico e redução de custo. Um dos principais atrativos dessa proposta de pesquisa é o desenvolvimento de um conjunto de monitoramento com utilizando hardware de código aberto, com valores acessíveis quando comparado aos modelos comerciais. Outro fator importante é que os microcontroladores da família Atmel AVR, são modulares e podem facilmente serem integrados a sistemas legados.

1.3 Organização da Dissertação

O trabalho foi organizado em duas partes: teórica e experimental. A primeira parte é inicialmente discorrida com a apresentação da Revisão Bibliográfica que evidencia alguns conceitos e métodos existentes de mensuração de fluxo de energia. Para complementar, são também apresentados os fundamentos teóricos sobre a turbulência atmosférica, e da mesma forma, os aspectos fundamentais sobre técnica de triangulação de potências ópticas e medições de fluxo de calor descritos nos Capítulo 2, que fundamentam a compreensão da

parte experimental. A segunda parte, apresenta a descrição do experimento com seus Materiais e Métodos, devidamente descritos no Capítulo 3 e os Resultados e Discussão alcançados, são descritos no Capítulos 4.

No Capítulo 1 encontra-se uma introdução sobre o conceito de fluxos de energia e suas primeiras observações sobre fenômeno da turbulência atmosférica. Na parte dedicada à motivação é apresentado uma revisão das formas de medição de fluxo de e suas peculiaridades. O Capítulo 2, descreve alguns métodos de medição de fluxo de calor, discorrendo sobre suas características construtivas, importâncias, vantagens e aplicabilidades em distintas áreas de medição de fluxo de energia. Apresenta também os efeitos da atmosfera sobre a propagação da luz. O Capítulo 3 aborda quais serão os materiais e métodos utilizados nessa proposta de pesquisa, passando por três Arranjos Experimentais, Arranjo Experimental I, II e III. O Capítulo 4 apresenta o resultado dos Arranjos Experimentais I, II e III. Iniciando com o resultado das características da fonte óptica e finalizando com as caracterizações do fluxo de energia. São apresentadas as análises qualitativas e quantitativas para cada técnica. e é apresentado o dispositivo para a medida da turbulência. Por fim, O Capítulo 5 é a conclusão do trabalho, apresentando as propostas futuras e ideias a serem implementadas sobre o tema.

Capítulo 2 - Aspectos Teóricos

Neste capítulo abordaremos os conceitos teóricos sobre os principais métodos utilizados para estimar a (ET) passando pelos fundamentos teóricos sobre a atmosfera terrestre e a interação da luz com seus componentes. Abordaremos ainda necessários a compreensão dos fenômenos pode influenciar na sua propagação, tais como a turbulência, absorção e espalhamento turbulência atmosférica, e por fim a teoria de como relacionar o fluxo de calor latente com a constante de estrutura objeto de estudo dessa dissertação.

2.1.1 Método da Razão de Bowen

A energia solar ao incidir sobre a superfície terrestre aquece a água e o solo. Com isso, parte da água é convertida em vapor criando um fluxo de calor latente. A parte da energia que incide sobre o solo é armazenada por ele e uma outra parcela é liberada em forma de calor sensível. Assim, por conservação de energia saldo de radiação (R_n) tem que ser igual ao somatório dos fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e do calor armazenado no solo (G).

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

A partir da Equação 2 o método da razão de Bowen (β) é utilizado para estimar as componentes LE e H do balanço de radiação, visto que, a razão de Bowen é a razão entre os fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2)$$

A razão de Bowen pode ser calculada através de medidas de temperatura, pressão, fluxo de calor no solo e radiação solar [16]

2.1.2 Covariância de Vórtices Turbulentos

A covariância de vórtices turbulentos ou Eddy Correlation (EC), é uma técnica micrometeorológica que mede as trocas totais de dióxido de carbono (CO_2), calor sensível e latente nos ecossistemas. [17]. Inicialmente, a técnica foi usada para medir apenas calor latente, calor sensível e fluxos de momento. No entanto, a partir de 1990 começaram a surgir sensores para análise de resposta rápida das concentrações de CO_2 , e alguns centros de ciência técnica desenvolveram sistemas de medição de fluxos de CO_2 , que têm sido

amplamente utilizados em estudos observacionais de troca de CO₂ entre ecossistemas e a atmosfera [18]. O sistema para medição de (EC) deve ser composto de um anemômetro sônico, um analisador de gás CO₂/H₂O de ciclo aberto e um sistema de aquisição, registro e processamento de dados. No entanto, devido às condições de estabilidade atmosférica, este método apresenta limitações importantes, pois requer a instalação do instrumento em uma região de camada limite de equilíbrio ou corrente constante cujo fluxo é aproximadamente constante com a altura. A altura da camada limite interna é determinada em função da altura da vegetação e pela distância entre o ponto de coleta dos dados e a extremidade em que a vegetação estudada deixa de ser homogênea [19].

Pelo do método EC é possível calcular o fluxo sensível da superfície H. O valor de H (W/m²) é dado pela seguinte equação:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad (3)$$

em que, ρ é a densidade de ar (kg/m³), c_p o calor específico, w a velocidade da componente vertical do vento (m/s) e T a temperatura (K), ρ é obtido pela fórmula:

$$\rho = \frac{P}{R_h T} \quad (4)$$

em que, P é a pressão atmosférica (Pa), T é a temperatura (K), e R_h é a constante de gás específica por unidade de ar (J/kg K), dada por:

$$R_h = \frac{R_d}{1 - \left(q \frac{P_{sat}}{P}\right) \left(1 - \frac{R_d}{R_v}\right)} \quad (5)$$

em que, R_d é a constante de gás específica para ar seco (287,06 J/kg.K), R_v a constante de gás específico para vapor d'água (461 J/kg.K), q a umidade relativa e P_{sat} a pressão de saturação de vapor d'água do ar, definido por:

$$P_{sat} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5T_c}{T_c+273,3}} \quad (6)$$

em que, T_c é a temperatura em °C.

O método utiliza equipamentos sofisticados, por exemplo, o *Eddy Correlation* que é constituído de um conjunto de sensores (anemômetros sônicos, sensores fotométricos,

sensores de radiação, fluxímetro, sensores de temperatura e estações pluviométricas) para execução dos cálculos e permitindo assim, precisão e confiabilidade das medições de flutuações instantâneas das propriedades da atmosféricas. Deste modo, os sensores precisam ser confiáveis, de rápida resposta e em elevada frequência para que consiga registrar mesmo as pequenas flutuações [20].

A técnica proposta nessa dissertação, visa a utilização de um dispositivo simples para a caracterização dos fluxos de calor. Inicialmente mensura-se o grau de turbulência atmosférica pela técnica proposta por Silva et al [15] e a relaciona com parâmetros de estrutura da temperatura, estimando assim a (ET).

2.2 Turbulência Atmosférica

A atmosfera terrestre é composta de moléculas de gases e pequenas partículas em suspensão. A interação da luz com estes componentes, dão origem a uma gama de fenômenos que influenciam sua propagação, especificamente a turbulência, absorção e o espalhamento. A absorção e o espalhamento são dependentes do comprimento de onda e dão origem, principalmente, à atenuação. A turbulência atmosférica é um fenômeno aleatório causado pela variação da temperatura e pressão atmosférica ao longo do enlace [21]. Devido aos gradientes de temperatura entre a atmosfera e a superfície da terra, ocorre a formação de parcelas de ar com diferentes índices de refração. O movimento dessas células de ar provoca no feixe os efeitos de cintilação, divagação e alargamento. Os parâmetros atmosféricos, tais como a temperatura e o índice de refração, não podem ser tratados como processos estritamente estacionários, pois suas médias variam em pequenos intervalos espaciais. A vista disso, Kolmogorov, em 1974, propôs a função estrutura como teoria estatística para estimar as condições de turbulência [22].

2.2.1 Constante de estrutura do Índice de Refração

Um fluido possui dois tipos de escoamentos, laminar e turbulento. No escoamento laminar o fluido se move em camadas, em que uma camada se desloca sobre a outra sempre no sentido do escoamento geral. A outra forma, o escoamento turbulento, tem como característica que as partículas do fluido apresentam movimento caótico, com deslocamentos transversais ao escoamento geral, e dessa maneira, uma de suas características é a flutuação tridimensional (vorticidade). Denomina-se o movimento caótico do ar da atmosfera de turbulência atmosférica e sua modelagem exige a utilização de modelos estatísticos [23], sendo a maioria descrita na literatura, os modelos baseados na teoria de Kolmogorov. Pela

complexidade de soluções matemáticas nessa modelagem, ele sugeriu que os vórtices fossem classificados em regiões menor e maior escala, respectivamente l_0 e L_0 . Nesta classificação, foi denominado que a região onde são encontrados os menores vórtices seria a escala interna l_0 e a região que apresenta os maiores vórtices, de escala externa L_0 . Entre esses pontos, é encontrada a subescala inercial, onde as variações das medias do índice de refração (n) ocorrem de forma menos expressiva, podendo-se, então, considerar uma única medida para toda a subescala caracterizada pela Constante de Estrutura do índice de Refração (C_n^2) [24].

Em uma atmosfera terrestre turbulenta pode-se considerar que o índice de refração varia em função da sua posição espacial (x, y, z) e do tempo (t) :

$$n(R, t) = n_0 + n_1(R, t) \quad (7)$$

em que, R é uma posição no espaço, $n_0 = \langle n(R, t) \rangle \cong 1$ é o valor médio do índice de refração e $n_1 = (R, t)$ representa os desvios aleatórios de $n(R, t)$ com $\langle n_1(R, t) \rangle = 0$. Pode-se assim expressar o índice de refração somente em função do espaço:

$$n(R) = 1 + n_1(R) \quad (8)$$

em que, $n(R)$ foi normalizado pelo seu valor n_0 .

No entanto, o índice de refração em uma determinada posição da atmosfera, depende da pressão atmosférica (P), e da temperatura (T). No infravermelho, o índice de refração pode ser calculado como:

$$n(R) \cong 1 + 79 \cdot 10^{-6} \frac{P(R)}{T(R)} \quad (9)$$

A variação aleatória do índice de refração é estatisticamente homogênea e isotrópica, sendo assim, suas variações dependem apenas da distância escalar entre dois vetores de posição $R = |\vec{R}_1 - \vec{R}_2|$. Além disso, Kolmogorov mostrou que a função de estrutura do índice de refração (D_n) dentro da subescala inercial satisfaz a lei universal de potência de $2/3$:

$$D_n = \langle (n_1 - n_2)^2 \rangle = C_n^2 R^{\frac{2}{3}}, l_0 \ll R \ll L_0 \quad (10)$$

em que, n_1 e n_2 representam os índices de refração em dois pontos separados pela distância R e C_n^2 é a constante de estrutura do índice de refração em $m^{-2/3}$. A C_n^2 indica o quão forte são as flutuações do índice de refração, e por analogia, a turbulência do local. Os valores

típicos do C_n^2 variam de $10^{-17} m^{-\frac{2}{3}}$, que corresponde à turbulência fraca, a $10^{-13} m^{-\frac{2}{3}}$ ou mais, correspondendo a turbulência forte.

De forma análoga a função de estrutura da temperatura é definida matematicamente como sendo:

$$D_T(R) = \langle (T_2 - T_1)^2 \rangle = C_T^2 R^{\frac{2}{3}} \quad l_0 \ll R \ll L_0 \quad (11)$$

onde T_1 e T_2 são as temperaturas dois pontos de uma determinada região e R a distância entre eles. O coeficiente de estrutura do índice de refração C_n^2 pode ser relacionado com o coeficiente de estrutura de temperatura C_T^2 pela expressão:

$$C_n^2 = \left(79 \cdot 10^{-6} \frac{\langle P \rangle}{\langle T \rangle^2} \right)^2 C_T^2, \quad (12)$$

em que, $\langle P \rangle$ é o valor médio da pressão atmosférica e $\langle T \rangle$ o valor médio da temperatura.

Desta forma, pode-se calcular a intensidade da turbulência atmosférica usando a equação (19). De forma prática, as medições do n e do C_n^2 são raramente feitos por medições diretas, refratômetros. Usualmente são executadas análises indiretas, por meio de valores de temperatura, pressão umidade e dióxido de carbono, ou cintilômetros.

2.2.2 Cintilometria

A cintilação é a variação da intensidade da luz (I) em um plano receptor ao atravessar uma atmosfera turbulenta onde as células de índice de refração são relativamente menores que o diâmetro do feixe óptico, como mostra a Figura 1. Assim, a frente de onda é deformada alterando-se a distribuição da potência óptica.

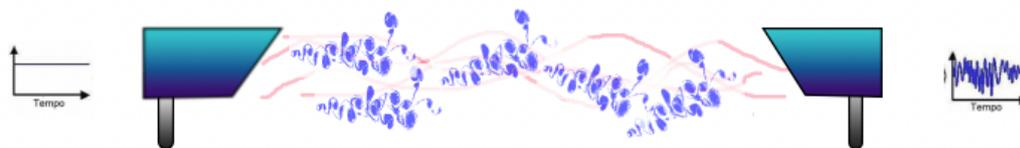


Figura 1 – Ilustração dos efeitos da cintilação no feixe. Fonte: Autor

A cintilação (σ_i) é definida como a variância normalizada da irradiância do feixe óptico [25]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (13)$$

Assim, para $\sigma_I^2 \gg 1$, pode-se dizer que o feixe está sujeito a uma turbulência forte, para $\sigma_I^2 \simeq 1$ a turbulência é média e para $\sigma_I^2 \ll 1$ a turbulência é considerada fraca [28]. Conseqüentemente, é natural que exista uma relação entre a cintilação e o C_n^2 . Considerando uma onda plana luminosa se propagando pela atmosfera temos que a cintilação pode ser calculada por:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 K^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad (14)$$

Nesse sentido, uma das formas de quantificar a turbulência é através da técnica de cintilômetria. O cintilômetro de larga abertura é utilizado para medir a variância da intensidade luminosa e assim calcular a constante de estrutura do índice de refração (C_n^2) entre um transmissor e receptor. As flutuações da intensidade ótica, que evidenciam o grau de turbulência atmosférica, estão relacionadas com os fluxos de calor sensível (H).

