

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

MEDIDA DE EVAPORAÇÃO POR MEIO DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA E DA  
TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS

DANIEL ALMEIDA DE MEDEIROS

NITERÓI

2016

DANIEL ALMEIDA DE MEDEIROS

MEDIDA DE EVAPORAÇÃO POR MEIO DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA E DA  
TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva

Co-Orientador: Me. Gúbio de Oliveira

NITERÓI

2016

DANIEL ALMEIDA DE MEDEIROS

MEDIDA DE EVAPORAÇÃO POR MEIO DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA E DA  
TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em  
Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal  
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau  
de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Aprovado em      de dezembro de 2016

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva, Doutor em Ciências – Orientador  
Universidade Federal Fluminense

---

Me. Gúbio de Oliveira – Co-Orientador  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Carlos Rodrigues Pereira  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Thiago Vieira Nogueira Coelho  
Universidade Federal de Juiz de Fora

NITERÓI

2016



*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus familiares, amigos, colegas do LaCOP, funcionários da UFF e aos professores que me acompanharam.*

## **Agradecimentos**

---

Primeiramente agradeço a Deus que sempre me acompanha e me dá forças para enfrentar quaisquer acontecimentos.

A minha família pela motivação e apoio durante todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva e co-orientador Me. Gúbio de Oliveira, que não mediram esforços para dar todo apoio de orientação no desenvolvimento desta dissertação.

A minha namorada Maria Clara, que sempre me acompanhou e me incentivou a persistir nos meus objetivos.

Aos meus colegas da LaCOp por proporcionarem bons momentos de amizade e companheirismo, em especial ao Vinícius que contribuiu sobremaneira para realização dos experimentos.

Aos meus amigos do Centro de Atividades Culturais de Brasília pelo auxílio para a conclusão desse mestrado, de forma particular ao Dr. Franciscarlos, ao pe. Gustavo e ao pe. José Antônio.

## Resumo

---

A água é um elemento essencial para a sobrevivência de todos os seres vivos, além disso, tem uma grande importância no controle climático da Terra, por meio do ciclo hidrológico. Parte desse ciclo é composta pela transferência da água da superfície para a atmosfera, sendo dividido em dois fenômenos: a evaporação (da água dos oceanos, rios, lagos e reservatórios) e a evapotranspiração (ET – que é a evaporação da água no solo e a transpiração das plantas). Mensurar tais fenômenos é de grande relevância para compreender as alterações climáticas e para um manejo eficiente e sustentável da água. No entanto, os métodos de medidas existentes apresentam um alto custo de instalação e operação, sendo mais indicado para condições experimentais, ou dependem de parâmetros meteorológicos de difícil obtenção.

Neste contexto, apresentam-se nesta dissertação as teorias sobre a ET relacionando-a com a turbulência atmosférica por meio da constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$ . Além disso, é descrito os conceitos da técnica da triangulação de potências ópticas. Essa técnica baseia-se em um dos fenômenos sofridos pela luz ao se propagar por um meio que apresente turbulência atmosférica, de forma que as medições do fluxo de vapor d'água sejam de forma direta e, assim, independentes de dados meteorológicos. Os resultados obtidos em bancada demonstram uma forte correlação entre o efeito do *Beam Wander* causado pela turbulência atmosférica e a presença de vapor d'água durante a transmissão de um feixe óptico. A partir desses resultados, pode-se afirmar que é possível a medida direta da ET por meio da técnica de triangulação de potência, utilizando-se o efeito do *Beam Wander*.

**Palavras-chave:** Evapotranspiração, turbulência atmosférica, *Beam Wander*, técnica de triangulação de potências ópticas.

## Abstract

---

Water is an essential element for the survival of all living beings, moreover, it has a great importance in the climatic control of the Earth, through the hydrological cycle. Part of this cycle is composed of the transfer of water from the surface to the atmosphere and is divided into two phenomena: evaporation (from oceans, rivers, lakes and reservoirs) and evapotranspiration (ET - which is the evaporation of water in the soil and the transpiration of plants). Measuring such phenomena is of great relevance for understanding climate change and for efficient and sustainable water management. However, the existing measurement methods present high cost of installation and operation, being more indicated for experimental conditions or depend on meteorological parameters that are difficult to obtain.

In this context, they are presented in this dissertation as theories about the ET relating it with the atmospheric turbulence through of the structure constant of the refractive index  $C_n^2$ . In addition, are described the concepts of the optical triangulation method. This technique is based on one of the phenomena suffered by the light when propagating by a medium that presents atmospheric turbulence, so that as direct measurements of water flow and independent of meteorological data. The obtained results on bench demonstrate a strong correlation between the Beam Wander effect caused by atmospheric turbulence and the presence of water vapor during the transmission of a optic beam. From the results, it can be affirmed that it's possible the direct measurement of ET by means of the power triangulation technique, using the Beam Wander effect.

**Key-words:** Evapotranspiration, atmospheric turbulence, *Beam Wander*, power triangulation technique.

## Sumário

---

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Histórico.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Motivação.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4. Organização da Dissertação.....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 2 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Evaporação.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Transpiração.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Evapotranspiração .....</b>	<b>23</b>
2.3.1. Evapotranspiração Potencial (ET <sub>p</sub> ).....	24
2.3.2. Evapotranspiração de Referência (ET <sub>0</sub> ) .....	24
2.3.3. Evapotranspiração de Cultura (ET <sub>c</sub> ) .....	24
2.3.4. Evapotranspiração Real (ET <sub>r</sub> ).....	25
2.3.5. Variáveis que controlam a evapotranspiração.....	25
2.3.5.1. Elementos meteorológicos.....	25
2.3.5.2. Fatores da planta .....	27
2.3.5.3. Umidade do solo .....	27
2.3.5.4. Fatores de manejo da cultura e do solo .....	28
<b>CAPÍTULO 3 – MÉTODOS DE MEDIDA DIRETOS E INDIRETOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. Métodos diretos.....</b>	<b>29</b>
3.1.1. Lisímetro .....	29
3.1.2. Balanço hídrico .....	32
3.1.3. Controle da umidade do solo .....	33
<b>3.2. Métodos indiretos .....</b>	<b>34</b>
3.2.1. Tanque Classe A .....	34
3.2.2. Método de Penman-Monteith (Padrão FAO).....	36

3.2.3. Método de Covariância de Vórtices Turbulentos .....	37
3.2.4. Método da Constante de Estrutura do Índice de Refração .....	38
<b>CAPÍTULO 4 – EFEITOS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1. Absorção .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2. Espalhamento .....</b>	<b>45</b>
4.2.1. Espalhamento de Rayleigh.....	45
4.2.2. Espalhamento Mie .....	46
<b>4.3. Turbulência Atmosférica.....</b>	<b>46</b>
4.3.1. Cintilação.....	47
4.3.2. Deslocamento aleatório do feixe (Beam Wander).....	49
4.3.3. Alargamento do feixe (Beam Spread).....	49
<b>CAPÍTULO 5 – TÉCNICA DE TRIÂNGULAÇÃO DE POTÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1. Histórico.....</b>	<b>50</b>
<b>5.2. Análise qualitativa .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3. Análise quantitativa.....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO 6 – SETUP EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1. SETUP I.....</b>	<b>58</b>
6.1.1. Caracterização do Ebulidor.....	58
6.1.2. Medidas de Turbulência Atmosférica .....	69
6.1.2.1. Configurações e caracterizações iniciais do arranjo experimental.....	69
6.1.2.2. Medida de Turbulência Atmosférica sem vapor d’água .....	75
6.1.2.3. Medida de Turbulência Atmosférica com vapor d’água .....	75
<b>6.2 SETUP II .....</b>	<b>84</b>
<b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO .....</b>	<b>92</b>
<b>CAPÍTULO 8 – BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>94</b>
<b>CAPÍTULO 9 – ANEXOS .....</b>	<b>99</b>