Na atmosfera turbulenta, as flutuações de umidade e pressão causam flutuações no índice de refração do ar. Dessa forma, o C_n^2 pode ser correlacionado com o parâmetro de estrutura da temperatura C_T^2 , de umidade C_q^2 e pressão pela seguinte equação:

$$C_n^2 = A_T^2 \frac{C_T^2}{T^2} + A_q^2 \frac{C_q^2}{q^2} + 2A_T A_q \frac{C_{Tq}}{Tq} \quad (15)$$

em que, A_T e A_q são quantidades dependentes do comprimento de onda (λ) e da média de temperatura (T), umidade (q) e pressão atmosférica (P). No caso do cintilômetro de larga abertura com a luz no infravermelho em 940nm A_T e A_q são:

$$A_T = -78 \times 10^{-6} \frac{P}{T}, \quad A_q = -57.22 \times 10^{-6} q \quad (16)$$

Para cintilômetros operando próximo da faixa do infravermelho, o segundo termo é desprezível e o terceiro termo pode ser escrito em função da razão de Bowen (β), desde que as flutuações de temperatura e umidade estejam correlacionadas [50].

$$C_T^2 = C_n^2 \frac{T^2}{A_T^2} \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^{-2} \quad (17)$$

Conhecendo o valor de C_T^2 , o valor fluxo de calor sensível (H) pode ser derivado das relações de similaridades de C_T^2 .

$$C_n^2 = C_T^2 \left(\frac{-0,78 \times 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{0,03}{\beta} \right) \right] \quad (18)$$

em que, β é a razão de Bowen, que relaciona a temperatura com a umidade do ar pela razão entre o calor sensível com o calor latente. O segundo termo é a correção do efeito da umidade. A teoria de similaridade de Monin–Obukhov permite relacionar a constante de estrutura de temperatura com o escalar de temperatura T^* :

$$C_T^2 = T^{*2} (z - d)^{-2/3} f_h \left(\frac{z - d}{L_0} \right) \quad (19)$$

em que, z e d ($=0,67 \cdot h_v$) são as medidas da altura e a altura de deslocamento do plano zero (h_v refere à altura da vegetação) respectivamente, e f_h é a função universal da teoria de similaridade, determinada empiricamente, e dependendo de z e L_0 . Esta função depende da estabilidade da camada limite da superfície atmosférica:

Para condições instáveis (se $z/L_0 < 0$):

$$f_h \left(\frac{z - d}{L_0} \right) = 4,9 \left(1 - 6,1 \frac{z - d}{L_0} \right)^{-2/3} \quad (20)$$

Para condições estáveis (se $z/L_0 > 0$):

$$f_h \left(\frac{z - d}{L_0} \right) = 4,9 \left(1 + 2,2 \frac{z - d}{L_0} \right)^{2/3} \quad (21)$$

Em L_0 é o comprimento Monin–Obukhov, que pode ser escrito por:

$$L_0 = \frac{u^{*2} T}{kgT^*} \quad (22)$$

onde $k = 0,41$ sendo a constante de von Karman, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ a gravidade e $u^* [\text{ms}^{-1}]$ a velocidade de fricção, dado por:

$$u^* = \frac{ku}{\ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) - \psi} \quad (23)$$

em que, u é a velocidade do vento, $z_0 = 0,1 h_v$ é o comprimento de rugosidade e ψ é a função de correção de estabilidade dependendo de z/L_0 que é definido como segue:

Para condições instáveis (se $z/L_0 < 0$):

$$\psi\left(\frac{z-d}{z_0}\right) = 2\ln\left[\frac{1-x}{2}\right] + \ln\left[\frac{1-x^2}{2}\right] - 2\arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (24)$$

com $\left(1 - 6.1\frac{z-d}{z_0}\right)$ e condições (se $z/L_0 < 0$):

$$\psi\left(\frac{z-d}{z_0}\right) = 5.2\frac{z-d}{l_0} \quad (25)$$

Uma vez conhecido T^* e u^* , o calor sensível (H) pode ser alcançado a partir da equação:

$$H = -\rho c_p u^* T \quad (26)$$

O valor do calor latente (ET) pode ser calculado como o balanço de energia residual:

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (27)$$

onde R_n (Wm^{-2}) é a radiação líquida e G (Wm^{-2}) é o fluxo de calor no solo. Dessa relação é possível calcular a evapotranspiração por meio da turbulência atmosférica.

2.2.3 Divagação do Feixe (*Beam Wander*)

Quando as células de turbulência são maiores que o diâmetro do feixe temos o efeito do *Beam Wander* (BW), que é o deslocamento do centro do feixe óptico (r_c^2) no plano do receptor. Na figura 2 é possível observar a ilustração do efeito de divagação.

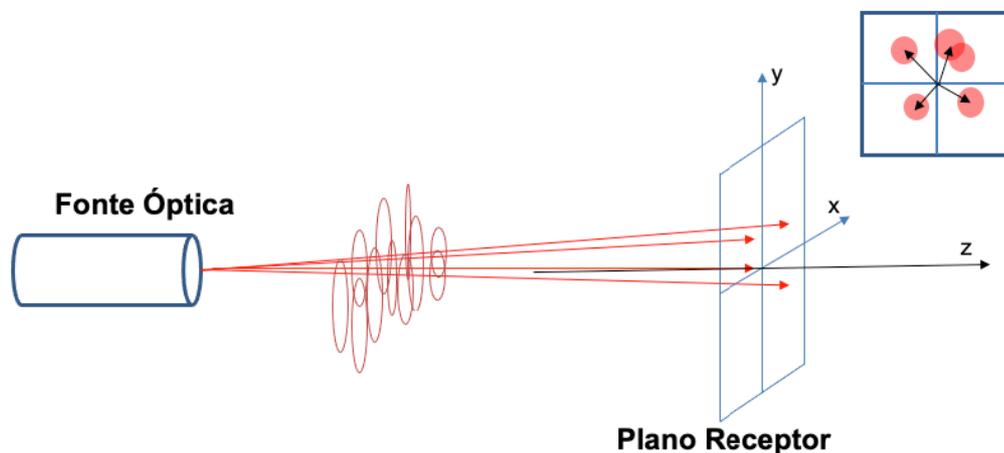


Figura 2 - Representação do efeito Beam Wander. Fonte: Autor

Ou seja, o centro instantâneo do feixe óptico é composto de um movimento, no plano receptor, composto de duas escalas espaciais: termo curto (*Short Term* - W_{ST}) e termo longo (*Long Term* - W_{LT}). As posições instantâneas do centro do feixe (W_{ST}) e é representado círculos menores (amarelos) e as posições de termo longo (W_{LT}) pelo círculo branco, como pode ser observado na Figura 3.

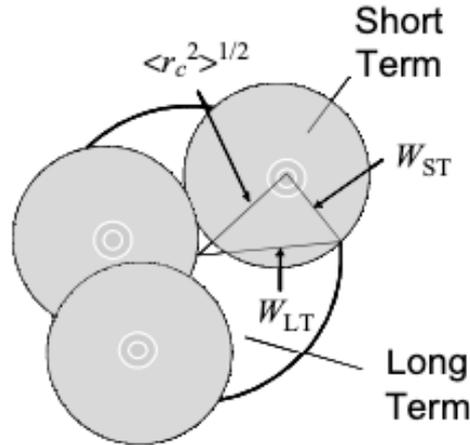


Figura 3 – Ilustração da divagação do Feixe. Fonte: adaptação [26]

A relação entre do termo longo (W_{LT}), o termo curto (W_{ST}) e a variância do BW $\langle r_c^2 \rangle^{1/2}$ é dada por:

$$W_{LT}^2 = W^2 + W^2 T_{SS} + \langle r_c^2 \rangle = W_{ST}^2 + \langle r_c^2 \rangle \quad (28)$$

Considerando um feixe gaussiano se propagando horizontalmente, o BW está relacionado com a C_n^2 em função de L_0 como pode ser visto na Tabela 1:

Feixe	L_0	Equação	
Colimado	Infinito	$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3}$	1
Focado	Infinito	$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3}$	2
Colimado	Finito	$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3} \left[1 - \left(\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{1/6} \right]$	3
Focado	Finito	$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3} \left[1 - \frac{8}{9} \left(\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + 0,5 \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{1/6} \right]$	4

Tabela 1 - Equações por tipo de feixe

em que, a equação 1 e 2 são para ($\kappa = 0$), e equação 3 e 4 são (para $\kappa \neq 0$).

2.2.4 Triangulação de Potência Ópticas

A técnica de triangulação de potências proposta em [20], calcula a distância radial de um feixe óptico com distribuição gaussiana de seção circular, através de fotodetectores dispostos na forma de um triângulo equilátero em um anteparo. O triângulo é formado por três fotodetector dispostos nos vértices desse triângulo instalado em um plano receptor. Além desses, um fotodetector é colocado no ponto de interseção das alturas relativas a cada lado para auxiliar no alinhamento do feixe. A Figura 4 mostra o plano receptor contendo os 4 fotodetectores devidamente instalados e um feixe gaussiano, em vermelho, incidindo sobre este plano.

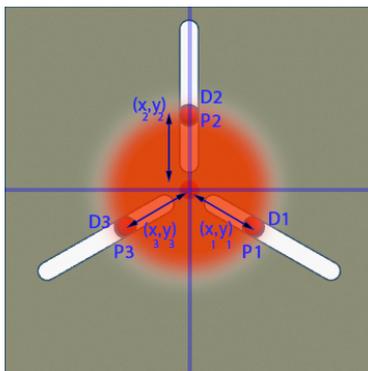


Figura 4 - Distribuição cartesiana do feixe no anteparo. Fonte: Autor

Conseqüentemente, a divagação do feixe ($r_c = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$) provocados por uma atmosfera turbulenta pode ser calculado através do seguinte sistema de equações [20]:

$$\begin{aligned} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_1) &= 0 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_2) &= 0 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_3) &= 0 \end{aligned} \quad (29)$$

onde x_i, y_i são respectivamente as coordenadas cartesianas de cada fotodetector. Sabendo-se então a posição do centro do feixe (x_0, y_0) pode-se calcular a sua distância r_c do centro cartesiano.

Em 2020, Janaina et al propôs o uso uma extensão do método de triangulação de potências para rastreamento de feixes com perfil elíptico [26]. Na Figura 5, é possível

verificar a representação da disposição dos detectores. Nesse caso, a técnica passa a utilizar 4 detectores dispostos em formato elíptico.

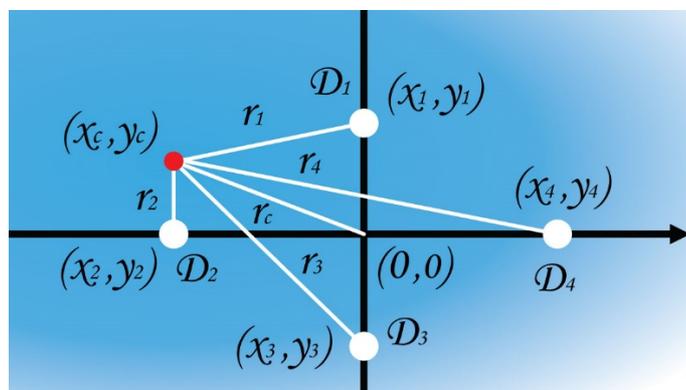


Figura 5 - Representação do plano do receptor com os fotodetectores. Fonte [28]

Em suma, ao conhecer as características da distribuição da potência óptica no plano do receptor, sua largura (W), a posição dos fotodetectores e a potência incidente em cada um deles, pode-se calcular a posição do centro do feixe óptico e sua variância ao longo do tempo causada pelo BW. Logo, para uma determinada distância (L) entre transmissor e receptor, através das Equações da tabela 1 pode-se calcular a constante de estrutura do índice de refração e determinar a intensidade da turbulência atmosférica e os fluxos de calor.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

O tema deste trabalho teve como alicerce os Arranjos desenvolvidos na UFF em 2009, 2011 e 2014 [15][27][28]. O *setup* original [20], demonstrou a técnica de triangulação de potência para um feixe gaussiano circular. Nesse experimento, o plano receptor era deslocado por meio de parafusos micrométricos e a distância entre fotodetector e transmissor era de 21 cm. Devido à dificuldade de se trabalhar com parafusos micrométricos, que introduzia erros de medida, o segundo experimento [34], propôs o deslocamento motorizado do transmissor. No experimento subsequente [35], foram substituídos os fotodetectores por modelos que operam na faixa do infravermelho, que apesar de aumentar a complexidade do transmissor, diminuiu o ruído provocado pela luz visível [29]. Uma vez estabelecida a técnica, outros trabalhos tiveram como objetivo aumentar a distância entre o transmissor e o receptor. Oliveira et al, realizou medidas de divagação do feixe em ambiente indoor, alcançando 42 metros e *outdoor*, 30 metros [35]. A validação das medidas em ambiente *outdoor* abriu a possibilidade de usar o aparato para fazer medidas de fluxo de calor. Oliveira et al, demonstrou a possibilidade de utilizar a técnica de triangulação de potências para medidas de fluxo de calor latente em ambiente indoor [9]. Nesse trabalho, a proposta foi desenvolver um sistema mais simples do que os anteriores para possivelmente vir a realizar medidas de fluxo de calor em ambiente *outdoor*. A validação desse novo sistemas foi realizada por meio de medidas de fluxo de calor em ambiente controlado e, também, verificou-se o comportamento do feixe ótico quando submetido a uma fonte forçada de fluxo.

Esse capítulo é dividido em prototipação preliminar da fonte óptica, arranjo experimental do microcontrolador para captação do sinal óptico com o uso da técnica de triangulação de potência óptica, inclusão da fonte de calor com monitoramento de temperaturas e, por fim, a inclusão de sistema de fluxo forçado transversal ao feixe com objetivo de emular condições de vento. Neste contexto, três arranjos experimentais foram desenvolvidos para validação completa do proposto dessa pesquisa:

- **O Arranjo experimental I:** montagem da fonte óptica e caracterização do feixe óptico. Inicialmente, o *setup* conceitual foi montado em casa devido o afastamento social por conta do COVID-19. Com o relaxamento do isolamento social, foi possível o retorno gradativo ao laboratório e desenvolvimento do próximo *setup*.

- **Arranjo Experimental II:** foi feita toda codificação do microcontrolador, Arduino, de modo que as variáveis inerentes ao processo pudessem ser coletadas e tratadas estatisticamente, assim como o desenvolvimento dos modelos computacionais das equações relativas à triangulação de potências ópticas. Ainda neste arranjo, foi incluído uma fonte de calor com controle de temperatura e um sistema de fluxo de ar vertical ascendente com ajuste proporcional de velocidade.
- **Arranjo experimental III:** ainda usando os mesmos componentes do experimento anterior, foi incluído transversalmente ao feixe óptico, uma ventilação controlada para variação do fluxo de calor. Neste novo modelo de simulação de fluxo, foi avaliado também o impacto da turbulência com ventos na horizontal. Além disso, com objetivo de repetir o experimento com uma taxa de amostragem superior ao Arranjo Experimental II, o microcontrolador Arduino foi substituído pelo conversor analógico digital (A/D) da *National Instruments*.

3.1 Arranjo Experimental I – Caracterização do Feixe Óptico

O sistema transmissor é composto de fonte óptica LED (SYM-R503-30-D) operando em 648 nm para diminuir a complexidade imposta pela utilização de diodos laser, pois estes necessitam de um controle mais rigoroso de temperatura e corrente. Como o LED possui ângulo de abertura de 15°, e utilizando uma lente com distância focal de 140 mm, por trigonometria, pode-se verificar que a região de iluminação da lente quando o LED está no foco possui aproximadamente 75 mm de diâmetro. Com isso, utilizou-se uma lente biconvexa de 90 mm de diâmetro (1) para colimar o feixe óptico acoplada em um tubo de ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) de 100 mm de comprimento. Ainda, objetivando um perfeito alinhamento do LED, foi criado um cone para ser acoplado no interior do tubo e assim também poder ajustar a distância focal manualmente, como mostra a Figura 6.

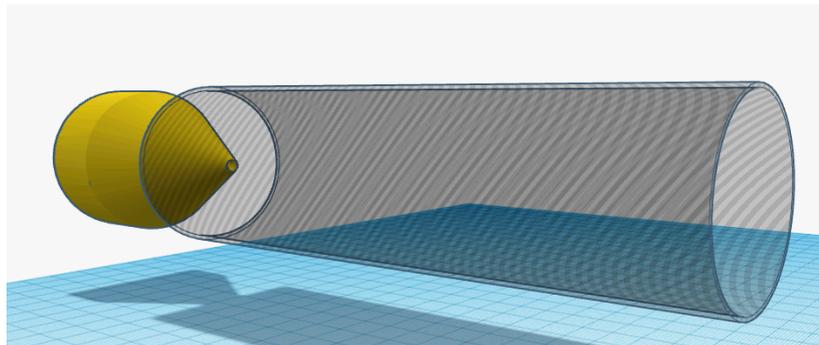


Figura 6 – Esquemático do conjunto de abrigo do LED. Fonte: Autor

Com o objetivo de caracterizar o feixe ótico (1) utilizou-se uma Câmera fotográfica Canon EOS 700D (3) e um anteparo com papel vegetal (2) como mostra a Figura 7.

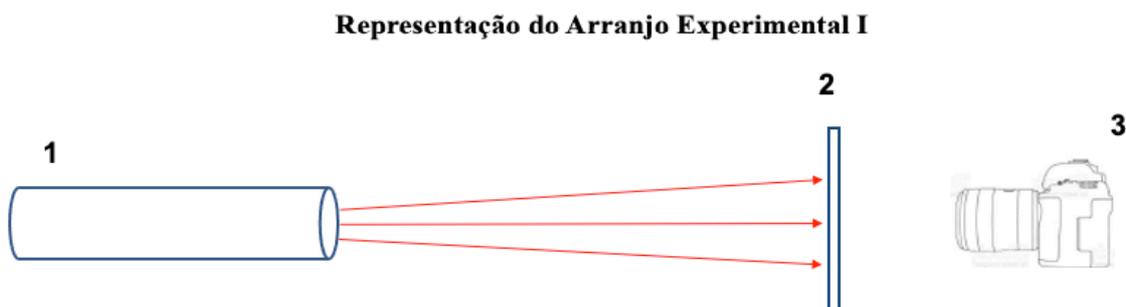


Figura 7 - Representação do Arranjo Experimental I. Fonte: Autor

Então, a luz proveniente da fonte se propaga e ilumina o anteparo com papel vegetal e a câmera registrar a distribuição de potência do feixe ótico.

3.2 Metodologia Experimental - Arranjo I

Para caracterizar a fonte ótica e verificar se o feixe emitido por ela apresentava perfil transversal gaussiano circular, o conjunto transmissor, o anteparo com papel vegetal e a câmera Cannon foram posicionados de modo a estarem alinhados entre si. Todos os componentes deste arranjo foram instalados em um tripé típico de uso em fotografias, como mostra a Figura 8.



Figura 8 - Arranjo Experimental I. Fonte: Autor

O experimento embora tenha sido feito no ambiente residencial, teve como premissa a utilização do mesmo dimensional da bancada do laboratório onde seriam realizadas as medidas de fluxo de calor, ou seja, 2 metros entre o conjunto transmissor e o anteparo com papel vegetal.

Com o *setup* devidamente montado, foram feitas algumas séries de fotos em diversas regulagens de ganho da fonte óptica e abertura do feixe. O ambiente utilizado propiciava um bom controle da luminosidade, isto é, pouca ou nenhuma interferência da luz externa. Todas as fotos foram registradas com a câmera em modo manual. Para mitigar erros sistêmicos, foram feitos três registros para cada combinação de regulagem do equipamento (ISO, obturador e diafragma). O objetivo era caracterizar a melhor condição para obter a melhor imagem do feixe projetado, sem saturação, e então fazer sua análise. A melhor condição de exposição encontrada foi 1/4000s, f/5.6, ISO 100 para uma tensão de 2V no LED.

A análise das imagens foi realizada utilizando o Software IMAGEJ. Neste software utilizado, é possível verificar a intensidade pela escala de cinza e a largura em pixels. Por conhecermos as dimensões do anteparo, basta apenas fazer a equivalência dentro do próprio IMAGEJ para calcular o valor dimensional em mm. Essa medida é de suma importância para o cálculo da posição do centro do feixe. Diante dos resultados positivos da caracterização da fonte óptica, o próximo passo foi avançar para o Arranjo Experimental II.

3.3 Arranjo Experimental II - Arduino

A Figura 9 é uma foto do Arranjo Experimental II composto por três partes principais, conjunto transmissor, relatado na secção anterior (1), fonte de fluxo de calor (2) e sistema de recepção (30).



Figura 9 - Conjunto transmissor (1), fonte de calor (2), sistema de recepção (3)

A fonte de fluxo de calor, para simular os efeitos da turbulência e dessa forma caracterizar os fluxos de energia, é um sistema dotado de uma fonte de calor do tipo *hotplate* de 1500 W com 180 mm de diâmetro. Originalmente, o dispositivo contém um termostato para controle de temperatura, no entanto, com interesse de estabilizar o máximo o calor gerado sob o feixe, foi adicionado o controlador de temperatura MT512E com uma sonda do tipo PT100 instalado sobre o *hotplate*(HT). Ventiladores de 120 mm x 120 mm x 5 mm (L x A x P) foram instalados para gerar um fluxo de ar forçado incidisse transversal ao feixe na direção vertical e horizontal. A intenção é analisar o comportamento do feixe ótico não somente devido a uma diferença de temperatura, mas em relação a velocidade desse fluxo. A velocidade dos ventiladores foi controlada com uma fonte de tensão e para mensurar a velocidade do fluxo forçado adicionou-se um anemômetro do tipo *hotwire* (HD403TS) com escala de 0,2 a 40 m/s.

Como mencionado em capítulos anteriores, é necessário fazer uma relação do C_T^2 com o C_N^2 (Equação 15), e para tanto, precisamos conhecer as temperaturas em determinada posição do feixe ótico. Neste contexto, foi preciso instalar neste sistema, dois sensores de temperatura do tipo NTC – MF51B. Os sensores estão posicionados em uma distância conhecida ($R=140\text{mm}$) e denominados por T1 e T2. A Figura 10 é uma foto Arranjo Experimental II evidenciando os sensores de temperatura (3,5), o sensor de fluxo forçado (4), o ventilador (2) e o HT (1).

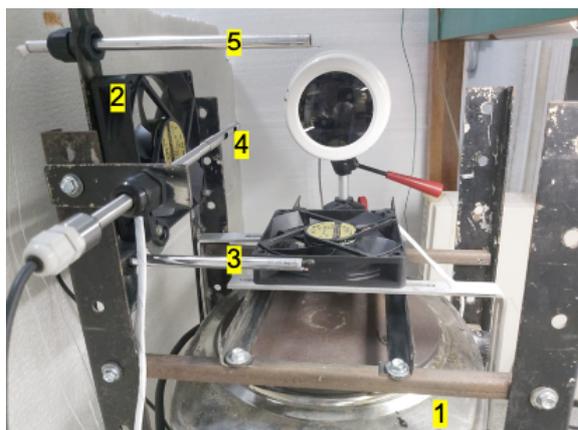


Figura 10 - Hotplate (1), Ventilador (2), T1(3), Sensor de fluxo (4) e T2(5)

O sistema de recepção é composto pelos foto transístores (NPN-PT334-6C) devidamente instalados em um anteparo e o circuito de recepção, no caso um Arduino Mega. O anteparo receptor foi projetado utilizando o software FUSION 360 e plotado posteriormente na impressora 3D GtMax Pro 4. O anteparo com os fotodetectores foi colocado em um sistema de trilhos que tem como propósito facilitar o ajuste fino do alinhamento, e também, deslocar o anteparo em coordenadas conhecidas e validar o sistema de rastreamento do feixe. Assim como a experiência original de 2009, o sistema de ajustes de translação do eixo x e y do anteparo foi adaptado para usar um parafuso micrométrico e assim, fazer o ajuste fino do alinhamento.

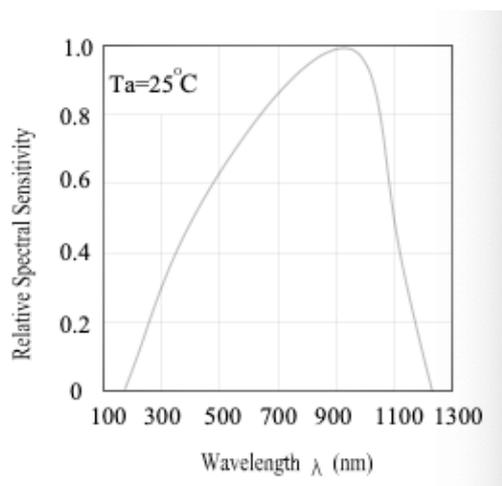
Os fototransistores, com boa responsividade em 648 nm, como pode ser observado na Figura 11, foram fixados mecanicamente no anteparo por meio de receptáculos próprios, conectados eletricamente por um cabo blindado a um conector Db-9 e, podem assim, ser acoplado ou desacoplado facilmente ao circuito do Arduino. O posicionamento dos fototransistores podem ser verificados na tabela 2.

Fototransistor	X	Y
1	-10,12	-5,84
2	0	12,65
3	10,12	-5,84
4	0	0

Tabela 2 - Posicionamento dos fototransistores



a



b

Figura 11 – Anteparo de com fotodetectores (a), sensibilidade espectral do fotodetector (b).
Fonte: Datasheet do componente

Da mesma forma que um transistor TJB (Transistor de Junção Bipolar) necessita de polarização na base para condução, a corrente de base de um fototransistor é diretamente proporcional a potência óptica que incide no encapsulamento. Assim, para um perfil de irradiância Gaussiano, a tensão normalizada deverá ser igual a potência incidente normalizada. A diferença de potencial entre o emissor do fototransistor e a referência (GND) são medidas através da porta analógica do um Arduino MEGA – Figura 12.

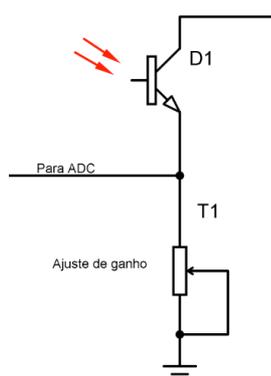


Figura 12 - Circuito de recepção

O hardware Arduino é uma plataforma de prototipagem, *open source* (código aberto), criado para o desenvolvimento de projetos com um preço acessível. Devido a sua facilidade de programação, escalabilidade e ampla lista de extensões de hardware, essa arquitetura de hardware tem se mostrado bastante eficiente não somente em prova de conceito, mas também para produção comercial. O conversor A/D do Atmega328 possui 10 bits de resolução, ou seja, o ADC está preparado para um sinal de entrada analógica de tensão variável de 0V a 5V, gerando números binários de 0 (0000000000) a 1023 (1111111111).

Para que dispositivo fosse capaz de processar os sinais, foi desenvolvido um projeto no ambiente VS Code usando o compilador C++. Neste projeto, foram criadas bibliotecas, como exemplificado na Figura 13, que fossem responsáveis de capturar os sinais elétricos na entrada do microcontrolador e converte-los para as grandezas de interesse.

```
float get_temp2()
{
    double v = (vcc * analogRead(pinTermistor2) / 1024.0);
    double rt = (vcc * R) / v - R;
    t = beta / log(rt / rx);
    t = t - 273.0;
    return t;
}
```

Figura 13 - Biblioteca de aquisição de temperatura

O esquemático do circuito de recepção, código fonte completo está no Anexo 1, assim como o datasheet dos demais componentes do projeto.

3.4 Metodologia Experimental - Arranjo II

Para calibrar os fototransistores foi desenvolvido um receptáculo, Figura 14, que abrigava uma fonte óptica para garantir que somente a luz confinada incidisse no fototransistor.

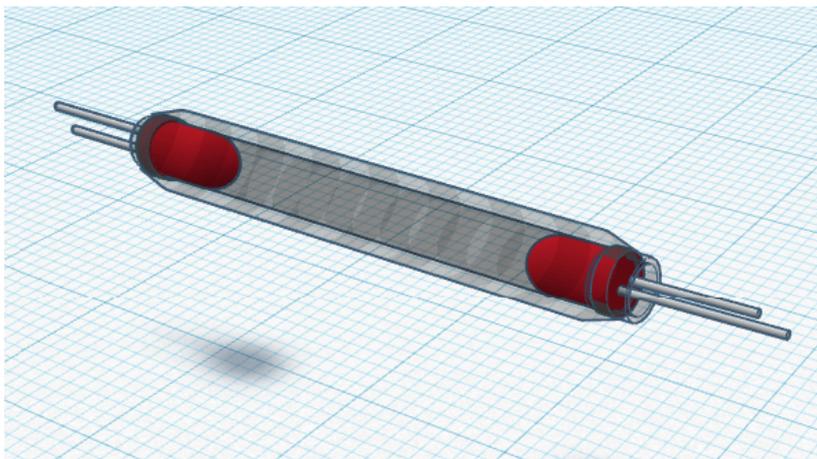


Figura 14 – Modelagem 3D do abrigo de calibração. Fonte: Autor.

Assim, por meio de uma resistência variável (Anexo 1) calibrava-se todos os fototransistores de modo que apresentassem o mesmo nível de tensão para a mesma intensidade de luz recebida, e dessa maneira, mitigar os erros durante o processo de rastreamento pelo uso da técnica de triangulação. O mesmo procedimento foi replicado para todos os fototransistores, e conseqüentemente, após isso, se obteve em cada circuito de recepção, a mesma resposta em tensão (Tabela 3).

Fototransistor	$R_{\text{variável}}$	E_{emissor}
1	6,80k	4,09v
2	6,10k	4,00v
3	6,33k	4,07v
4	6,55k	4,04v

Tabela 3 - Ajuste de ganho dos fototransistores para o mesmo nível de luz

Para iniciar o processo de rastreamento, o transmissor e o receptor foram colocados a uma distância de 2 m. Após, o transmissor é ligado e alinhado preliminarmente de forma visual com o anteparo de recepção. Em seguida, utilizando os parafusos micrométricos para deslocar o anteparo, um ajuste fino do alinhamento é feito por meio das medidas de potência ótica incidente no fotodetector central. Ou seja, quando o fotodetector central atinge um valor máximo considera-se que o feixe está devidamente alinhado. Posteriormente, dá se início a caracterização da fonte ótica afim de confirmar que o feixe é gaussiano e medir sua largura. Novamente, desloca-se o anteparo transversalmente ao feixe, direção y, coleta-se as potências óticas no fotodetector central e traça-se o perfil luminoso. Conhecendo a largura

da Gaussiana ajusta-se a posição dos foto transístores no anteparo afim de conseguir medir o maior deslocamento possível do feixe ótico [15].