## Índice de Figuras

---

FIGURA 1: CURVA APROXIMADA DO COEFICIENTE DE CULTURA. ....	25
FIGURA 2: ESQUEMA DE UM EVAPOTRANSPIRÔMETRO DE DRENAGEM. ....	31
FIGURA 3: ESQUEMA DO LISÍMETRO DE PESAGEM. ....	31
FIGURA 4: ESQUEMA DO LISÍMETRO DE SUB-IRRIGAÇÃO. ....	32
FIGURA 5: COMPONENTES DE ENTRADA E SAÍDA DE ÁGUA EM UM VOLUME DE CONTROLE. ....	32
FIGURA 6: RESISTÊNCIAS QUE CONTROLAM A TRANSFERÊNCIA DE VAPOR D'ÁGUA PARA A ATMOSFERA. ....	36
FIGURA 7: ABSORTIVIDADE DE GASES DA ATMOSFERA POR COMPRIMENTO DE ONDA. ....	44
FIGURA 8: ESPALHAMENTO DE RAYLEIGH. ....	46
FIGURA 9: ESPALHAMENTO MIE. ....	46
FIGURA 10: ESPALHAMENTO MIE PARA PARTÍCULAS MAIS LARGAS. ....	46
FIGURA 11: VARIAÇÃO DE $C_n^2$ COM A ALTITUDE. ....	47
FIGURA 12: EFEITOS PROVOCADOS POR PEQUENOS BOLSÕES DE AR. ....	48
FIGURA 13: EFEITO BEAM WANDER SOBRE A PROPAGAÇÃO DA LUZ (A). ALTERAÇÃO DA POSIÇÃO DO SPOT DE LUZ NO RECEPTOR (B). ....	49
FIGURA 14: ARRANJO CONTENDO 4 FOTODETECTORES EM UM ANTEPARO. ....	52
FIGURA 15: POSIÇÃO DA GAUSSIANA NO MOMENTO $t_0$ (A); POSIÇÃO DA GAUSSIANA NO MOMENTO $t_1$ (B). ...	53
FIGURA 16: ANTEPARO COM OS FOTODETECTORES DISPOSTOS NA FORMA DE UM TRIÂNGULO EQUILÁTERO. .	53
FIGURA 17: POSIÇÃO DOS FOTODETECTORES NO ANTEPARO. ....	54
FIGURA 18: ESQUEMÁTICO DA CARACTERIZAÇÃO DO EBULIDOR. ....	59
FIGURA 19: MONTAGEM DAS MEDIÇÕES PARA CARACTERIZAÇÃO DO EBULIDOR. ....	59
FIGURA 20: TAXA DE EVAPORAÇÃO PARA CADA CORRENTE ELÉTRICA DE ALIMENTAÇÃO DO EBULIDOR. ....	60
FIGURA 21: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 1 A. ....	61
FIGURA 22: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 2 A. ....	62
FIGURA 23: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 3 A. ....	62
FIGURA 24: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 4 A. ....	63
FIGURA 25: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 5 A. ....	64
FIGURA 26: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 6 A. ....	64
FIGURA 27: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 7 A. ....	65
FIGURA 28: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 8 A. ....	66
FIGURA 29: EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA DA ÁGUA COM CORRENTE DE 9 A. ....	66
FIGURA 30: MASSA DE ÁGUA EVAPORADA PARA AS CORRENTES DE 1 A A 9 A. ....	68
FIGURA 31: TEMPERATURA DA ÁGUA PARA AS CORRENTE DE 1 A A 9 A. ....	68
FIGURA 32: ESQUEMÁTICO DO ARRANJO MONTADO EM LABORATÓRIO. ....	70
FIGURA 33: ALINHAMENTO DO SISTEMA TRANSMISSOR E RECEPTOR. ....	70
FIGURA 34: CARACTERIZAÇÃO DO FOTODIODO CENTRAL. ....	71
FIGURA 35: DIAGRAMA DE BLOCOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DOS FOTODIODOS. ....	72
FIGURA 36: CURVA GAUSSIANA COM AMPLITUDE MÁXIMA. ....	73

FIGURA 37: CURVA GAUSSIANA COM PONTO LIMITE DA DISTÂNCIA DE W. ....	73
FIGURA 38: VALORES DE TENSÕES DOS 4 FOTODIODOS NO LABVIEW.....	74
FIGURA 39: GRÁFICO DAS TENSÕES DOS 4 FOTODIODOS NO MATLAB.....	74
FIGURA 40: GRÁFICO DAS POSIÇÕES EM “X” E “Y” DA MEDIDA SEM VAPOR D’ÁGUA. ....	75
FIGURA 41: SETUP PARA A MEDIÇÃO DE TURBULÊNCIA.....	76
FIGURA 42: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 1 A. ....	79
FIGURA 43: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 2 A. ....	79
FIGURA 44: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 3 A. ....	80
FIGURA 45: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 4 A. ....	80
FIGURA 46: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 5 A. ....	81
FIGURA 47: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 6 A. ....	81
FIGURA 48: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 7 A. ....	82
FIGURA 49: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 8 A. ....	82
FIGURA 50: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM CORRENTE DE 9 A. ....	83
FIGURA 52: ARRANJO EXPERIMENTAL PARA MEDIDA DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DO SETUP II.....	85
FIGURA 53: GRÁFICO DA TAXA DE EVAPORAÇÃO POR TEMPERATURA DO SETUP II. ....	86
FIGURA 54: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM TEMPERATURA DA ÁGUA A 23 °C.....	87
FIGURA 55: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM TEMPERATURA DA ÁGUA A 30 °C.....	87
FIGURA 56: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM TEMPERATURA DA ÁGUA A 41 °C.....	88
FIGURA 57: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM TEMPERATURA DA ÁGUA A 48 °C.....	88
FIGURA 58: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM TEMPERATURA DA ÁGUA A 58 °C.....	89
FIGURA 59: ESPALHAMENTO DOS CENTROS INSTANTÂNEOS COM TEMPERATURA DA ÁGUA A 71 °C.....	89
FIGURA 60: GRÁFICO DE RC POR TEMPERATURA DO SETUP II. ....	90

## Índice de Tabelas

---

TABELA 1: VALORES DO COEFICIENTE PARA O TANQUE CLASSE A (Kp) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE RELATIVA DO AR, VENTO E LOCAL DE INSTALAÇÃO DO TANQUE. OBS.: REDUZIR Kp EM 20% PARA LOCAIS QUENTES E VENTOSOS E EM 5 A 10% PARA CONDIÇÕES MODERADAS DE VENTO, TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA, EM ÁREAS EXTENSAS DE SOLO NÚ E ARADO. ....	35
TABELA 2: TAXA DE EVAPORAÇÃO E TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA CADA CORRENTE. ....	60
TABELA 3: VALORES DE $I_t$ E $I_v$ PARA AS CORRENTES DE ALIMENTAÇÃO ENTRE 1 A A 9 A. ....	67
TABELA 4: VALORES DE DISPERSÃO PARA CADA VALOR DE CORRENTE. ....	77
TABELA 5: MASSA DE ÁGUA EVAPORADA PARA CADA VALOR DE CORRENTE. ....	78
TABELA 6: RESULTADOS DAS MEDIDAS DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA. ....	84
TABELA 7: TAXA DE EVAPORAÇÃO POR TEMPERATURA DA ÁGUA. ....	86
TABELA 8: VALORES DE Rc POR TEMPERATURA DA ÁGUA. ....	90

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Histórico

A gestão de recursos hídricos é um tema que está ganhando cada vez mais relevância em todo o mundo. Haja vista que é imprescindível mensurar o quantitativo de água transferido dos solos, oceanos e vegetação para a atmosfera (evaporação), a fim de permitir o uso eficiente da água.

No século XVII, no reinado de Luís XIV, iniciaram-se metodologias de medições de precipitação e evaporação. Nesse período foi feita medições de chuvas, evaporação e a vazão de água que passa por determinada seção (caudal) do rio Sena. Em 1802, John Dalton publicou no Memórias da Literary and Philosophical Society (Sociedade Literária e Filosófica), de Manchester, os quatro ensaios intitulados como "Ensaio Experimentais". Segundo Brutsaert (1982), os artigos publicados por Dalton, são os mais importantes para a teoria da evaporação, que resultaram na primeira equação de evaporação, descrita por:

$$E = f(\bar{u})(e_0 - e_a) \quad (1.1)$$

onde  $E$  é a taxa de evaporação,  $f(\bar{u})$  é a função em relação a velocidade média do vento,  $e_0$  é a pressão de vapor saturado na superfície em temperatura ambiente e  $e_a$  é a pressão de vapor no ar [1].

Na década de 20, foram iniciadas pesquisas sobre balanço de energia, sendo utilizado para estimar a evapotranspiração (ET), que é a perda de água do solo e das plantas (transpiração) para a atmosfera. A partir dos estudos de Schmidt e Anstrom em 1915 sobre radiação e evaporação de superfícies livre de água, pode-se avaliar como o saldo de radiação é usado para determinar os fluxos de calor sensível e calor latente. Neste sentido, no ano de 1926 foi desenvolvido o método da razão Bowen, onde relaciona o fluxo de calor sensível com o fluxo de calor latente para uma superfície líquida, em função dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água. [2] [3]

Em 1948 foi proposto o método de Thornthwaite para o cálculo da Evapotranspiração de Referência ( $ET_0$ ), técnica que depende unicamente da temperatura média do ar. O método foi desenvolvido para ambiente úmido, caso seja aplicado em ambientes de clima seco, o valor da  $ET_0$  ficará subestimado em torno de 40% [4].

No ano de 1971 foi apresentado por Camargo um modelo baseado em dados de  $ET_0$  de diversas localidades em condições de clima úmido. Sua formulação relaciona a temperatura média do ar e a radiação solar. Entretanto, este método empírico, tende a subestimar valores de  $ET_0$  em condições de aridez e superestimar em condições super-úmidas [5].