Uma vez que o sistema está alinhado, o perfil do feixe ótico é Gaussiano, os foto transístores estão devidamente calibrados e corretamente posicionados, sendo possível aplicar a técnica de triangulação de potências óticas para mensurar o C_n^2 para diferentes configurações. As medidas foram divididas em duas partes, na primeira parte o C_n^2 é caracterizado somente em função do fluxo de calor (Convecção Normal) gerado pelo HT e, na segunda parte, o C_n^2 é calculado pelo conjunto HT com fluxo forçado (Convecção Forçada) pelos ventiladores. Em ambos os casos na análise da turbulência e por consequência, na análise dos fluxos de energia, foi medido o coeficiente de estrutura do índice de refração C_n^2 pela técnica da triangulação de potências óticas (Equação 1 da tabela 2) e pela técnica de diferencial de temperatura (Equação 15)

- **Convecção normal**

A geração do fluxo de energia foi realizada pelo HT instalado logo abaixo do feixe como foi mostrado na Figura 10. Para mitigar a inércia térmica utilizou-se um Variac de 2000 W e um controlador de temperatura com ajuste diferencial de 1°C. Os sensores de temperatura foram instalados paralelos a saída da lente e acima do HT distantes 0,14 m um do outro (Figura 10). As medidas foram realizadas durante 10 minutos em tréplica para as temperaturas: 28, 30, 32, 35, 37 e 40 °C. Vale ressaltar que essas temperaturas é a temperatura alvo (*setpoint*) do controlador de temperatura cujo sensor foi colocado sob o HT. Assim, após coletar as potências óticas nos fotodetectores foi possível calcular o deslocamento do feixe e o C_n^2 pela triangulação de potências óticas (Equação 1 da tabela 2). Além disso, como foram registradas as temperaturas, também foi possível calcular o C_T^2 (Equação 11)

- **Convecção forçada**

Neste cenário, o sistema de ventilação sobre a fonte de calor utilizado, alterando o perfil de convecção normal para convecção forçada. Assim como no cenário anterior, a fonte de calor se manteve sobre o feixe, sendo apenas modulado a velocidade do ventilador sobre o HT. Sua velocidade foi controlada com uma fonte de tensão. A metodologia aplicada na convecção forçada foi a mesma do processo anterior, em tréplica e durante 10 minutos,

porém com o fluxo forçado. A Tabela 4 abaixo retrata todos os parâmetros e estágios de coleta de dados.

Tensão do ventilador (V)	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$
6	28	30	32	35	37	40
8	28	30	32	35	37	40
10	28	30	32	35	37	40
12	28	30	32	35	37	40
16	28	30	32	35	37	40
20	28	30	32	35	37	40

Tabela 4 - Parâmetros de tensão do ventilador e temperatura ajustada no HT.

Da mesma forma, o deslocamento do feixe e o C_n^2 foi determinado pela triangulação de potências óticas (Equação 1 da tabela 2) e o C_T^2 (Equação 12) pelas diferenças de temperatura.

3.5 Arranjo Experimental III – *National Instruments*

Duas alterações foram realizadas nesse arranjo em relação ao Arranjo II. A primeira inclui um sistema de forçado de ventilação ortogonal ao feixe, na direção horizontal. A inclusão de um novo sistema de insuflamento, teve como propósito a investigação do comportamento da turbulência com ventos transversais ao feixe óptico. A segunda ocorreu devido a variância mensurada no Arranjo Experimental II, mesmo com valores dentro das faixas encontradas nas literaturas, os resultados que serão apresentados no capítulo 4 foram considerados baixos quando comparados aos experimentos de 2014 [28]. Dessa maneira, levantou-se a hipótese de que devido a baixa taxa de amostragem e quantização do Arduino, seria interessante um novo arranjo com maior melhor faixa dessas grandezas. Assim, o circuito com o Arduino foi substituído pelo National 6210. Nos primeiros Arranjos a resolução foi de 10 Bits e a taxa de amostragem máxima obtida em tempo de coleta foi de 60Hz. Na nova configuração, a resolução passou a ser de 16 Bits com a taxa de amostragem de 1 kHz. Ressalta-se que a metodologia de medida de manteve a mesma do Arranjo Experimental II.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

4.1 Resultados do Arranjo Experimental I

De acordo com os procedimentos mencionados em 3.2, se fazia necessário verificar se o feixe apresentava um formato Gaussiano circular. A melhor configuração para essa captura foi ajustar a máquina fotográfica para exposição de 1/4000s, f/5.6, ISO 100, regulagem manual Spot. Apesar das diferentes combinações aplicadas sempre demonstrarem visualmente uma fonte de luz circular, no momento do processamento da imagem, evidenciado na Figura 15, foi possível observar em alguns desses artefatos, ruídos e saturação na exposição.

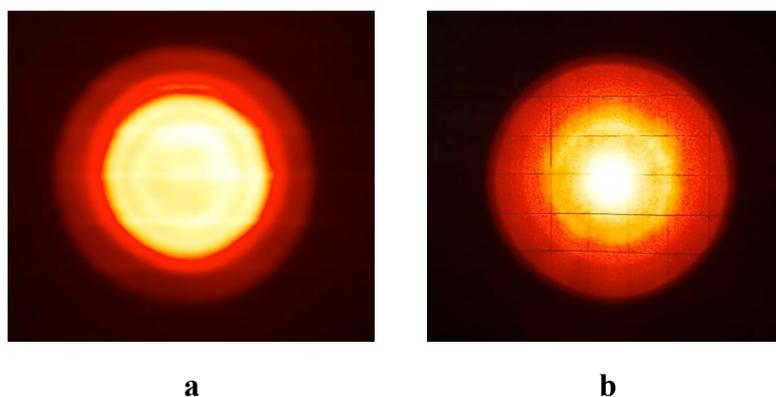


Figura 15 – Imagem capturada apresentando saturação total (a) e imagem capturada apresentando excesso de ruído e saturação parcial (b).

Após os ajustes de tempo de exposição, ISO e abertura da lente e distância focal da lente do conjunto transmissor, foi possível obter uma imagem centralizada, sem saturação e qualidade suficiente para a análise do perfil, conforme demonstra a Figura 16.

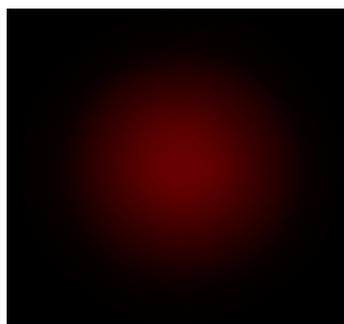


Figura 16 - Captura com ISO 100, F/5.6 e 1/4000s

A imagem da Figura 16 foi analisada com auxílio do software IMAGEJ [30] e seus dados vetorizados foram exportados para software ORIGIN. Esses vetores foram plotados com a curva de ajuste (*fitting*) usando a função Gaussiana. Os resultados apresentaram o perfil de distribuição Gaussiana conforme Figura 17.

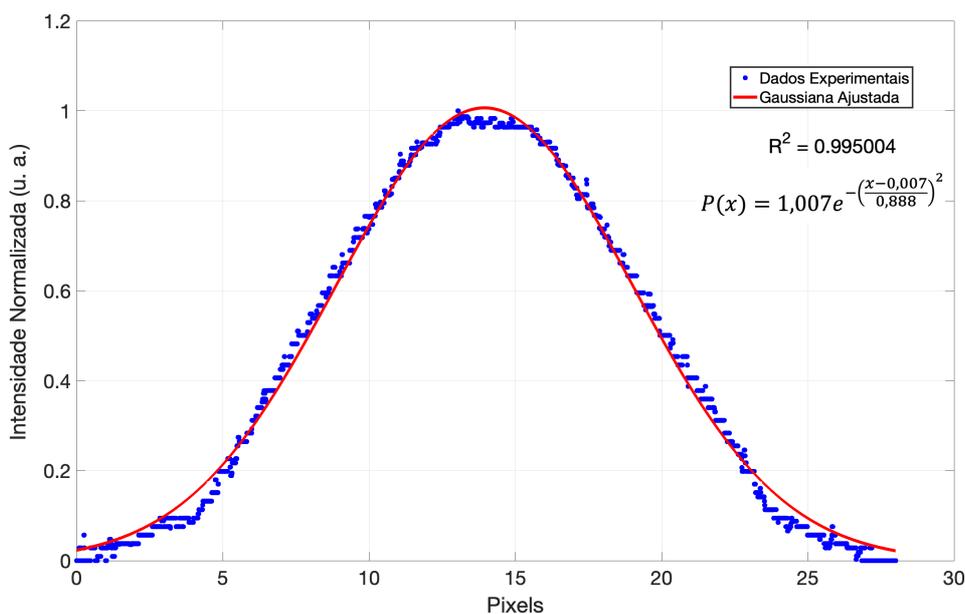


Figura 17 – Curva de ajuste processada no ORIGIN. Fonte: Autor

4.2 Resultados do Arranjo Experimental II

A primeira verificação e validação foi ajustar o ganho dos fototransistores de modo que para a mesma intensidade de luz, tivessem o mesmo nível de condução, já que sua polarização é diretamente proporcional ao nível de luz. Com esse ajuste, o próximo passo foi projetar a luz do conjunto transmissor sobre o anteparo de recepção e avaliar o seu, conforme demonstrado na Figura 18.

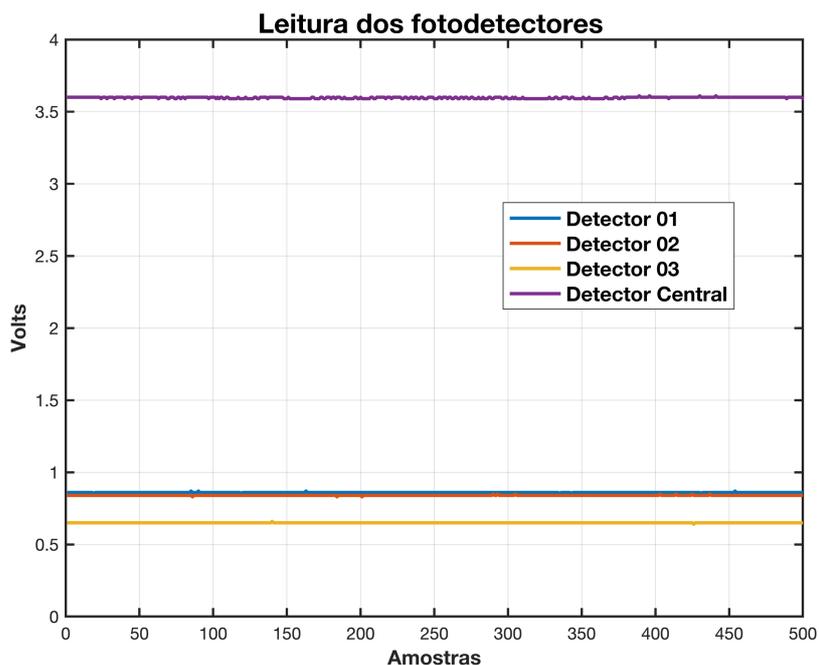
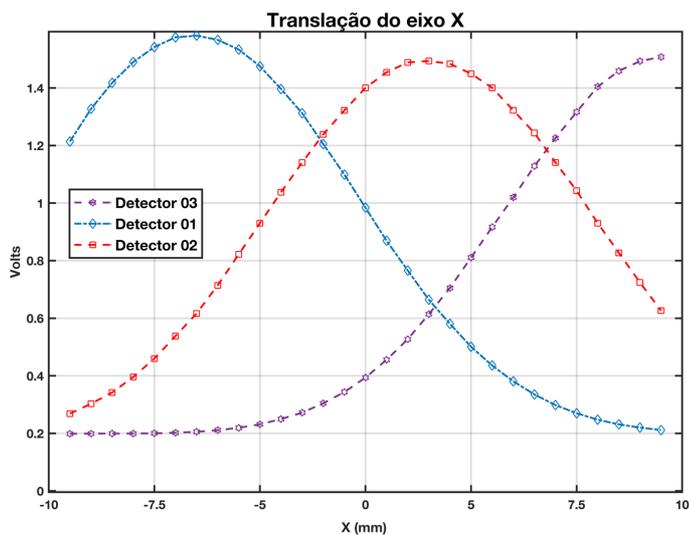
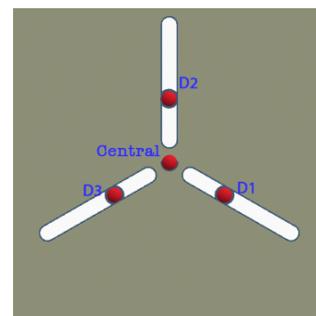


Figura 18 - Medição da tensão da luz projetada no anteparo. Fonte: Autor

Por limitações mecânicas, o deslocamento foi de -10 a 10 em x . O módulo de recepção foi ligado para registrar a captura dos dados e posteriormente exportado para o MATLAB.



(a)



(b)

Figura 19 – (a) Valor de tensão em função do deslocamento do (b) anteparo em 10mm.

Fonte: Autor

Como mencionado no Capítulo 3, a técnica de triangulação de potências proposta em 2009 [15], calcula a distância radial (r_c^2) de um feixe Gaussiano circular por meio da potência óptica incidente em fotodetectores dispostos na forma de um triângulo equilátero em um anteparo. O modelo foi ajustado e reescrito no MATLAB para processar os dados recebidos pelo microcontrolador Arduino e rastrear o centro instantâneo do feixe. Em uma distância L de 2 metros, a técnica foi validada deslocando o anteparo para distâncias conhecidas e posteriormente analisando seu trajeto no gráfico. Na Figura 20 é possível verificar o trajeto calculado e o trajeto real.

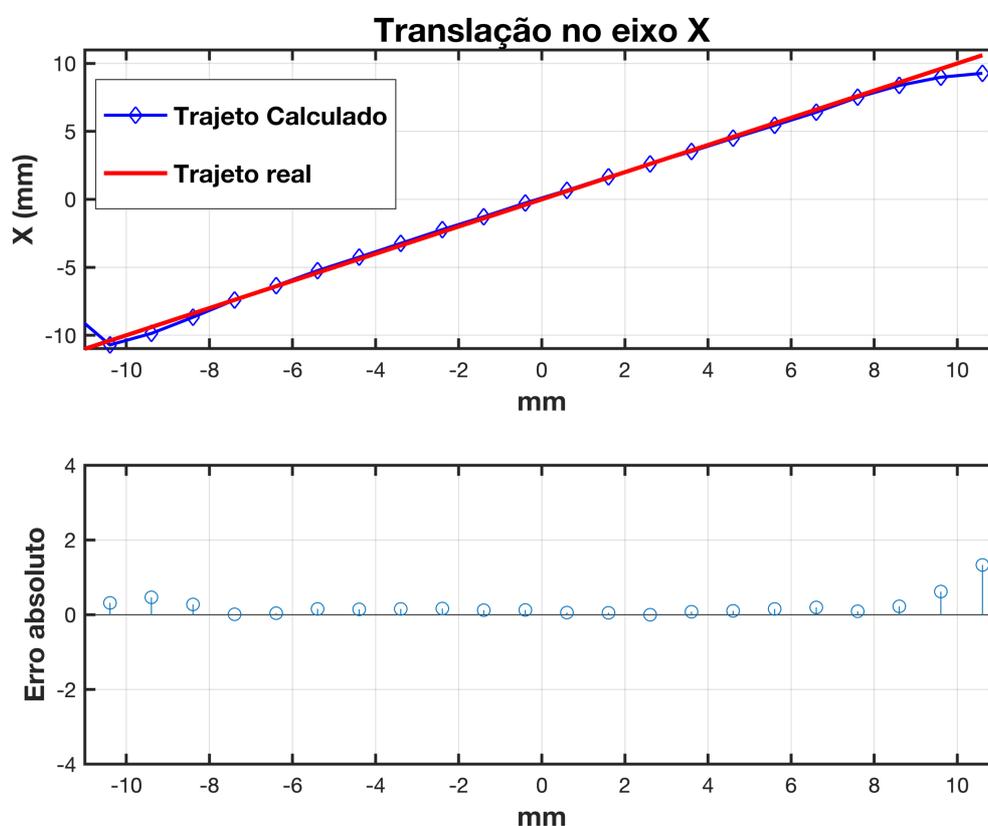


Figura 20 – Deslocamento horizontal do feixe no anteparo em 10mm.

Com a técnica de triangulação validada e o feixe sendo rastreado com sucesso, a próxima validação foi caracterizar o comportamento do feixe sob influência do módulo de calor próximo a fonte óptica. Conforme mencionado no Capítulo 3, o módulo de recepção captou as variações de tensão dos fotodetectores para então ser aplicado o algoritmo de triangulação, e assim, rastrear a posição do feixe nestas condições. Na figura 21, temos a

imagem representativa do posicionamento dos fotodetectores e o posicionamento do feixe sem interferências de fluxo de calor.

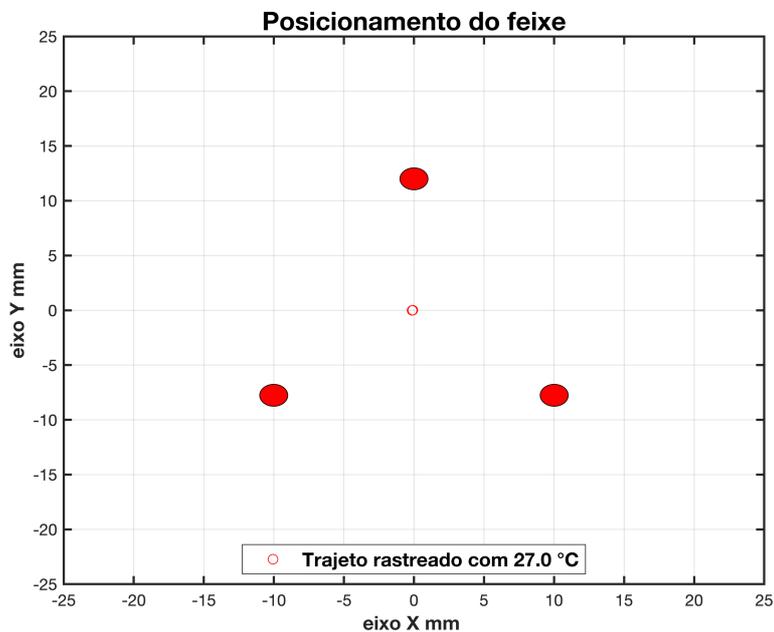


Figura 21 - Rastreamento do feixe em temperatura ambiente.

Na Figura 22, é possível observar o deslocamento do feixe após depois o HT ligado durante 10 minutos.

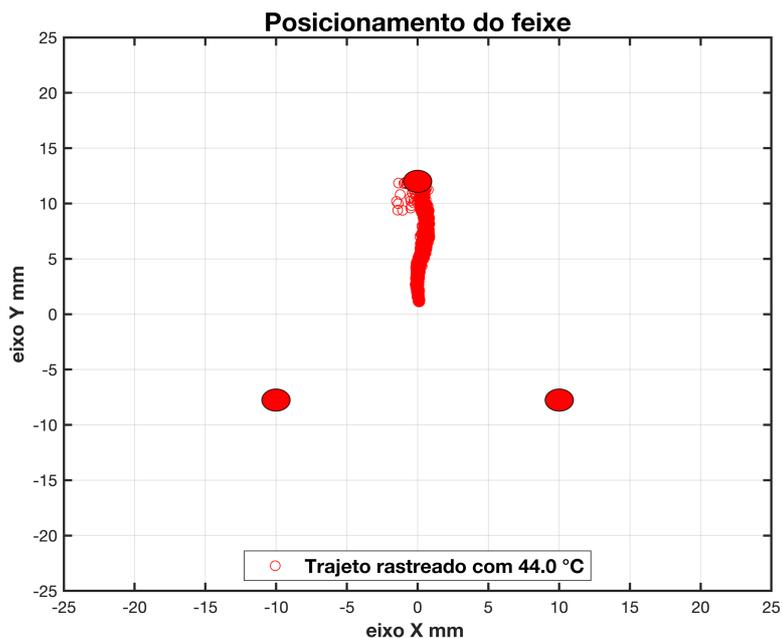


Figura 22 – Deslocamento do feixe vertical do feixe com fluxo de calor até 50 graus.

De acordo com a Figura 22, fica evidenciado o deslocamento do fluxo de energia de forma vertical ascendente. Isto posto, de acordo com o capítulo 3, o próximo procedimento foi quantificar a turbulência ocorrida e validar o valor mensurado em técnicas distintas. Analisando e comparando a Tabela 5 com pesquisas anteriores [12], conclui-se, que os dados obtidos estão dentro da faixa encontrada na literatura e que refletem de fato a turbulência mensurada.

Leitura	ΔT (°C)	\bar{T} (°C)	$C_{n1}^2 (m^{-2/3})$	$C_{n2}^2 (m^{-2/3})$	Erro	Erro %
1	0,90	31	$4,97 \times 10^{-13}$	$5,09 \times 10^{-13}$	$1,20 \times 10^{-14}$	2,36
2	1,21	35	$2,12 \times 10^{-12}$	$2,00 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-13}$	5,66
3	1,44	37	$3,31 \times 10^{-12}$	$3,11 \times 10^{-12}$	$2,00 \times 10^{-13}$	6,43
4	1,51	42	$3,98 \times 10^{-12}$	$4,20 \times 10^{-12}$	$2,20 \times 10^{-13}$	5,24
5	2,01	46	$5,26 \times 10^{-12}$	$5,45 \times 10^{-12}$	$1,90 \times 10^{-13}$	3,49

Tabela 5 – Resultado da comparação C_n^2 por técnicas distintas.

A Tabela 5, demonstra a relação entre a magnitude das turbulências, sendo C_{n1}^2 pela TTP e C_{n2}^2 pelo coeficiente de estrutura de temperatura. É possível observar na Figura 23 que os dados obtidos nesse *setup* experimental, mesmo que em faixas distintas de temperatura, os valores de ambas as técnicas, C_{n1}^2 e C_{n2}^2 apresentam valores médios das magnitudes entre $4,97 \times 10^{-13}$ e $6,00 \times 10^{-12}$.

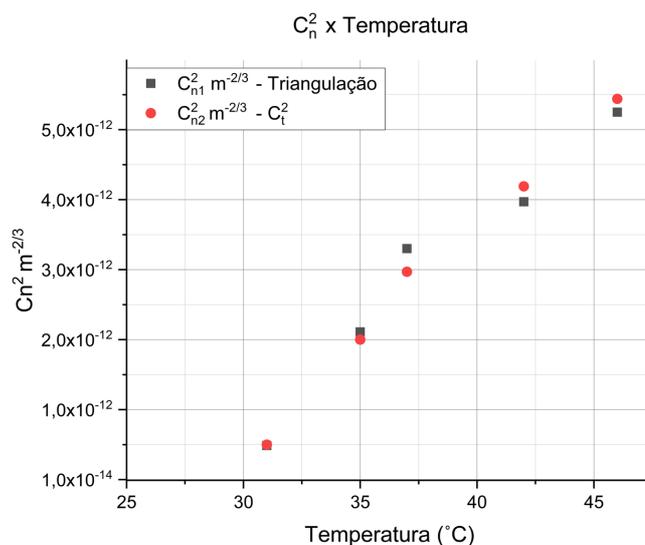


Figura 23 – Gráfico do C_n^2 em função da Temperatura

Conforme descrito no Capítulo 3, para simular as condições de turbulência, o feixe foi submetido a variações de fluxo de ar e temperatura. Na Figura 24 podemos verificar os resultados da variância de r_c em função da modulação do fluxo de ar para cada faixa de temperatura. A consolidação dos resultados pode ser verificada na Figura 25.

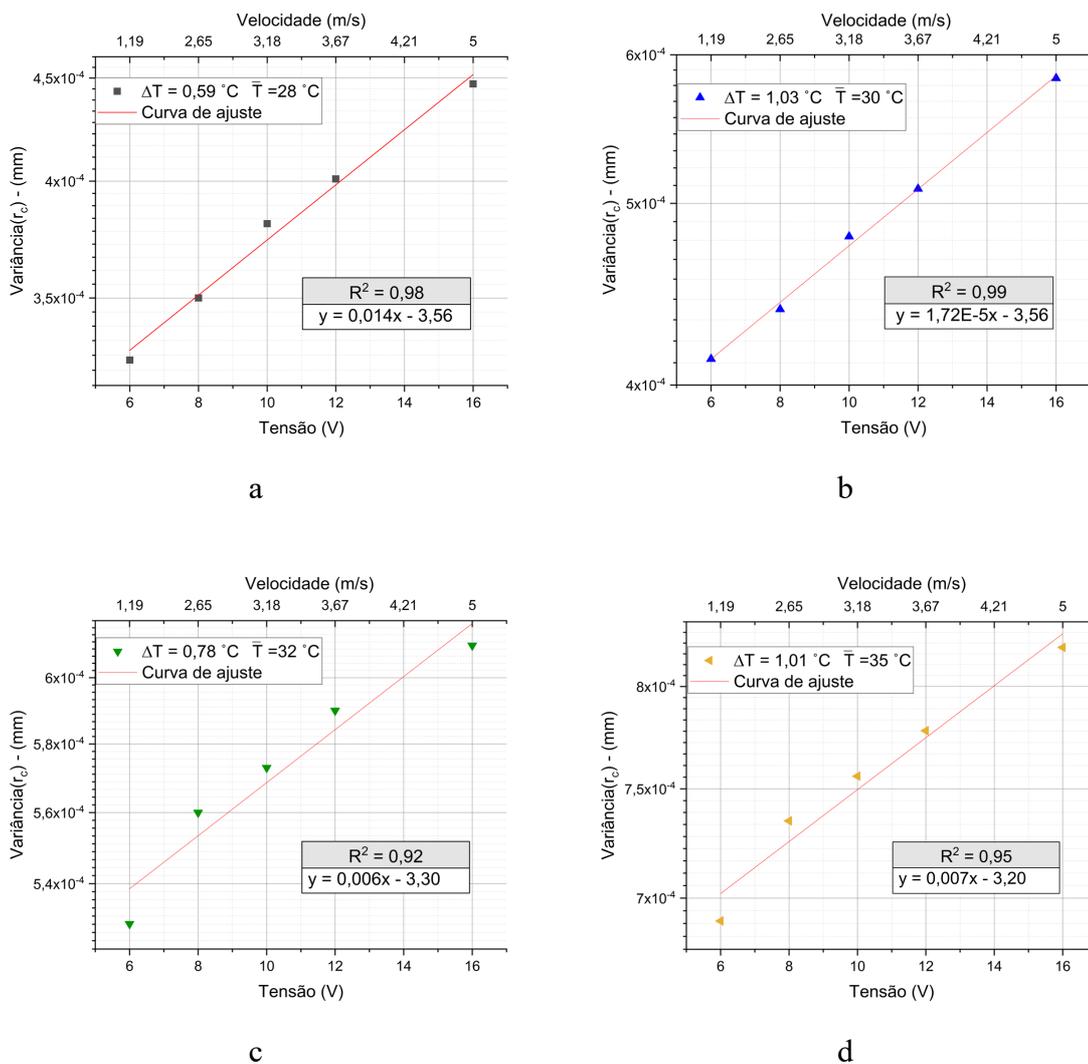


Figura 24 – Variância de r_c em 28°C (a), em 30°C (b), em 32°C (c) e em 35°C (d) x Fluxo de ar - Arduino

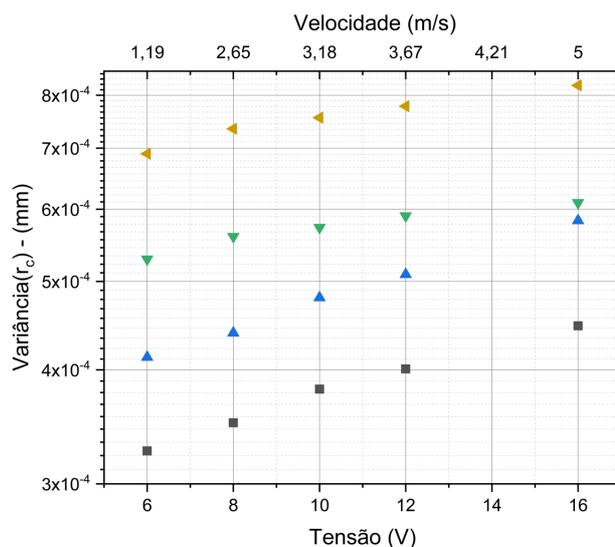


Figura 25 – Resultado da variância de r_c em função da temperatura e do fluxo de ar

As técnicas, mesmo com metrologias distintas, se correlacionam e demonstraram-se válidas no que tange a caracterização da força da turbulência. Podemos verificar na Figura 25 que após a variação do calor combinado com o fluxo de ar, o sistema respondeu de forma imediata ilustrando o efeito de turbulência para cada faixa de mensurada. Foi possível observar também de forma detalhada pelas Figuras 24(a - d) que a turbulência aumenta com a temperatura e fluxo incidente. Com relação ao deslocamento do centro instantâneo, r_c , na Figura 26 podemos ver que a temperatura tem forte relação com sua variação, entretanto, ocorreu pouca expressão em função do fluxo.