Em relação à determinação da evaporação e da ET por meio de aparelhos, podemos citar o tanque classe A e o lisímetro que são os mais usuais no Brasil para o controle de irrigação. O tanque classe A é recomendado pela FAO, apesar de ser um instrumento de medida simples e custo relativamente baixo. A utilização do tanque evapotranspirômetro apresenta algumas limitações, tais como: necessidade de dados de velocidade do vento na altura do tanque e dificuldades em realizar a leitura do nível de água, se a aquisição dos dados não for automatizada [6]. Quanto aos lisímetros, estes são os melhores equipamentos para medir de forma precisa e adequada a  $ET_0$  das culturas. Ele auxilia como referência para estudos de perdas de água em culturas,

porém sua implementação e operação são complexas e onerosas, tornando-se mais aplicável em condições experimentais [7].

Outro modo de medir a ET é por meio da turbulência atmosférica. Os estudos nesta área iniciaram com Kolmogorov em 1941, onde foi estabelecido características dos escoamentos turbulentos em sub-regiões da atmosfera. Em 1948 foi proposto por Montgomery a técnica de covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*), onde relaciona a turbulência atmosférica com as trocas de calor, massas de ar e momentum (quantidade de movimento – útil em meteorologia para compreender o tratamento físico-matemático do deslocamento do ar na atmosfera terrestre) de uma superfície plana horizontal e homogênea na baixa atmosfera. Porém, esta técnica potencial foi somente implementada após o desenvolvimento dos anemômetros sônicos, do qual permitiu que em 1955, Schotland desenvolvesse as equações básicas da *Eddy Covariance*. Este método também pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração real, especialmente em área agrícola. No entanto, este é um método complexo e restrito que necessita de mão de obra especializada para compreender e manusear os programas utilizados [8-9].

A partir da década de 90, com o desenvolvimento e disponibilização de sensores de análise de resposta rápida da concentração de dióxido de carbônico (CO<sub>2</sub>), vários centros técnico-científicos desenvolveram pesquisas por meio de sistemas mais modernos de covariância de vórtices turbulentos. Essas pesquisas eram compostas por anemômetros sônicos tridimensionais e analisadores de gases por infravermelho, este sistema detecta fluxos de vapor d'água, ou CO<sub>2</sub> por meio da espectroscopia no infravermelho [8]. Pesquisas relacionadas à medição de fluxos de CO<sub>2</sub> e vapor d'água têm aumentado nas últimas décadas, pois são consideradas as mais importantes transferências de massa entre a superfície e o ar adjacente, além de serem os dois principais elementos que causam o efeito estufa [9].

Além dos métodos descritos acima para estimar a evaporação e a ET<sub>0</sub>, numerosos métodos foram desenvolvidos nos últimos 50 anos por numerosos cientistas e especialistas em todo mundo. Estes métodos foram elaborados para estimar a evapotranspiração em diferentes tipos de culturas, sob diversas variáveis climáticas, sendo necessárias rigorosas calibrações locais. Diante das dificuldades de escolha do método mais adequado, em 1990 a *Food and Agriculture Organization* (FAO) das Nações Unidas consultou especialistas para revisar as metodologias

existentes e definir um método padrão para uma superfície de referência. O método selecionado foi o de Penman-Monteith [10].

A técnica de Penman-Monteith foi criada em 1965 por Monteith baseada nas equações de Penman. A adequação surgiu com a combinação do balanço de energia e os princípios aerodinâmicos. A componente aerodinâmica depende dos fatores da velocidade do vento, da temperatura, da umidade e da constante psicrométrica, que serve para determinar a quantidade de vapor na atmosfera. Os valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) fornecidos por meio desse método são consistentes em todas as regiões e climas [10].

## 1.2. Motivação

Segundo o relatório publicado pela UN-Water, caso não tenha mudanças na forma de consumo e gestão dos recursos hídricos, o déficit de água pode chegar a 40% em 2030. Em face do relevante valor que o uso eficiente da água tem, torna-se imprescindível mensurar o quantitativo de água transferido dos solos, oceanos e vegetação para a atmosfera.

Atualmente, há diversos métodos de medidas de evaporação e evapotranspiração, classificados em métodos diretos e indiretos. Dentre eles, podem-se elencar: lisímetro; balanço hídrico; controle da umidade do solo; tanque classe A; Penman-Monteith; constante de estrutura do índice de refração; e covariância de vórtice turbulentos [11].

Os métodos de medida citados acima apresentam limitações, tais como: alto custo; dificuldades de obtenção de dados meteorológicos e alta complexidade operacional. Por exemplo, o lisímetro tem uma alta precisão nas medidas, na ordem de 0,02 mm, porém sua construção exige um alto custo [12]. Outro exemplo é o método de Penman-Monteith que é o método padrão da FAO, porém requisita dados meteorológicos que não são facilmente obtidos [13].

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar uma nova técnica de medida de evaporação por meio do efeito do *Beam Wander* gerado pela turbulência atmosférica sobre um feixe óptico que seja de baixo custo. Ademais, o sistema

proporciona as seguintes vantagens: mensurar de forma mais distribuída à evaporação; maior mobilidade; e realização de medidas em tempo real.

### 1.3. Revisão Bibliográfica

Algumas pesquisas relacionadas à medição e monitoramento de evaporação e ET já foram publicadas. Por exemplo, medidas de concentração de vapor d'água foram feitas em uma floresta tropical utilizando o método de covariância de vórtices turbulentos com o emprego de sensores de resposta rápida. Os dados foram obtidos por meio de uma estação meteorológica durante 10 meses. Analisaram-se os padrões de variabilidade sazonal e o ciclo diurno dos fluxos de massa e energia e as variáveis meteorológicas, comparando com dados de anos anteriores, que foram obtidos em uma estação meteorológica que ficava distante, aproximadamente, 13 km da estação utilizada. Mediu a evaporação por meio de um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto utilizando a técnica da espectroscopia no infravermelho [14].

Outro experimento comparou métodos micrometeorológicos de medida de ET, tendo como referência valores obtidos com lisímetro. Os métodos utilizados foram de Thornthwaite–Holzman, balanço de energia (Relação de Bowen), sistema de Bowen e Penman–Monteith. Os resultados demonstraram que os métodos de Penman–Monteith, balanço de energia (Relação de Bowen), assim como o sistema de Bowen proporcionaram uma melhor estimativa da ET, ainda assim estes métodos baseiam-se nas incertezas da representatividade das medidas, na complexidade operacional e também na variabilidade espacial da superfície [15]. Seguindo na mesma linha, medidas de ET em cultivo de cafezais com deficiência hídrica foram feitas por intermédio do método de Bowen, enquanto para a transpiração foi usado o modelo de Penman-Monteith adaptado. Os resultados foram comparados com medidas de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor no caule [16].

Outra pesquisa realizou medições de evapotranspiração por meio da turbulência atmosférica, utilizando um cintilômetro. Esse instrumento mensura pequenas flutuações no índice de refração do ar, causadas pelas variações em temperatura, umidade e pressão, sendo sua magnitude caracterizada em termos de ( $C_n^2$ ), constante de estrutura do índice de refração. Os valores da  $C_n^2$  foram obtidos pelos métodos que medem a intensidade de flutuações e as mudanças de direção do

feixe óptico. Os resultados dos dois métodos foram comparados com métodos micro meteorológicos e um analisador sônico 3D. O LASER do cintilômetro utilizado tem um comprimento de onda de 473 nm e potência de 400 mW, distanciado a 72 m do receptor. Os dados foram adquiridos em um dia durante 5 horas. Os dados de ET obtidos foram calculados por três métodos: cintilômetro, covariância de vórtices turbulentos e o método de referência Penman-Monteith. Na análise dos resultados da ET foi identificado que o método da pesquisa com cintilômetro foi próximo do método de covariância de vórtices turbulentos, porém distante do método padrão de Penman-Monteith [17].

## 1.4. Organização da Dissertação

O trabalho foi organizado em duas partes: teórica e prática. A primeira parte apresenta os fundamentos teóricos sobre ET, turbulência atmosférica e a técnica de triangulação de potências, descritos nos capítulos 2 ao 4, que embasarão o leitor para a compreensão da parte experimental. A segunda parte apresenta a descrição do experimento, os resultados e discussões alcançados das medições de evaporação por meio da turbulência atmosférica, descrito no capítulo 5.

No Capítulo 1 discorre sobre a ET, detalhando sua definição, variáveis que a controlam e os métodos de medida mais utilizados. Ao final desse capítulo, mantém-se uma relação entre a ET com a turbulência atmosférica, por meio da constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$ .

Após a base conceitual apresentada sobre ET, o capítulo 2 expõe sobre a teoria dos fenômenos atmosféricos, restringindo-se a absorção, espalhamento e turbulência atmosférica. Este último fenômeno divide-se em: cintilação, deslocamento aleatório do feixe (*Beam Wander*) e o alargamento do feixe (*Beam Spread*). Tendo como finalidade permitir o conhecimento de suas definições e seus efeitos quanto à propagação de um feixe óptico.

O terceiro capítulo apresenta a técnica da triangulação de potências ópticas utilizada no experimento. Discorre neste capítulo o cálculo da posição instantânea do centro do feixe óptico e a relação entre o deslocamento do centro do feixe com a

constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$ . Permitindo assim a compreensão da técnica utilizada para a medição do fluxo de vapor d'água.