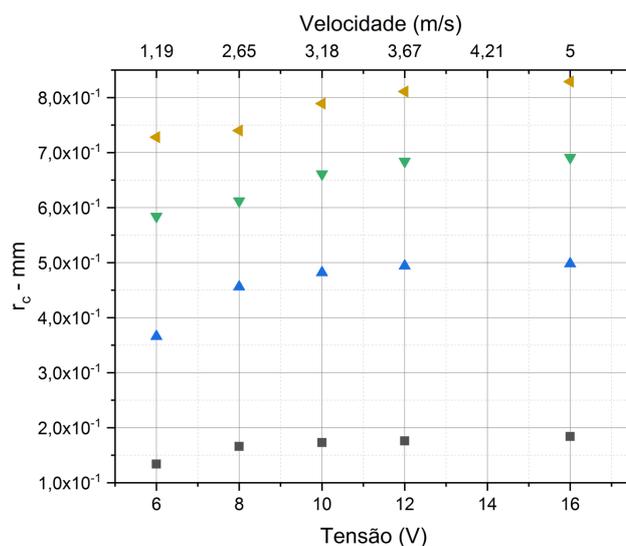


Figura 26 – Resultado da variação do r_c em função da temperatura e fluxo de ar

Diante dos resultados apresentados, é razoável afirmar, que os valores obtidos no Arranjo Experimental II são classificados como uma turbulência forte, apesar do ambiente de medição ter sido em laboratório. Contudo, os resultados são aceitáveis devido ao tamanho do enlace ser extremamente curto quando comparado a situação real. Mesmo em experimentos semelhantes, efetuados em pesquisas anteriores [28], ainda que em condições de pressão, umidade ou velocidade do vento diferenciados, demonstram o mesmo perfil obtido de resultado. O C_n^2 tem forte dependência da temperatura.

Resultados do Arranjo Experimental III

Devido a variância mensurada no Arranjo Experimental II, mesmo tendo valores dentro das faixas encontradas nas literaturas, contudo consideradas baixas quando comparada aos experimentos de 2014 [34], levantou-se a hipótese de que devido a baixa taxa de amostragem e quantização do Arduino, seria interessante um novo arranjo com maior poder de coleta nos dados. Assim, Circuito com o Arduino foi substituído pelo *National Instruments*. Nos primeiros Arranjos a resolução foi de 10 Bits e a taxa de amostragem máxima obtida em tempo de coleta foi de 60Hz. No arranjo que será apresentado neste capítulo, a resolução foi de 16 bits com a taxa de amostragem de 1 kHz.

A tabela de parâmetros para a coleta de dados foi a mesma utilizada no Arranjo Experimental II. O procedimento também foi o mesmo, adicionando apenas o novo sistema de insuflamento paralelo ao eixo y.

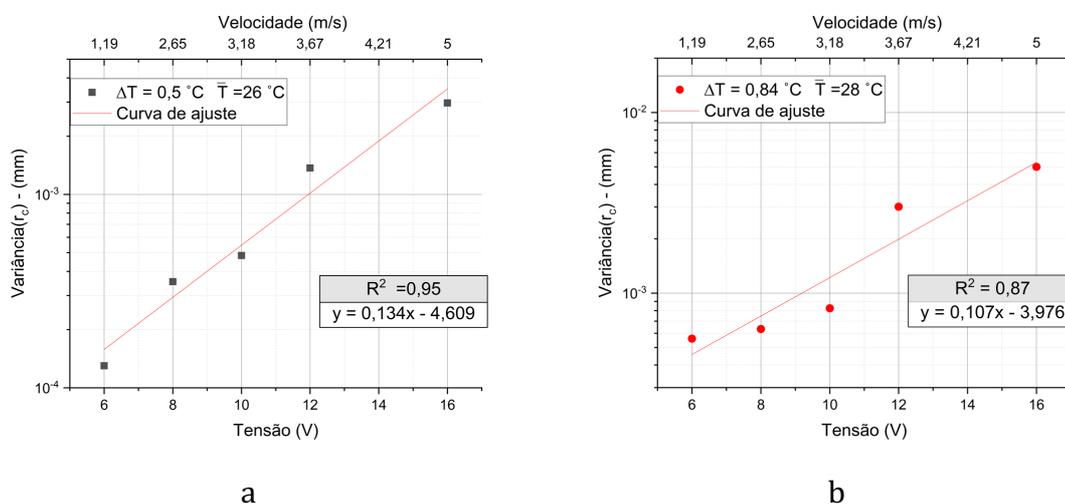
Dentre as maiores dificuldades para execução do Arranjo Experimental II e III, sem dúvidas, a de maior expressão, foi a de estabilizar a temperatura durante o processo. A inserção de fluxo forçado sobre a placa de calor, de fato contribuía para força da turbulência no feixe óptico, entretanto, mesmo com controlador de temperatura parametrizado para ajuste diferencial de 1 °C, não foi o suficiente para estabilização. Ainda que o circuito elétrico estivesse “aberto”, a placa de aço ainda possuía muita energia armazenada, e continuava emanando calor de forma espontânea. Na Figura 27(a) é possível observar que o *hotspot* está centralizado em relação ao anteparo, e na Figura 27(b), o mesmo *hotspot* apresenta um considerável deslocamento do ponto original quando está sob alta temperatura.



Figura 27 – Imagem do feixe centralizado (a) e a imagem do feixe deslocado após incidência de temperatura(b).

À medida que a temperatura e o fluxo de ar aumentavam sob o feixe, a turbulência evoluía proporcionalmente. No regime de menor influência de temperatura e fluxo de ar, ou seja, no regime menos turbulento, o valor da constante de estrutura, o C_n^2 , teve valor médio de $2,84 \times 10^{-12}$, enquanto no regime de maior incidência de fluxo de ar e temperatura, chegou ao valor médio de $9,12 \times 10^{-12}$.

Com a nova configuração eletrônica, ou seja, com o conversor analógico digital da NI, foi possível observar um aumento significativo dos valores de variância, entretanto, a tendência elevação desse valor em função da temperatura se manteve. À medida que a temperatura e fluxo incidente sob o feixe ocorria, assim como no Arranjo Experimental II, proporcionalmente os valores da variância também aumentavam. O resultado pode ser comparado na Figura 28.



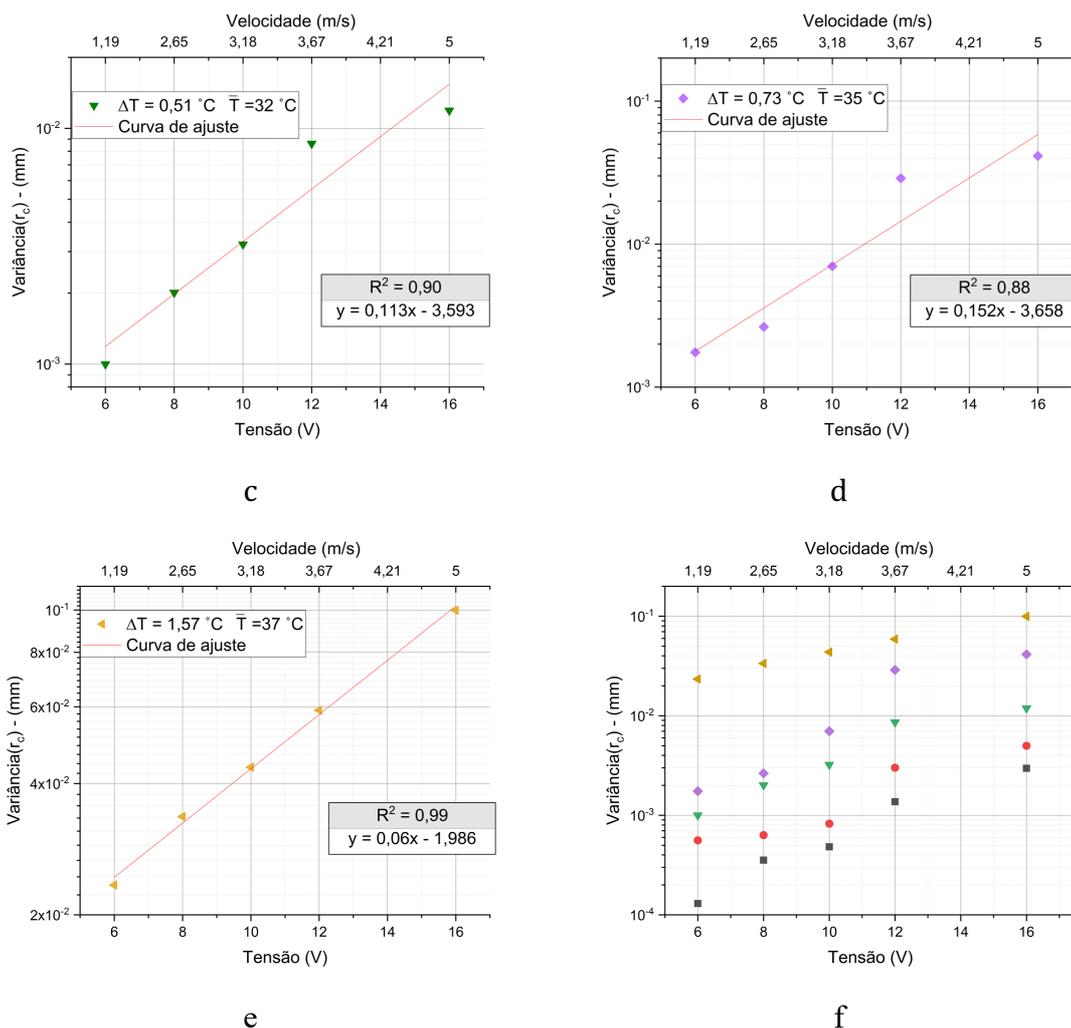


Figura 28 – Variância de r_c em $26 \text{ }^\circ\text{C}$ (a), em $28 \text{ }^\circ\text{C}$ (b), em $32 \text{ }^\circ\text{C}$ (c), em $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (d), em $37 \text{ }^\circ\text{C}$ (e), e consolidado (f) x Fluxo de ar - NI

Entre os intervenientes durante execução pesquisa, a condição ambiental do laboratório dificultou replicar de forma semelhante todas as condições de medida (temperatura ambiente e controle das correntes de ar externas), mas apesar disso, os valores obtidos na caracterização do procedimento Experimental III, demonstrados na Tabela 6 se assemelharam aos resultados obtidos em pesquisas anteriores [31].

m/s	C_n^2 em $28 \text{ }^\circ\text{C}$	C_n^2 $30 \text{ }^\circ\text{C}$	C_n^2 $32 \text{ }^\circ\text{C}$	C_n^2 $35 \text{ }^\circ\text{C}$	C_n^2 $37 \text{ }^\circ\text{C}$	C_n^2 $40 \text{ }^\circ\text{C}$
1,19	$2,85 \times 10^{-12}$	$3,88 \times 10^{-12}$	$4,36 \times 10^{-12}$	$5,14 \times 10^{-12}$	$5,38 \times 10^{-12}$	$5,39 \times 10^{-12}$
2,65	$3,84 \times 10^{-12}$	$4,07 \times 10^{-12}$	$4,60 \times 10^{-12}$	$5,31 \times 10^{-12}$	$6,19 \times 10^{-12}$	$6,68 \times 10^{-12}$
3,18	$4,28 \times 10^{-12}$	$4,41 \times 10^{-12}$	$4,65 \times 10^{-12}$	$6,27 \times 10^{-12}$	$5,76 \times 10^{-12}$	$7,18 \times 10^{-12}$
3,67	$4,07 \times 10^{-12}$	$5,23 \times 10^{-12}$	$5,34 \times 10^{-12}$	$5,19 \times 10^{-12}$	$6,14 \times 10^{-12}$	$7,09 \times 10^{-12}$
4,21	$6,93 \times 10^{-12}$	$6,76 \times 10^{-12}$	$6,90 \times 10^{-12}$	$6,70 \times 10^{-12}$	$9,69 \times 10^{-12}$	$9,47 \times 10^{-12}$

Tabela 6 - Dados coletados Arranjo Experimental III

A maior taxa de amostragem e quantização com o novo setup proposto, melhorou consideravelmente a precisão da caracterização, entretanto, o perfil do comportamento do fluxo se manteve semelhante ao Arranjo experimental II, o que valida ambos os experimentos.

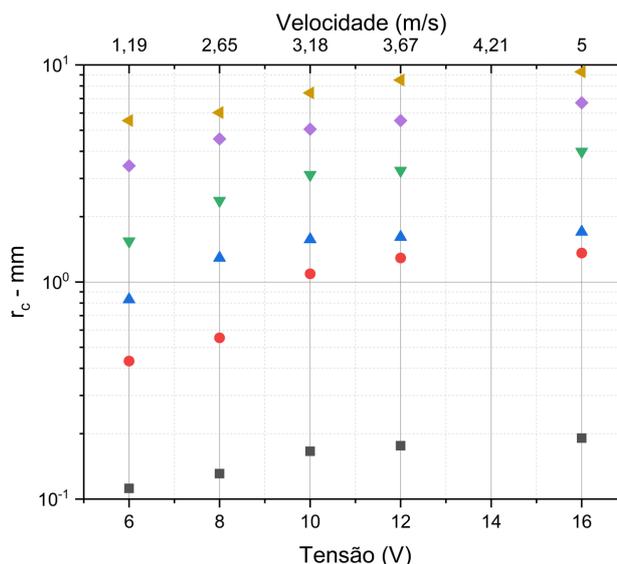


Figura 29 - Variação do r_c em função da temperatura e fluxo de ar - NI

Similar ao ocorrido no Arranjo Experimental II, foi possível verificar pelo gráfico da Figura 28 que o r_c variou quase que de forma linear em função do fluxo, entretanto, houve significativa mudança em função da temperatura. A observação do perfil do fluxo de energia com o NI, nas mesmas condições, ou seja, entre 28 e 40 °C, permitiu identificar um deslocamento de mais de 8mm do centro instantâneo do feixe.

Seguindo os mesmos parâmetros de coleta de dados anteriores, o experimento foi repetido com fluxo de ar transversal feixe óptico. Como sabido, à medida que o ar ganha mais energia, se expande e torna-se menos denso e tende a subir. Como há uma força propulsora oriunda dos sistemas compostos pelos ventiladores, é correto afirmar que, haverá maior influência maior sobre o feixe óptico quando a energia estiver sendo empurrada de forma vertical ascendente que transversal ao feixe. Verificou-se através das medidas de direção de fluxo de energia, que de fato quanto mais energia e fluxo de ar é incidida sob o feixe, é possível demonstrar a relação direta entre a turbulência, temperatura e dispersão dos

centros instantâneos do feixe óptico. Na tabela 7, é possível verificar os resultados do comportamento do centro instantâneo com fluxo de ar na vertical ascendente.

m/s	r_c $\Delta T = 0,50^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 26^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,84^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 28^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,55^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 30^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,50^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 32^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,73^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 35^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 1,57^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 37^\circ\text{C}$
1,19	0,11	0,43	0,83	1,54	3,43	5,54
2,65	0,13	0,55	1,29	2,37	4,56	6,03
3,18	0,17	1,09	1,57	3,12	5,06	7,43
3,67	0,18	1,29	1,61	3,26	5,54	8,52
4,21	0,19	1,36	1,70	3,99	6,69	9,30

Tabela 7 - Relação comportamental do r_c x Temperatura e Fluxo na vertical - NI

Na Tabela 8 podemos verificar os resultados com o fluxo na perpendicular ao feixe óptico. Neste sentido, ouve pouca expressão na variação do centro do feixe quando comparado ao mesmo fluxo na vertical.

m/s	r_c $\Delta T = 0,50^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 26^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,84^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 28^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,55^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 30^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,50^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 32^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 0,73^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 35^\circ\text{C}$	r_c $\Delta T = 1,57^\circ\text{C}$ $\bar{T} = 37^\circ\text{C}$
1,19	0,10	0,59	0,62	1,20	1,48	2,12
2,65	0,10	0,49	0,68	1,36	1,56	2,30
3,18	0,10	0,43	0,70	1,19	1,66	2,14
3,67	0,11	0,41	0,73	1,38	1,75	2,43
4,21	0,09	0,52	0,62	1,41	1,90	2,60

Tabela 8 - Relação comportamental do r_c x Temperatura e Fluxo na horizontal - NI

Comparando os resultados da variação do centro instantâneo do feixe Arranjo experimental III, apresentados na tabela 7, com os resultados do Arranjo Experimental II, apresentados na tabela 8, que apesar da mesma tendencia de aumento de deslocamento em função da temperatura, e pouca expressão em função do fluxo de ar, é possível identificar uma melhor sensibilidade em função da maior taxa de amostragem do NI quando comparado com o Arduino.