O capítulo 4 é subdividido em duas partes. Na primeira parte foram realizadas as medidas de caracterização do ebulidor; de turbulência atmosférica sem vapor d'água; e de turbulência atmosférica com vapor d'água. Na segunda parte foram efetuadas medidas de turbulência atmosférica a temperatura constante. No decorrer deste capítulo são analisados os resultados obtidos, embasados nos conceitos apresentados. Por último, é descrito a conclusão do trabalho, apresentando as perspectivas futuras e ideias a serem implementadas sobre o tema.

## **CAPÍTULO 2**

# **EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

A escassez dos recursos hídricos somado ao desperdício é um alerta sobre a necessidade do uso eficiente da água. Em junho de 2015, um levantamento global do Fundo das Nações Unidas para a Infância (Unicef) e da World Health Organization (WHO) revela que uma a cada três pessoas no mundo – cerca de 2,4 bilhões de indivíduos – não tem acesso ao saneamento básico, nem a água potável. Em 2050, esse número pode aumentar para mais de 3 bilhões de pessoas, dependendo do que for feito para minimizar a crise.

Nos países em desenvolvimento, o consumo de água deverá crescer significativamente em virtude do crescimento populacional, aliado à expansão industrial e agrícola. As atividades agrícolas correspondem a 70% do consumo mundial de água. Por isso o estudo da ET é de grande relevância para determinar a necessidade de água das culturas agrícolas, permite estimar a disponibilidade hídrica de uma região, sendo um importante dado para a ecologia vegetal e o planejamento agrícola.

A Evapotranspiração é um processo físico resultado do somatório da transpiração das plantas e a evaporação dos solos. Nesse capítulo serão vistos os conceitos relacionados às teorias da ET e as variáveis que a controlam. Esses conceitos facilitarão a compreensão dos métodos de medida de evapotranspiração [18-19].

## 2.1. Evaporação

A evaporação pode ser entendida como um processo físico que acontece quando as moléculas d'água absorvem energia e passam do estado líquido para o estado gasoso, portanto um processo de transformação de calor sensível em calor latente. O calor sensível provoca apenas uma variação de temperatura dos corpos, enquanto o calor latente muda à estrutura física dos mesmos.

A quantidade de energia para evaporar a massa de um grama de água, transformando o estado das moléculas da água do líquido para gasoso, denominada de Calor Latente de Evaporação ( $L$ ), é descrita como [13]:

$$L = 2497 - 2,37t \text{ [Jg}^{-1}\text{]} \quad (2.1)$$

onde  $t$  é a temperatura ambiente em °C.

Esse fenômeno ocorre em uma diversidade de superfícies, como solos, rios, oceanos, espelhos d'água (área ocupada por um corpo d'água - lago, lagoa, reservatório de barragem, açude etc.) e vegetação úmida. Para que ocorra a evaporação é necessário que a superfície evaporante obtenha energia, que pode ser fornecida pela radiação solar direta e a temperatura do ar. Além disso, para o vapor d'água ser transferido da superfície para a atmosfera é preciso que haja uma diferença de pressão entre as mesmas [13].

À medida que esse processo vai ocorrendo, o ar fica mais úmido e a quantidade de vapor que é transferido para a atmosfera vai diminuindo. A evaporação pode até mesmo cessar caso o ar fique saturado e não haja a circulação das massas de ar. Sendo assim, observa-se que a evaporação dependente de variáveis

meteorológicas como a radiação solar, temperatura, umidade do ar e intensidade do vento. Outros fatores que influenciam neste processo físico são: o sombreamento do dossel da cultura, chuvas frequentes, irrigação e a permeabilidade do solo [13].

## **2.2. Transpiração**

A transpiração é um processo biofísico pelo qual parte da água contida em um corpo é transferida para a atmosfera. Isso acontece devido uma elevação da temperatura interna ou externa do corpo, fazendo a água fluir para a superfície. Esse processo biofísico depende das condições climáticas, de forma semelhante com a evaporação. No caso das plantas, a transpiração acontece por meio da cavidade estomática (conjunto de células estruturais encontradas na superfície inferior das folhas, cuja função é permitir as trocas gasosas entre a planta e o ar atmosférico).

A transpiração nas plantas serve para a diminuição de sua temperatura e absorção de nutrientes do solo. Esta diminuição de temperatura evita o superaquecimento da planta pela absorção de energia quando ocorre a evaporação da água. O superaquecimento é causado pela incidência da radiação solar direta nas folhas das plantas ocasionando a desidratação, desencadeando a fotoinibição da fotossíntese e a morte da planta. Outra utilidade da transpiração nas plantas ocorre por meio das raízes, quando a planta absorve a água do solo juntamente com os nutrientes nela contido, estes são transportados e absorvidos por toda a planta [20-21-22].

## **2.3. Evapotranspiração**

A evapotranspiração é o somatório da evaporação de corpos d'água, solos e da transpiração das plantas que ocorre por meio das aberturas dos estômatos. Este conceito é subdividido em: evapotranspiração potencial, evapotranspiração de referência, evapotranspiração de cultura e evapotranspiração real.

### **2.3.1. Evapotranspiração Potencial (ET<sub>p</sub>)**

A evapotranspiração potencial é a estimativa da máxima perda de água na forma gasosa para a atmosfera de uma cobertura vegetal uniforme. Esta estimativa supõe uma quantidade hídrica suficiente para que ocorra a evaporação dos solos e a transpiração das plantas.

O conceito foi introduzido por Thornthwaite em 1944 e aperfeiçoado por Penman em 1956. A ET<sub>p</sub> leva em conta que a perda de água por evaporação, ou transpiração para a atmosfera, ocorre, exclusivamente, devido às condições atmosféricas sobre a vegetação, sem interferências das movimentações de massa de ar quentes ou úmidas, podendo ser calculado por fórmulas matemáticas teórica-empíricas [23]. Nessa época surgiu o método de Penman, no qual constitui de fórmulas desenvolvidas para diversas condições climáticas. Porém, para o desenvolvimento do método foram realizadas medições em diversos tipos de culturas. Sendo assim, carecia de um padrão de cultura de referência para a obtenção da ET<sub>p</sub> por questões normais de manejo [24].

### **2.3.2. Evapotranspiração de Referência (ET<sub>0</sub>)**

Na década de 1960, Monteith baseado nas equações de Penman, propôs um novo modelo que estimasse a ET, incluindo a resistência aerodinâmica e a resistência do dossel, extrato superior da vegetação, ao fluxo de vapor d'água. A partir disso, este conceito passou a se chamar de Evapotranspiração de Referência (ET<sub>0</sub>) [24].

### **2.3.3. Evapotranspiração de Cultura (ET<sub>c</sub>)**

A evapotranspiração de cultura é utilizado para definir a quantidade de água consumida por uma cultura sem restrição hídrica e em qualquer fase de seu desenvolvimento. Este conceito é semelhante a ET<sub>0</sub>, porém substituindo a grama por uma cultura qualquer e considerando a sua fase de desenvolvimento. Este conhecimento serve como base para projetos de irrigação. A determinação do consumo de água é essencial para a obtenção de maiores produtividades, redução de custos de produção e principalmente para a gestão eficiente do uso da água. A ET<sub>c</sub> pode ser calculada por meio da equação 2.2 [13]:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2.2)$$

onde  $K_c$  é o coeficiente de cultura (Figura 1).

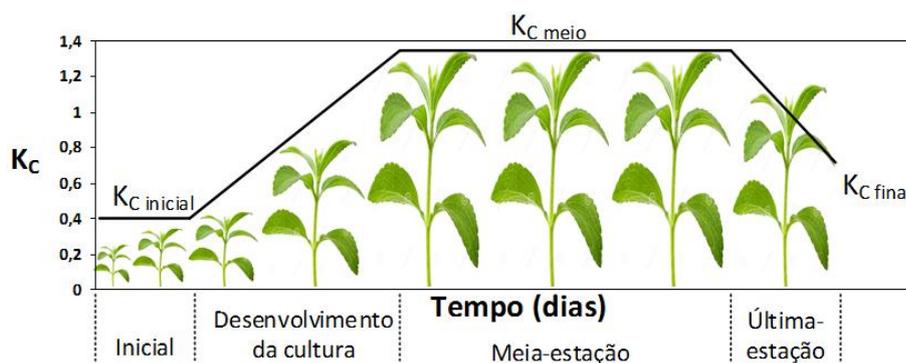


Figura 1: Curva aproximada do coeficiente de cultura.

### 2.3.4. Evapotranspiração Real (ET<sub>r</sub>)

É a quantidade total de água transferida para a atmosfera, sob quaisquer condições de vegetação e disponibilidade hídrica existente. Pode ser obtida a partir da ET<sub>c</sub>, contando com o fator de umidade do solo ( $K_s$ ), conforme demonstrado na equação 2.3 [13]:

$$ET_r = ET_c K_s \quad (2.3)$$

Este tipo de evapotranspiração é o mais adequado para uma aplicação do método proposto.