$\bar{T}^\circ\text{C}$	$\Delta T^\circ\text{C}$	Coef. Ang.	Coef. Lin.
28	0,59	0,014	-3,560
30	1,03	0,002	-3,560
32	0,78	0,006	-3,300
35	1,01	0,007	-3,200

Tabela 9 - Coeficientes – Arduino

$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	$\Delta T^{\circ}\text{C}$	<i>Coef. Ang.</i>	<i>Coef. Lin.</i>
26	0,50	0,134	-4,600
28	0,84	0,107	-3,397
32	0,51	0,113	-3,560
35	0,73	0,152	-3,580

Tabela 10 - Coeficientes – NI

Capítulo 5 - Conclusões

Neste trabalho, as medidas de direção de fluxo de calor foram feitas utilizando a técnica de triangulação de potências ópticas e por monitoramento de temperaturas paralelas ao feixe. Toda caracterização ocorreu no ambiente interno com auxílio de fontes de calor e fluxo, respectivamente controladas e monitoradas por controladores e sensores. Para entendimento e execução, são apresentados tópicos relacionados ao meio ambiente e seu impacto na propagação de sinais ópticos. A divagação, cintilação e alargamento do feixe são investigados como efeitos de turbulência e seu impacto nas ligações FSO, sendo pilares essenciais para a compreensão das medidas de direção de fluxo de energia. Foram abordadas as premissas conceituais de balanço de energia e seus impactos para o clima e planejamento do gerenciamento de recursos hídricos. Posteriormente, estudou-se a turbulência atmosférica, definiu-se a constante de estrutura do índice de refração e discorreu-se sobre os conceitos teóricos envolvendo a propagação de frentes de onda de luz na atmosfera, destacando-se a forma Gaussiana do feixe óptico e suas propriedades. Em continuidade ao tema, são apresentadas as técnicas de medição de turbulência e suas análises qualitativas e quantitativas. E por último, para comprovação real das técnicas de medição, são apresentados experimentos com quatro arranjos propostos a seguir.

O Arranjo Experimental I, evidencia o perfil Gaussiano da fonte óptica de baixo custo LED. O conjunto óptico, doravante chamado de transmissor, basicamente composto por um LED, um tubo para confinamento da luz e uma lente biconvexa. Com um software de análise de imagens, foi possível analisar a imagem projetada no anteparo de papel vegetal e caracterizar o tipo de perfil óptico. No Arranjo Experimental II foi possível validar a replicação da técnica de rastreamento do feixe óptico, em fases: alinhamento, caracterização do feixe, caracterização da constante de estrutura do índice de refração e coeficiente de estrutura de temperatura. Ainda neste mesmo conjunto foi possível submeter o feixe a influência do fluxo de ar quente de forma variada e controlada, simulando a turbulência atmosférica e assim, mensurar as direções fluxo de energia. Por fim, o Arranjo Experimental III e finalizado com algumas alterações em relação ao experimento anterior. Foi aumentada a taxa amostral e quantização, e ainda, incluído um novo sistema de insuflamento transversal. A simulação da turbulência mesmo que *indoor*, apresentou os resultados consistentes quando comparados com os evidenciados na literatura. As medições de direção do fluxo de energia

usando as técnicas aplicadas nos experimentos foram bem sucedidas, e mesmo em condições controladas, comprovam os obstáculos de medir o fluxo turbulento.

Foi feita a comparação da técnica utilizando o microntrolador Arduino e o Conversor Analógico da *National Instruments* e resultados demonstraram que é possível conceber um *setup* de menor custo sem comprometer a validação dos dados, entretanto, se faz necessário melhorar a taxa de amostragem e quantização. A comparação técnica e os custos por hardware podem ser verificadas no Anexo 2.

5.1 Trabalhos Futuros

Como etapas futuras trabalho propõe-se a implementação do sistema embarcado com uso de hardware e software próprios. O aprimoramento do *setup* em um ambiente confinado, com secções isoladas e controles distintos por área auxiliariam simular de forma aproximadamente semelhante as condições encontradas na natureza. Ajustes precisos de umidade, temperatura, visibilidade, vento e pressão seriam os conjuntos de parâmetros para aprimoramento das técnicas. O domínio e processamento dessas variáveis serviriam para o desenvolvimento de sistemas embarcados focados na medição de turbulência atmosférica, em enlaces FSO, que com a devida coleta de dados, poderá fazer uso do aprendizado de máquina e inteligência artificial para a predição e correção do enlace óptico em caso de turbulência excessiva.

Referências

- [1] Wilfried H. Brutsaert, D. Reidel, “Evaporation into the atmosphere: Theory, history and applications”, 1982, p. vii-299.
- [2] R. Sampaio *et al.*, “Cintilometria aplicada à estimativa do fluxo de calor sensível da Cidade Universitária-Ilha do Fundão/RJ Autor Correspondente”, nov. 2017.
- [3] A. J. Dyer, “Measurements of evaporation and heat transfer in the lower atmosphere by an automatic eddy-correlation technique”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 87, n° 373, p. 401–412, 1961, doi: 10.1002/qj.49708737311.
- [4] L. P. de Alencar, G. C. Sedyama, E. C. Mantovani, e M. A. Martinez, “Tendências recentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa - MG”, *Engenharia Agrícola*, vol. 31, n° 4, p. 631–642, 2011, doi: 10.1590/S0100-69162011000400002.
- [5] J. L. Heitman, R. Horton, T. J. Sauer, T. S. Ren, e X. Xiao, “Latent heat in soil heat flux measurements”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, n° 7, p. 1147–1153, jul. 2010, doi: 10.1016/j.agrformet.2010.04.017.
- [6] G. M. Carlomagno e G. Cardone, “Infrared thermography for convective heat transfer measurements”, *Exp Fluids*, vol. 49, n° 6, p. 1187–1218, dez. 2010, doi: 10.1007/s00348-010-0912-2.
- [7] A. J. L. Harris, L. Lodato, J. Dehn, e L. Spampinato, “Thermal characterization of the Vulcano fumarole field”, *Bull Volcanol*, vol. 71, n° 4, p. 441, maio 2009, doi: 10.1007/s00445-008-0236-8.
- [8] D. Gaudin, F. Beauducel, P. Allemand, C. Delacourt, e A. Finizola, “Heat flux measurement from thermal infrared imagery in low-flux fumarolic zones: Example of the Ty fault (La Soufrière de Guadeloupe)”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 267, p. 47–56, nov. 2013, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.09.009.
- [9] G. Oliveira *et al.*, “Novo Método de Medida de Evaporação e Evapotranspiração para Áreas de Plantio”, 2017. doi: 10.14209/sbrt.2017.156.
- [10] H. M. Hemakumara, L. Chandrapala, e A. F. Moene, “Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer”, *Agricultural Water Management*, vol. 58, n° 2, p. 109–122, fev. 2003, doi: 10.1016/S0378-3774(02)00131-2.
- [11] H. M. E. Geli, J. González-Piqueras, C. M. U. Neale, C. Balbontín, I. Campos, e A. Calera, “Effects of Surface Heterogeneity Due to Drip Irrigation on Scintillometer Estimates of Sensible, Latent Heat Fluxes and Evapotranspiration over Vineyards”, *Water*, vol. 12, n° 1, p. 81, dez. 2019, doi: 10.3390/w12010081.
- [12] S. Augustine e N. Chetty, “Experimental verification of the turbulent effects on laser beam propagation in space”, *Atmosfera*, vol. 5793, out. 2014, doi: 10.1016/S0187-6236(14)70037-2.
- [13] S. C. Ndlovu, “Experimental measurement of the fluctuations of a laser beam due to thermal turbulence.”, Thesis, 2013. Acessado: 23 de abril de 2022. [Online]. Disponível em: <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/9751>
- [14] Terry A. Howell, Robert L. McCormick, e Claude J. Phene, “Design and Installation of Large Weighing Lysimeters”, *Transactions of the ASAE*, vol. 28, n° 1, p. 106–112, 1985, doi: 10.13031/2013.32212.
- [15] V. N. H. Silva, A. P. L. Barbero, e R. M. Ribeiro, “Nova Técnica para a Medida da

- Constante de Estrutura para o Índice de Refração () em Sistemas de Transmissão Óptica no Espaço Livre”, p. 6, 2009.
- [16] C. A. C. dos Santos, “Análise das necessidades hídricas da vegetação Tamarisk através da razão de Bowen e do modelo SEBAL”, *Rev. bras. meteorol.*, vol. 26, nº 1, p. 85–94, mar. 2011, doi: 10.1590/S0102-77862011000100008.
- [17] V. T. Chow, D. R. Maidment, e L. W. Mays, *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [18] J. Grace, “Understanding and managing the global carbon cycle”, *J Ecology*, vol. 92, nº 2, p. 189–202, abr. 2004, doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00874.x.
- [19] J. B. MONCRIEFF, Y. MALHI, e R. LEUNING, “The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water”, *Global Change Biology*, vol. 2, p. 231–240, abr. 2006, doi: 10.1111/j.1365-2486.1996.tb00075.x.
- [20] “Biomet Sensors”. https://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/biomet (acessado 1º de maio de 2022).
- [21] A. Mansour, R. Mesleh, e M. Abaza, “New challenges in wireless and free space optical communications”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 89, p. 95–108, fev. 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.03.027.
- [22] L. C. Andrews e R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, 2nd ed. Bellingham, Wash: SPIE Press, . 2005.
- [23] D. C. Cowan, J. Reolons, L. C. Andrews, e C. Y. Young, “Propagation of flattened Gaussian beams in the atmosphere: a comparison of theory with a computer simulation model”, em *Atmospheric Propagation III*, maio 2006, vol. 6215, p. 76–85. doi: 10.1117/12.669601.
- [24] L. C. Andrews e R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, 2nd ed. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2005.
- [25] L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, e M. A. Al-Habash, “Theory of optical scintillation”, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 16, nº 6, p. 1417, jun. 1999, doi: 10.1364/JOSAA.16.001417.
- [26] do J. R. Nascimento, F. H. B. Bittar, M. A. D. Garrido, W. de S. G. Filho, A. P. L. Barbero, e V. N. H. Si, “Extensão do Método de Triangulação de Potências para Rastreamento de Feixe Ótico em Enlaces FSO”, 2020.
- [27] N. Assis, A. Tauk, V. Silva, A. Barbero, e Ricardo. Ribeiro, “Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude”, apresentado em XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2011. doi: 10.14209/sbrt.2011.115.
- [28] G. de Oliveira, “Caracterização da constante de estrutura do índice de refração (cn2) através de triangulação de potências ópticas”, 2014, Acessado: 2 de novembro de 2021. [Online]. Disponível em: <http://app.homologacao.uff.br/riuff/handle/1/10498>
- [29] “Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore”. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1277847> (acessado 1º de maio de 2022).
- [30] *ImageJ*. 2022. [MacOsx, Windows, Linux]. Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
- [31] Z. Ghassemlooy, H. Le Minh, S. Rajbhandari, J. Perez, e M. Ijaz, “Performance Analysis of Ethernet/Fast-Ethernet Free Space Optical Communications in a Controlled Weak Turbulence Condition”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, nº 13, p. 2188–2194, jul. 2012, doi: 10.1109/JLT.2012.2194271.

ANEXO 1 – Sistema de recepção e coleta de dados

Conforme apresentado no Capítulo 3, essa proposta de trabalho objetivou desenvolver um sistema receptor menor custo e de componentes de fácil aquisição. O diagrama eletrônico do sistema receptor, incluindo os sensores de temperatura e fio quente “Hotwire”, podem ser verificados junto a Figura A.1.

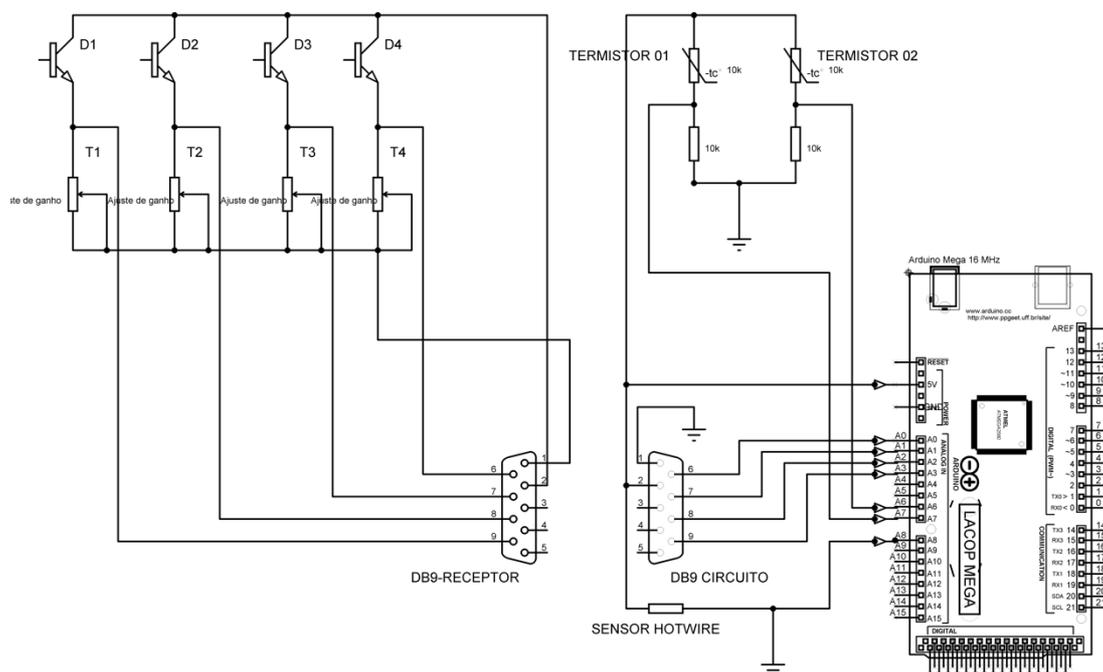


Figura A 1 -Diagrama do sistema de recepção e coleta de dados

O código utilizado no circuito da figura A1, contempla a aquisição de dados dos fototransistores, termistores e sensor de fio quente. Nenhuma biblioteca de terceiros foi utilizada no projeto. O conteúdo completo poderá ser acessado e atualizado no repositório [GIT](https://github.com/marciogarridoLaCop/Arduino_FSO) (https://github.com/marciogarridoLaCop/Arduino_FSO). O projeto foi desenvolvido utilizando a plataforma Vs Code.