### 2.3.5. Variáveis que controlam a evapotranspiração

#### 2.3.5.1. Elementos meteorológicos

Radiação líquida ( $R_n$ ): É o saldo de radiação na superfície dado pela soma dos fluxos de radiação de ondas curtas e longas. As ondas curtas são caracterizadas pela radiação solar direta, enquanto as ondas longas são provenientes de elementos

terrestres, como as nuvens. Calcula-se a radiação pela equação 2.4, expresso em MJ/m<sup>2</sup>dia [20]:

$$R_n = (R_g - R_r) + (R_a - R_s) \quad (2.4)$$

onde  $R_g$  é a radiação de onda curta incidente (radiação global);  $R_r$  radiação de onda curta refletida pela superfície;  $R_a$  é a radiação de onda longa incidente, ou seja, emitida pela atmosfera e  $R_s$  é a radiação de onda longa emitida pela superfície.

Este elemento é a principal fonte de energia da ET e depende dos raios solares incidentes e da capacidade de reflectância da superfície vegetada.

Temperatura: A elevação da temperatura do ar provoca o aumento da energia cinética das moléculas de água e, conseqüentemente, aumenta a pressão de vapor do corpo d'água. Adicionalmente, quanto maior a temperatura do ar, maior será a quantidade de vapor d'água que pode ser contido na atmosfera, ou seja, aumentando a ET.

Umidade relativa do ar: Refere-se à quantidade de vapor d'água existente no ar, em relação a máxima quantidade de água que o ar pode absorver em uma temperatura específica. Sendo que, quanto maior a umidade relativa do ar, menor será a demanda evaporativa, ou seja, menor será a ET.

Pressão atmosférica: Com a diminuição da pressão atmosférica, a taxa de evaporação aumenta, pois as moléculas de água que evaporam ficam mais afastadas entre si do que em uma situação de maior pressão. Dessa forma, é preciso uma maior quantidade de moléculas de água para atingir a saturação.

Vento: O vento é responsável por realizar a troca de massas de ar, transportando o vapor d'água da superfície das plantas, lagos, rios, oceanos, evitando que o vapor d'água se condense e aumentando a capacidade evaporante desta superfície [20].

### 2.3.5.2. Fatores da planta

Espécie: Os aspectos morfológicos da planta como a distribuição espacial da folhagem, resistência interna da planta ao transporte de água, número, tamanho, e distribuição dos estômatos, influenciam diretamente na ET.

Albedo: É o fator associado ao percentual de reflectância da superfície vegetada, calculado pela razão entre os dados medidos de  $R_r$  e  $R_g$ . Quanto maior o albedo menor é a quantidade de energia absorvida pela planta, conseqüentemente a ET será menor.

Índice de área foliar (IAF): À medida que a planta cresce, a área foliar transpirante aumenta, influenciando no estágio de desenvolvimento e crescimento da cultura. Quanto maior o índice da área foliar maior será a superfície transpirante e assim maior será a ET. Este índice é definido pela razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo.

Altura das plantas: À medida que a altura da planta for maior, a interação com a atmosfera se torna mais eficiente e se torna mais suscetível às movimentações advectivas, absorvendo mais energia e sofrendo mais a ação dos ventos, aumentando a ET.

Profundidade das raízes: O tamanho das raízes tem relação direta com a porção de água absorvida do solo. As raízes mais curtas exploram menor volume do solo, em períodos de seca não conseguem absorver quantidade suficiente de água para atender sua demanda transpirativa. Dessa forma, a demanda evaporativa aumenta para raízes com profundidades maiores [20].

### 2.3.5.3. Umidade do solo

Os solos argilosos possuem maiores capacidades de armazenamento de água do que os solos arenosos. A maior capacidade de absorção de água permite manter por mais tempo a taxa de ET [22].

#### **2.3.5.4. Fatores de manejo da cultura e do solo**

Densidade de plantio: Quanto maior a densidade das plantas, maior é a disputa por água, fazendo as raízes crescerem mais para aumentar o volume de água disponível. Conseqüentemente, uma maior quantidade de água será evaporada.

Impedimentos físico-químico-biológico: As propriedades físicas (aeração, retenção de água, compactação, estruturação), químicas (reação do solo, disponibilidade de nutrientes e interações entre estes) e biológicas (teor de matéria orgânica, respiração, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, taxa de colonização e tipo de microrganismos) quando não adequadas, restringem a ET. Esses impedimentos físicos-químicos-biológicos limitam o crescimento e desenvolvimento das raízes, por conseguinte as plantas exploram um menor volume de água e nutrientes do solo, ocasionando em prejuízos nos períodos chuvosos e secos. Nos períodos chuvosos, o excesso de água pode causar a asfixia das raízes e nos períodos secos o volume de água disponível fica reduzido, dificultando o aumento de tamanho das raízes para absorver água, assim diminui a quantidade de água que é transpirada pelas plantas [20].

## **CAPÍTULO 3**

# **MÉTODOS DE MEDIDAS DIRETOS E INDIRETOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

A medição de evapotranspiração não é fácil de obter. Existem diversos métodos específicos, porém o custo elevado e o manejo técnico dificultam as medidas de ET. A partir do embasamento teórico do capítulo anterior, este capítulo descreve os métodos de medida mais utilizados. Dessa forma, pode-se ter uma base de comparação com a nova técnica de medida proposta que utiliza a turbulência atmosférica.

### **3.1. Métodos diretos**

#### **3.1.1. Lisímetro**

O lisímetro é uma estrutura construída para medir de forma precisa a precipitação, evaporação e drenagem, por meio de tanques enterrados no solo. Inicialmente foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos. Podem ser aplicados para medição da

evapotranspiração de forma muito precisa se bem instalados e preenchidos corretamente, pois as camadas de solo em seu interior devem se assemelhar ao máximo possível das camadas de solo da área externa. Porém, a medida direta de evapotranspiração por lisimetria é onerosa e difícil, justificando-se apenas em condições experimentais, com observações rigorosas das condições térmicas nas fronteiras que visam minimizar os efeitos advectivos, em especial em épocas de deficiência hídrica [25].

Neste sistema de controle, conhecido também como evapotranspirômetro, a medida da ET é obtida por meio do balanço hídrico, conforme a equação 3.1 [26]:

$$ET_0 = \frac{I + P - D}{A} \quad (3.1)$$

onde: I é a irrigação; P é a precipitação; D é a drenagem; e A é a área do lisímetro.

Há diferentes tipos de lisímetros, como o de drenagem, de pesagem e de nível de lençol freático constante.

Lisímetro de drenagem ou percolação (Figura 2): O tanque é enterrado e preenchido com o mesmo solo retirado para enterrá-lo, mantendo a mesma ordem do horizonte. No fundo, coloca-se uma camada de brita fina, coberta de areia grossa. A brita tem a finalidade de facilitar a drenagem da água, que percolou através do tanque. Do fundo sai um cano que conduzirá a água drenada até um recipiente graduado. Depois de instalado, planta-se nas caixas e na área circundante um vegetal que propicie uma boa cobertura do solo e mantenha em crescimento durante todo ano, como a “grama batatais” (*Paspalum notatum* Flugge).

Quando o lisímetro estiver instalado e com a vegetação cobrindo totalmente a superfície da caixa e da área adjacente, procede-se da seguinte maneira:

- 1) Toda a área da superfície é irrigada até que a água percole no recipiente de coleta, quando cessar a percolação o lisímetro poderá ser utilizado, dessa forma o solo apresenta teor de água na capacidade de campo, pois por gravitação a água foi drenada.

- 2) Após o período de 2 a 3 dias, a caixa do lisímetro deve ser novamente irrigada com um volume conhecido. Assim o valor da ET é dado pela equação 3.2 [27]:

$$ET = \frac{(I - D)}{A} \quad (3.2)$$

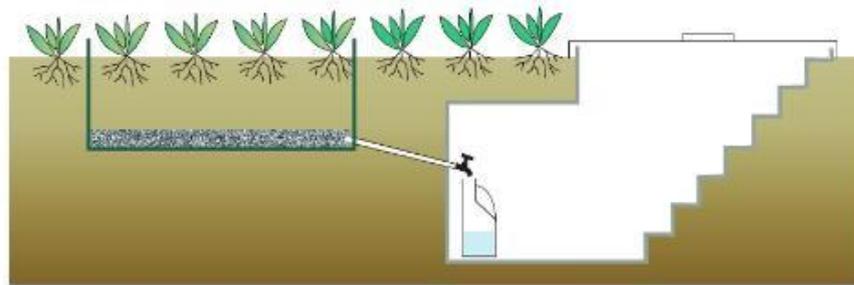


Figura 2: Esquema de um evapotranspirômetro de drenagem.

Lisímetro de pesagem: Este tipo de lisímetro calcula a ET por meio de um mecanismo de pesagem, que pode ser por balança mecânica, hidráulica, ou com sensores à variação de peso, conhecidos como sensores de carga, mostrado na Figura 3 [28].