- **main.cpp**

```
/* DISSERTACAO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELETRICA E TELECOMUNICACOES – UFF 2018.2
ALUNO:MARCIO ALEXANDRE DIAS GARRIDO.
PROFESSOR DR. VINICIUS NUNES
```

```
*/
#include <sensor_temp.h>

int hotwire_port = 9;
double temperatura_inferior, temperatura_superior = 0;
float velocidade = 0;
int sample = 15;
int quantiza = (5.0 / 1023.0)
bool simulated;

void setup()
{
  Serial.begin(2000000);
  Serial.flush();
  simulated = true;
  Serial.println("Press enter to read values");
}

void printar()
{
  readvalue = analogRead(0);
  Serial.print(readvalue * quantiza, 4);
  Serial.print(" ");

  readvalue = analogRead(1);
  Serial.print(readvalue * quantiza, 4);
  Serial.print(" ");

  readvalue = analogRead(2);
  Serial.print(readvalue * quantiza, 4);
  Serial.print(" ");

  readvalue = analogRead(3);
  Serial.print(readvalue * quantiza, 4);

  for (int index = 0; index < sample; index++)
  {
    double temperature1 = temp1.getTemp(resistor);
    temperatura_inferior += temperature1;
    double temperature2 = temp2.getTemp(resistor);
    temperatura_superior += temperature2;

    delayMicroseconds(1);
  }

  Serial.print(" ");
  Serial.print(temperatura_inferior = temperatura_inferior / sample, 0);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(temperatura_superior = temperatura_superior / sample, 0);
  Serial.print(" ");
}
```

```

    readvalue = analogRead(hotwire_port);
    volts = readvalue * quantiza;
    velocidade = ((volts - 1) / (5 - 1)) * 39.8 + 0.1;
    Serial.print(velocidade, 2);
    Serial.print(" ");
    Serial.println();
}
void loop()
{
    if (Serial.available())
    {
        if (simulated == true)
        {
            Serial.flush();
            char character;
            information = "";
            while (Serial.available() > 0)
            {
                character = Serial.read();
                // check if return keyboard ware pressed
                if (character == '\n')
                {
                    printar();
                }
                information.concat(character);
                delay(10);
            }
        }
        else
        {
            printar();
        }
    }
}
}

```

- **sensor_temp.h**

```

/*
MARCIO GARRIDO 2021
BIBLIOTECA DE TEMERATURA
*/

const int pinTermistor1 = A5;
const int pinTermistor2 = A6;
// Parâmetros do termistor
double t, t1, t2 = 0;
unsigned long time = 0;
const double beta = 3960.0;
const double r0 = 100000.0;
const double t0 = 273.0 + 25.0;
const double rx = r0 * exp(-beta / t0);

```

```

const double vcc = 4.95;
const double R = 100000.0;

float get_temp1()
{
    double v = (vcc * analogRead(pinTermistor1) / 1024.0);
    double rt = (vcc * R) / v - R;
    t = beta / log(rt / rx);
    t = t - 273.0;
    return t;
}

float get_temp2()
{
    double v = (vcc * analogRead(pinTermistor2) / 1024.0);
    double rt = (vcc * R) / v - R;
    t = beta / log(rt / rx);
    t = t - 273.0;
    return t;
}

```

Para coleta de dados NI, uma parte do código foi reescrita para a plataforma do MATLAB. A versão completa pode ser conferida no paragrafo seguinte:

- **DaqRead.mlx**

```

% Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações
% LACOP – Laboratório de Comunicações Óticas – UFF
% Aluno : Márcio Alexandre Dias Garrido
% Data : Fev/2022
% Coleta de dados Informações sobre o DAQ6216 – NI
clear all;
clc;
format long;

```

```

% Instância DAC
sample_rate = 1000;
time_reading=120;
d = daq("ni");
d.Rate = sample_rate;

```

```

% porta 0 – Detector 01
A0 = addinput(d,"Dev1","ai0","Voltage");
A0.Range = [-5 5];

```

```
A0.TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```
% porta 1 - Detector 02
```

```
A1 = addinput(d,"Dev1","ai2","Voltage");
```

```
A1.Range = [-5 5];
```

```
A1.TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```
% porta 2 - Detector 03
```

```
A2 = addinput(d,"Dev1","ai3","Voltage");
```

```
A2.Range = [-5 5];
```

```
A2.TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```
% porta 3 - Detector central
```

```
A3 = addinput(d,"Dev1","ai4","Voltage");
```

```
A3.Range = [-5 5];
```

```
A3.TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```
% porta 4 - Temperatura inferior
```

```
A4 = addinput(d,"Dev1","ai5","Voltage");
```

```
A4.Range = [-5 5];
```

```
A4.TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```
% porta 5 - Temperatura inferior
```

```
A5 = addinput(d,"Dev1","ai6","Voltage");
```

```
A5.Range = [-5 5];
```

```
A5.TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```
% porta 6 - Sensor de Fluxo
```

```
A6 = addinput(d,"Dev1","ai7","Voltage");
```

```
A6.Range = [-5 5];
```

```
% Coleta
```

```
[DADOS,starTime] = read(d,seconds(time_reading));
```

```
%Atualizar nome das colunas
```

```
DADOS.Properties.DimensionNames{1} = 'Time';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{1} = 'D1';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{2} = 'D2';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{3} = 'D3';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{4} = 'DCenter';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{5} = 'Temp_under';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{6} = 'Temp_upper';
```

```
DADOS.Properties.VariableNames{7} = 'AirFlow';
```

```
%calcular temperatura
```

```
DADOS.Temp_under(:,1)=f_temperatura(DADOS.Temp_under(:,1));
DADOS.Temp_upper(:,1)=f_temperatura(DADOS.Temp_upper(:,1));
```

```
%calcular fluxo
```

```
DADOS.AirFlow(:,1)=f_flow(DADOS.AirFlow(:,1));
```

```
%Gravar dados
```

```
arquivo= "NOME_DO_ARQUIVO";
save(arquivo, 'DADOS');
```

```
function [t1] = f_temperatura(valor)
```

```
beta = 3960.0;
r0 = 100000.0;
t0 = 273.0 + 25.0;
rx = r0 * exp(-beta / t0);
vcc = 5;
R = 100000.0;
```

```
v = valor;
rt = (vcc * R) ./ v - R;
t1 = beta ./ log(rt / rx);
t1 = t1 - 273.0;
end
```

```
function [flow] = f_flow(valor)
```

```
volts = valor;
vcc=5.2;
flow = ((volts - 1) / (vcc - 1)) * 39.8 + 0.1;
if flow < 0.01
    flow=0;
end
end
```



Technical Data Sheet

5mm Phototransistor T-1 3/4

PT334-6C

Features

- Fast response time
- High photo sensitivity
- Pb free
- The product itself will remain within RoHS compliant version.

Descriptions

- PT334-6C is a high speed and high sensitive silicon NPN epitaxial planar phototransistor in a standard 5 Φ package. Due to is water clear epoxy the device is sensitive to visible and near infrared radiation.



Applications

- Infrared applied system
- Floppy disk drive
- Camera

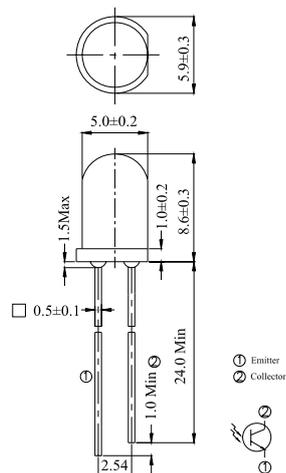
Device Selection Guide

LED Part No.	Chip	Lens Color
	Material	
PT	Silicon	Water Clear



PT334-6C

Package Dimensions



- Notes:** 1. All dimensions are in millimeters
2. Tolerances unless dimensions ± 0.25 mm

Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Rating	Units
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	30	V
Emitter-Collector-Voltage	V_{ECO}	5	V
Collector Current	I_C	20	mA
Operating Temperature	T_{opr}	$-25 \sim +85^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	T_{stg}	$-40 \sim +85^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Lead Soldering Temperature	T_{sol}	260	$^\circ\text{C}$
Power Dissipation at (or below) 25 $^\circ\text{C}$ Free Air Temperature	P_c	75	mW

- Notes:** *1: Soldering time ≤ 5 seconds.



PT334-6C
Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Collector – Emitter Breakdown Voltage	BV_{CEO}	$I_C=100\mu A$ $E_e=0mW/cm^2$	30	---	---	V
Emitter-Collector Breakdown Voltage	BV_{ECO}	$I_E=100\mu A$ $E_e=0mW/cm^2$	5	---	---	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C=2mA$ $E_e=1mW/cm^2$	---	---	0.4	V
Rise Time	t_r	$V_{CE}=5V$ $I_C=1mA$	---	15	---	μS
Fall Time	t_f	$R_L=1000\Omega$	---	15	---	
Collector Dark Current	I_{CEO}	$E_e=0mW/cm^2$ $V_{CE}=20V$	---	---	100	nA
On State Collector Current	$I_{C(on)}$	$E_e=1mW/cm^2$ $V_{CE}=5V$	1.77	3.5	---	mA
Wavelength of Peak Sensitivity	λ_p	---	---	940	---	nm
Rang of Spectral Bandwidth	$\lambda_{0.5}$	---	---	400-1100	---	nm

Rankings

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Test Condition
J	$I_{C(on)}$	1.77	3.61	mA	$V_{CE}=5V$ $E_e=1mW/cm^2$
K		2.67	5.07		
L		4.18	7.07		



PT334-6C

Typical Electro-Optical Characteristics Curves

Fig.1 Collector Power Dissipation vs. Ambient Temperature

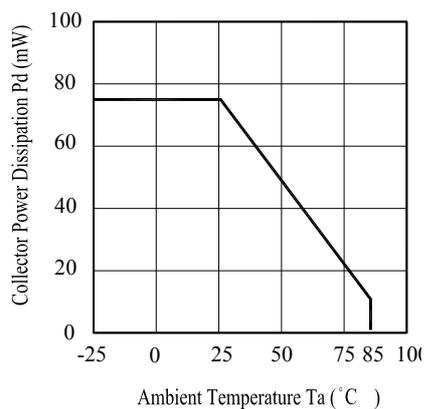


Fig.2 Spectral Sensitivity

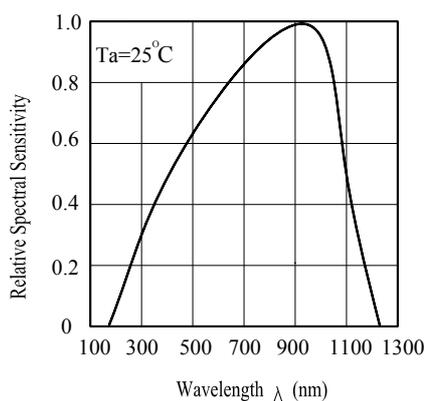


Fig.3 Relative Collector Current vs. Ambient Temperature

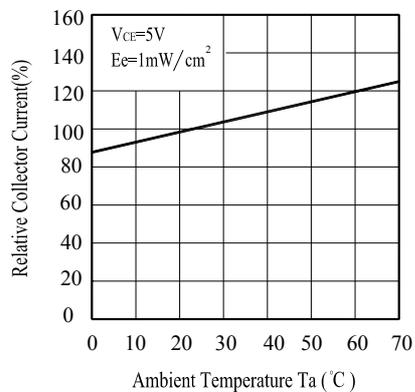
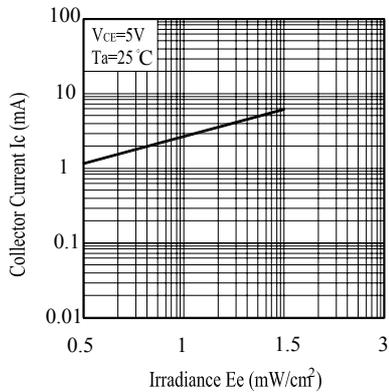


Fig.4 Collector Current vs. Irradiance



LED DIÂMETRO 5 MM, EMISSÃO VERMELHA ENCAPSULAMENTO VERMELHO DIFUSO - L621

Destaques:

- Alta intensidade luminosa e alta eficiência;
- Tecnologia AlGaAs/GaAs;
- Campo de visualização STD;
- Excelente performance e visibilidade;
- Adequado para montagem através de furos - PTH;
- Suporta fixação por processo solda à onda;
- Não contém produtos nocivos ao meio ambiente.
- Atende à normativa RoHS.

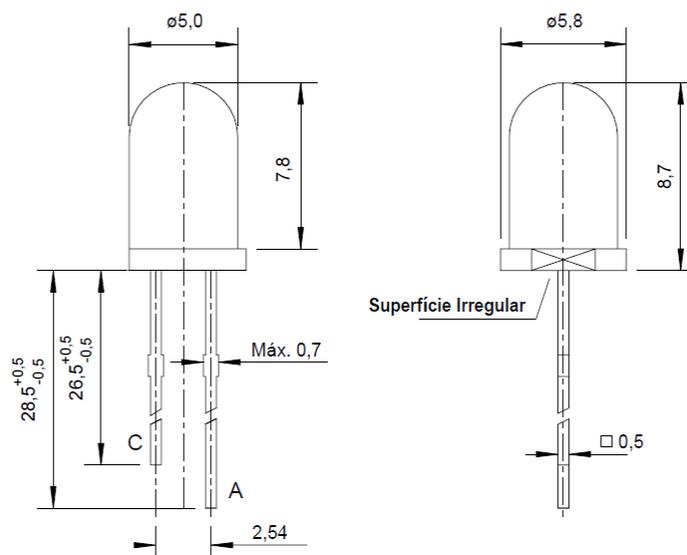


Aplicações típicas:

- Iluminação de sinalização e de simbologias;
- Painéis de comunicação "indoor";
- Sinalização indicativa em aparelhos elétricos;
- Iluminação de advertência;
- Iluminação decorativa em geral.

Combinando alta eficiência luminosa e estabilidade cromática e ótica, este produto é indicado para as mais diversas aplicações de sinalização de advertência e informativa.

Dimensões Físicas



- Todas as dimensões em milímetros.
- Tolerâncias não especificadas: $\pm 0,20\text{mm}$.



ANEXO 2 – Comparação técnica comercial

Descrição	Arduino UNO	Arduino MEGA 2560	NI USB-6216
<i>Alimentação</i>	5V	5V	±0.2 V, ±1 V, ±5 V, ±10 V
<i>Corrente de Consumo:</i>	Media de 15mA	Media de 70mA	-
<i>Temperatura de Operação:</i>	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C
<i>Processador:</i>	AVR® 8-bit RISC	ATmega2560 RISC	-
<i>Conversores ADC</i>	6 ADC com 10-bit	16 ADC com 10-bit	16ADC - 16 bits 400 kS/s
<i>WiFi:</i>	Somente com Shield	Somente com Shield	Não Possui
<i>Bluetooth:</i>	Não Possui	Não Possui	Não Possui
<i>Custo</i>	R\$129,00	R\$199.00	R\$26839,00