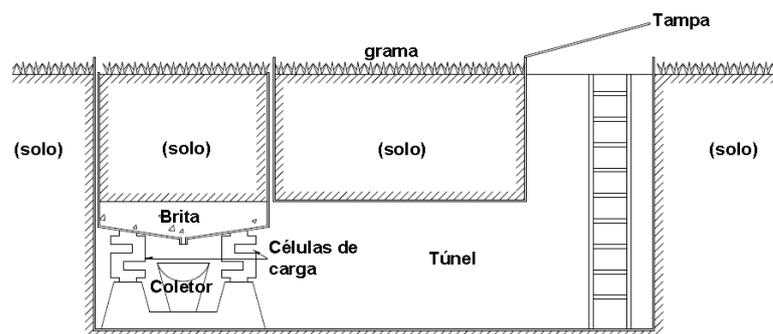


Figura 3: Esquema do lisímetro de pesagem.

Lisímetro de sub-irrigação (Figura 4): O funcionamento consiste em manter o nível freático na parte inferior do lisímetro. Quando ocorre a ET há um rebaixamento do nível freático, ocasionando o deslocamento de água na zona radicular por capilaridade. Essa perda de água é repostada por um dispositivo flutuador e a

quantidade de água para repor seu nível é medida de forma automática em um reservatório graduado [28].

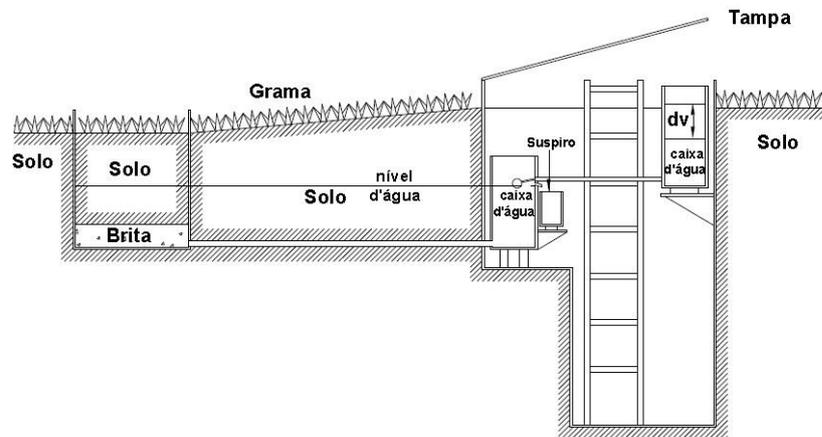


Figura 4: Esquema do lisímetro de sub-irrigação.

### 3.1.2. Balanço hídrico

O balanço hídrico relaciona as entradas e saídas de água em certa porção de solo (Figura 5) em determinado intervalo de tempo. O resultado do somatório de todas as entradas e saída é quantidade líquida de água que permanece disponível no solo para as plantas [29].

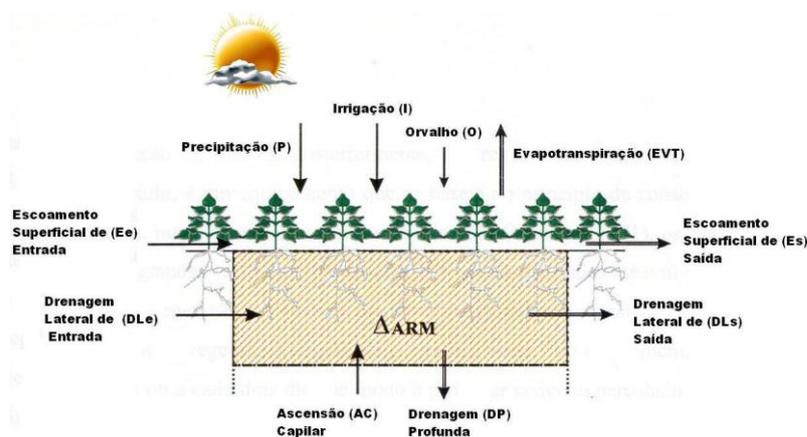


Figura 5: Componentes de entrada e saída de água em um volume de controle.

Essa grandeza pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\Delta ARM = (P + I + O + E_0 + DL_0 + AC) - (EVT + DP + E_s + DL_s) \quad (3.3)$$

onde: ARM é a variação do conteúdo de água no solo; P é a precipitação; I é a irrigação; O é o orvalho;  $E_0$  é o escoamento superficial de entrada;  $DL_0$  é a drenagem lateral de entrada; AC é a ascensão capilar; EVT é a evapotranspiração; DP é a drenagem profunda;  $E_s$  é o escoamento superficial de saída; e  $DL_s$  é a drenagem lateral de saída.

O balanço hídrico é fundamental para avaliar as variações do nível de água subterrânea, a ecologia das paisagens e o papel de um ecossistema. Além disso, permite mensurar e analisar os efeitos das estiagens e enchentes, considerando a interação existente entre a atmosfera, o solo, a vegetação e o ciclo de água [30].

Essas relações controlam os recursos hídricos disponíveis nos lugares, conseqüentemente influenciam no grau de desenvolvimento nessas áreas e regulam as atividades antrópicas e sua ocupação pelo homem.

### 3.1.3. Controle da umidade do solo

O valor da evapotranspiração é possível encontrar realizando sucessivas medidas de umidade do solo na ausência de precipitação e/ou irrigação. A variação do armazenamento de água para um determinado perfil de solo ( $\Delta W$ ) em mm pode ser expresso pela equação 3.4 [31]:

$$\frac{\Delta W}{t} = ET + P_p \quad (3.4)$$

onde: ET é a evapotranspiração (mm/dia);  $P_p$  é a percolação (mm/dia); e t é o tempo.

## 3.2. Métodos indiretos

### 3.2.1. Tanque Classe A

É um método bastante utilizado para estimar a ET em nível mundial e recomendado pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

O processo físico de evaporação de uma superfície de água em contato livre com a atmosfera e uma superfície vegetada, sob as mesmas condições meteorológicas, é o mesmo, apesar da quantidade de água perdida na superfície não vegetada ser maior. Isto permite relacionar a ET<sub>p</sub> com a evaporação de um tanque por meio de coeficientes, conforme equação 3.5 [32]:

$$ET_0 = EV_A K_P \quad (3.5)$$

onde:  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $EV_A$  é a evaporação no tanque classe A ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ); e  $K_P$  é o coeficiente de conversão da evaporação do tanque classe A.

O tanque tem forma circular com diâmetro de 121 cm e 25,5 cm de altura, constituído de chapa de aço ou ferro galvanizado, pintado na cor de alumínio e instalado em um estrado de madeira a 15 cm da superfície do solo, pintado de branco. Deve ser preenchido com água limpa cerca de 5 cm da borda superior, sendo que o mínimo é 7,5 cm contando a partir da borda.

A medição da taxa de evaporação é realizada com auxílio de uma ponta limnimétrica apoiada em um tranquilizador, sendo o resultado das mudanças de nível de água no tanque.

Este método se não tomar uma série de medidas de manutenção, o tanque classe A pode apresentar vários problemas, dentre eles: contaminação da água por material em suspensão no ar, formação de algas, desenvolvimento de larvas e consumo de água por animais. Além disso, devido o material que é feito e as condições onde é exposto (material metálico e exposição solar), há uma excessiva perda de água por evaporação.

Se realizado a manutenção da água nos níveis aconselhados, evita erros da ordem de 15% do valor definido. A renovação da água impede erros que superem a 5% dos valores determinados por evitar a turbidez.

Na Tabela 1 são apresentados os valores de  $K_p$  para diferentes condições de umidade relativa do ar, vento e local de instalação do tanque. Todos os valores são abaixo de um [33].

**Tabela 1: Valores do coeficiente para o Tanque Classe A ( $K_p$ ) para diferentes condições de umidade relativa do ar, vento e local de instalação do tanque. Obs.: Reduzir  $K_p$  em 20% para locais quentes e ventosos e em 5 a 10% para condições moderadas de vento, temperatura e umidade relativa, em áreas extensas de solo nú e arado.**

UR média (%)	Vento(km d <sup>-1</sup> )	Tanque instalado em área gramada			Bordadura de solo nú (m)	Tanque instalado em solo nú		
		<40	40-70	>70		<40	40-70	>70
LEVE < 175	Bordadura de grama (m)							
	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
MODERADO 175-425	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
FORTE 425 - 700	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
MUITO FORTE >700	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55
	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

O  $K_p$ , em áreas gramadas, também pode ser obtido pela seguinte equação:

$$K_p = 0,108 - 0,000331V + 0,0422Ln(Bord) + 0,1434Ln(UR) - 0,000631Ln(Bord)^2Ln(UR) \quad (3.6)$$

onde: V é a velocidade do vento (km d<sup>-1</sup>); Bord é a bordadura do tanque (m); e UR é a umidade relativa (%).

### 3.2.2. Método de Penman-Monteith (Padrão FAO)

Em 1948, Penman publicou a equação para a estimativa da  $ET_p$ , sem levar em consideração a resistência da superfície para a transferência de vapor d'água. Posteriormente, Monteith tendo como referência a equação de Penman, elaborou uma equação envolvendo a resistência aerodinâmica e do dossel ao fluxo de vapor d'água, chamando-se equação de Penman-Monteith.

Essa equação determina diretamente a  $ET_c$  sem necessitar aplicar o coeficiente de cultura ( $K_c$ ), já citado no item 2.3.3. A Figura 6 apresenta o conjunto de resistências à transferência de vapor d'água da superfície para a atmosfera, sendo a resistência da cobertura denominada por  $r_s$ , formada pelas resistências dos estômatos, cutícula e do solo, e a resistência aerodinâmica por  $r_a$  [33].

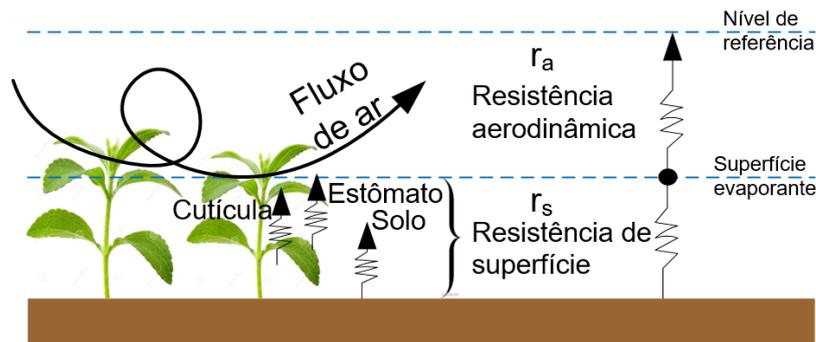


Figura 6: Resistências que controlam a transferência de vapor d'água para a atmosfera.

A equação é dada por:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (\epsilon_s - \epsilon_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3.7)$$

onde:  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $R_n$  é a radiação líquida na superfície das culturas ( $\text{MJ m}^2\text{dia}^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^2\text{dia}^{-1}$ );  $t$  é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $u_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $\epsilon_s$  é a pressão da saturação de vapor (kPa);  $\epsilon_a$  é a pressão de

vapor atual (kPa);  $\Delta$  é a inclinação da curva da pressão de vapor vs temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>); e  $\gamma$  é a constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

O modelo em questão exige dados de entrada que dificultam sua aplicação, pois são informações meteorológicas que não estão disponíveis em determinadas regiões. Para isso, faz-se o uso de equações simplificadas ou empíricas, essa adaptação tem como consequência a perda de informações da realidade física, compensada ou substituída por correspondências estatísticas originárias de experimentos de campo.

### 3.2.3. Método de Covariância de Vórtices Turbulentos

O método de Covariância de Vórtices Turbulentos, ou *Eddy Covariance* (EC), é um método matemático para determinar fluxos turbulentos. Este é um dos métodos micrometeorológicos mais utilizados para estimar fluxos da superfície. A técnica mensura a relação de substituição entre o CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e o calor sensível no ecossistema [8]. No Brasil, essa técnica tem sido empregada com sucesso em medições na floresta Amazônica, cerrados, cultivos de cana-de-açúcar, arroz etc [9].

A princípio, a metodologia era usada apenas para mensurar fluxos de vapor d'água, de calor sensível e de momentum. No entanto, na década de 90, com o desenvolvimento e disponibilidade de sensores de análises de resposta rápida, passou-se a determinar se um ecossistema em particular é uma fonte ou um dreno de carbono [34].

O método apresenta limitações importantes devido às condições de estabilidade atmosférica, pois necessita que os instrumentos sejam instalados na área da camada limite turbulenta, cujo fluxo é aproximadamente constante com a altura [35]. Além disso, para alcançar uma medida mais exata com este método, deve-se medir de forma precisa a pressão, a temperatura do ar e a velocidade do vento para diferentes níveis de altitude [13].

Por meio do método de Eddy Covariance é possível calcular o fluxo sensível da superfície  $H$  [36]. O valor de  $H$  (W/m<sup>2</sup>) é dado pela seguinte equação:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad (3.8)$$

onde  $\rho$  é a densidade de ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_p$  o calor sensível,  $w$  a velocidade do vento (m/s) e  $T$  a temperatura (K).  $\rho$  é obtido pela equação:

$$\rho = \frac{P}{R_h T} \quad (3.9)$$

onde  $P$  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:

$$R_h = \frac{R_d}{1 - \left(q \frac{P_{Sat}}{P}\right) \cdot \left(1 - \frac{R_d}{R_v}\right)} \quad (3.10)$$

onde  $R_d$  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  $P_{Sat}$  pressão de saturação de vapor, definido por:

$$P_{Sat} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5t_c}{t_c+273,3}} \quad (3.11)$$

onde  $t_c$  é a temperatura em °C.

### 3.2.4. Método da Constante de Estrutura do Índice de Refração

Além do método de covariância de vórtices turbulentos, outra forma possível de calcular a ET por meio da turbulência atmosférica é através da constante de estrutura do índice de refração ( $C_n^2$ ). Por meio dessa constante, pode-se calcular o fluxo de calor latente, desde que alguns dados meteorológicos adicionais sejam adquiridos.

As flutuações do índice refração atmosférico são causadas pelos gradientes de temperatura ou perturbações como a presença de vapor d'água. A propagação do

feixe laser no espaço livre produz um espalhamento angular no campo distante devido à difração, na ordem de  $\lambda/D$ , onde D é o diâmetro do feixe. No entanto, um feixe óptico finito experimentará desvios à medida que se propaga, ocasionando uma maior dispersão do feixe devido à inhomogeneidade da atmosfera, por isso os centros instantâneos (*hot spot*) são aleatoriamente deslocados no plano do receptor, produzindo o que é chamado *beam wander*. Este fenômeno pode ser caracterizado estatisticamente pela variância da magnitude do deslocamento ( $C_n^2$ ) do *hot spot*.

A constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$  pode ser escrito com as constantes de estrutura de temperatura  $C_T^2$  e umidade  $C_q^2$  e o termo covariante  $C_{Tq}$ , conforme equação 3.12 [37]:

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 + \frac{A_T A_q}{T q} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 \quad (3.12)$$

onde  $A_T$  e  $A_q$  são quantidades dependentes do comprimento de onda, da média de temperatura (T, K), umidade (q) e pressão atmosférica (P, hPa).

Para o comprimento de onda do infravermelho, essas quantidades são dadas por [38]:

$$A_T = -0,776 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \quad (3.13)$$

$$A_q = -47 \times 10^{-6} q \quad (3.14)$$

Assim, o primeiro termo da equação (3.12) contém  $C_T^2$ , cujo valor é maior do que os outros dois termos. A constante de estrutura de temperatura  $C_T^2$  pode então ser derivada da constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$ , dada por [39]:

$$C_T^2 = C_n^2 \left( \frac{-0,78 \times 10^{-6} P}{T^2} \right)^{-2} \left( 1 + \frac{0,03}{\beta} \right)^{-2} \quad (3.15)$$

onde  $\beta$  é a razão de *Bowen*, que relaciona a temperatura com a umidade pela razão entre o calor sensível com o calor latente ( $\beta = H/\lambda E$ ). 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 a escala de temperatura  $T^*$ :

$$C_T^2 = T^{*2} (z - d)^{-2/3} f_h \left( \frac{z - d}{L_0} \right) \quad (3.16)$$

onde  $z$  é a altura a partir do plano zero e  $d$  é o deslocamento a partir do plano zero.

Os termos de temperatura e umidade estão associados com a constante  $C_n^2$ . As mudanças máximas na constante da estrutura do índice de refração aparecem quando a umidade alcança seu máximo valor e quando a mudança de temperatura é mínima. Isto significa que  $C_n^2$  é modificado pelo gradiente de temperatura. Além disso, as flutuações de turbulência são influenciadas pelo índice de refração, que é dependente da umidade e da temperatura.

O deslocamento da equação 3.16 pode ser calculado por:

$$d = 0,67h_{veg} \quad (3.17)$$

onde  $h_{veg}$  é a altura da vegetação.

Na equação 3.16  $f_h$  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 [38]:

$$f_h \left( \frac{z - d}{L_0} \right) = 4,9 \left( 1 + 2,2 \frac{z - d}{L_0} \right)^{2/3} \quad (3.18)$$

$L_0$  é o comprimento de Monin–Obukhov que exprime a relação entre os fluxos turbulentos, sendo um de origem mecânica e o outro de origem convectiva. Este comprimento é utilizado para avaliar o grau de estabilidade atmosférica e pode ser escrito por:

$$L_0 = \frac{u^{*2}T}{kgT^*} \quad (3.19)$$

onde  $k$  é a constante de Von Karman no valor de 0,41,  $g$  é a gravidade no valor de  $9,81 \text{ ms}^{-2}$  e  $u^*[\text{ms}^{-1}]$  é a velocidade de fricção, dado por:

$$u^* = \frac{ku}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \psi} \quad (3.20)$$

onde  $u$  é a velocidade do vento e o comprimento da rugosidade da superfície dado pela equação 3.21:

$$z_0 = 0,1h_{veg} \quad (3.21)$$

Na equação 3.20 pode ser calculado o valor de  $\psi$ , que é a função de correção de estabilidade dependendo de  $z/L_0$  que é definido como segue [40–42]:

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

$$\psi\left(\frac{z-d}{L_0}\right) = 2\ln\left[\frac{1+x}{2}\right] + \ln\left[\frac{1+x^2}{2}\right] - 2\arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (3.22)$$

com:

$$x = \left( 1 - 16 \frac{z - d}{L_0} \right) \quad (3.23)$$

Uma vez conhecido  $T^*$  e  $u^*$ , o calor sensível  $H$  pode ser obtido da equação 3.24:

$$H = - \rho c_p u^* T^* \quad (3.24)$$

Por meio da relação entre a radiação líquida e o calor latente é possível encontrar meios mais eficientes do uso da água em um cultivo. O valor do fluxo do calor latente ( $\lambda E$ ), evapotranspiração, pode ser calculado com o balanço de energia residual demonstrado pela equação 3.25. [36]:

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (3.25)$$

onde  $R_n [Wm^{-2}]$  é a radiação líquida e  $G [Wm^{-2}]$  é o fluxo de calor do solo.

## **CAPÍTULO 4**

# **EFEITOS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**

Após ser apresentado a teoria e os métodos de medidas da ET, este capítulo tem por objetivo expor os três principais fenômenos atmosféricos que degradam o sinal de um enlace óptico: absorção, espalhamento e turbulência atmosférica. Dessa forma o leitor poderá compreender melhor os efeitos na propagação de ondas eletromagnéticas, que estão relacionados com os resultados das medidas de evaporação [43].

### **4.1. Absorção**

Ocorre quando um fóton de radiação é absorvido por moléculas gasosas da atmosfera e convertido em energia cinética. Conseqüentemente, a absorção é um mecanismo que causa o aquecimento da atmosfera. A absorção atmosférica tem uma forte relação com o comprimento de onda. O vapor d'água, juntamente com o oxigênio e o ozônio correspondem a maior parte dos 19% da radiação solar absorvida pela atmosfera, conforme verificado na Figura 7 [44].

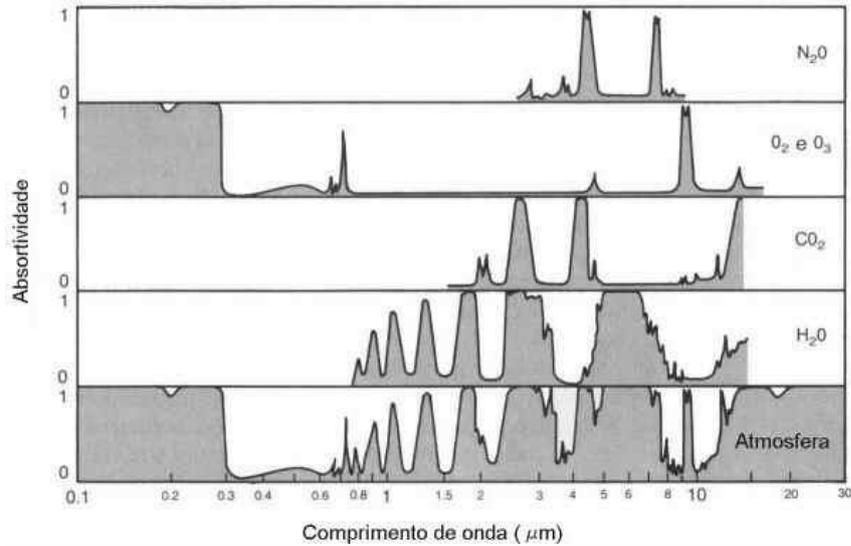


Figura 7: Absortividade de gases da atmosfera por comprimento de onda.

Os átomos e moléculas são caracterizados pelos seus índices de refração. A parte imaginária do índice de refração,  $k$ , é relacionada com o coeficiente de absorção,  $\alpha$ , pela seguinte equação [45]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad (4.1)$$

Onde:

$N_a$  – constante de Avogadro;

$\sigma_a$  – seção transversal de absorção [ $\text{cm}^2/\text{moléculas}$ ]; e

$\lambda$  – comprimento de onda [cm].

Com base na Lei de Beer-Lambert é possível definir a absorção como [45]:

$$I = I_0 \exp(-\sigma_a L N_a) \rightarrow A = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \sigma_a L N_a \quad (4.2)$$

$I$  – Intensidade da luz transmitida;

$I_0$  – Intensidade da luz recebida; e

$L$  – distância que a luz percorre [cm].

## 4.2. Espalhamento

O espalhamento acontece quando a radiação eletromagnética que se propaga no espaço livre encontra obstáculos da ordem, ou inferior ao comprimento de onda. Se a radiação interage com um átomo, o átomo pode ser excitado para um nível de energia e quase imediatamente (em uma escala de tempo de nanosegundos), o átomo cai para seu nível original e emite um fóton da mesma frequência.

Este fenômeno pode ser compreendido como um redirecionamento, ou redistribuição de luz, que pode resultar em uma redução significativa da intensidade de luz no receptor. O tamanho físico das partículas que a luz atravessa define o tipo de espalhamento [45].

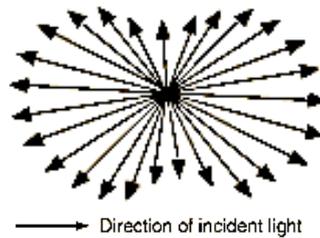
### 4.2.1. Espalhamento de Rayleigh

O espalhamento de Rayleigh (Figura 8) refere-se à dispersão da radiação eletromagnética causada por partículas com comprimento de onda menores que o fóton espalhado. Nesse tipo de espalhamento, a irradiância monocromática espalhada é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda, motivo pelo qual o céu é visto na cor azul. A luz azul ( $\lambda \cong 0,425\mu$ ) possui um comprimento de onda menor do que o vermelho ( $\lambda \cong 0,625\mu$ ). Por isso, a luz azul é mais espalhada que a luz vermelha e as demais cores que possuem maior comprimento de onda, como o verde, amarelo e laranja. Apesar da luz violeta ( $\lambda \cong 0,405\mu$ ) possuir menor comprimento de onda do que a luz azul, a energia da radiação solar contida no violeta é muito menor do que no azul. Além disso, o olho humano é mais sensível à luz azul que à luz violeta. Todos esses motivos explicam porque o céu é visto em azul e não em violeta [46].

A intensidade de luz não polarizada espalhada devido ao espalhamento de Rayleigh para uma partícula individual é dada por [46]:

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \quad (4.3)$$

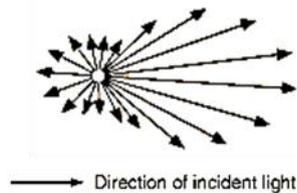
Onde R é a distância à partícula,  $\theta$  é o ângulo de dispersão, n é o índice de refração da partícula e d é o diâmetro da partícula.



**Figura 8: Espalhamento de Rayleigh.**

#### 4.2.2. Espalhamento Mie

O espalhamento Mie, como demonstrado na Figura 9, é predominante para partículas com dimensões maiores do que o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. Este espalhamento produz uma forma similar ao lóbulo de irradiação de uma antena, quanto maior a partícula, mais intensa é o lóbulo principal (Figura 10) [45]:



**Figura 9: Espalhamento Mie**



**Figura 10: Espalhamento Mie para partículas mais largas.**

O espalhamento descrito não depende do comprimento de onda. Quando muitas partículas estão presentes no ar, o espalhamento produz um brilho quase branco em volta do Sol e também na presença de nevoeiro ou neblina [45].

#### 4.3. Turbulência Atmosférica

Na atmosfera há diferentes micro-camadas com diferentes temperaturas, que são deslocadas e entrelaçadas pelo vento e pelas correntes de convecção. Essa mistura cria gradientes de micro-temperaturas, que são chamados de células de turbulência, com temperaturas, densidade e índices de refração levemente diferentes.

O movimento aleatório dessas células influencia na propagação do sinal óptico. Dessa forma, a turbulência atmosférica gera três efeitos sobre o feixe de luz: a cintilação, deslocamento aleatório do feixe, conhecido como “*Beam Wander*” e o alargamento do feixe, comumente chamado “*Beam Spread*”. Estes fenômenos estão relacionados ao tamanho das células de turbulência encontradas na atmosfera.

A caracterização da turbulência atmosférica faz por meio da determinação da Constante de Estrutura para o índice de Refração ( $C_n^2$ ). Esta constante altera durante o dia, oscila entre  $10^{-12}m^{-2/3}$  e  $10^{-17}m^{-2/3}$ , primeira nos períodos de maior insolação e o segundo no período noturno. O coeficiente também depende da altitude, seu valor diminui à medida que se afasta de superfícies aquecidas. O gráfico relacionando o perfil de turbulência com altitudes variando do solo até 10.000 metros é demonstrado na Figura 11. A taxa de variação do  $C_n^2$  com a altitude  $h$  é de  $h^{-4/3}$ . Próximo ao solo o  $C_n^2$  está entre  $10^{-13}m^{-2/3}$  e  $10^{-14}m^{-2/3}$ , enquanto a altitudes maiores que 10.000 metros é reduzido para  $10^{-20}m^{-2/3}$  [35].

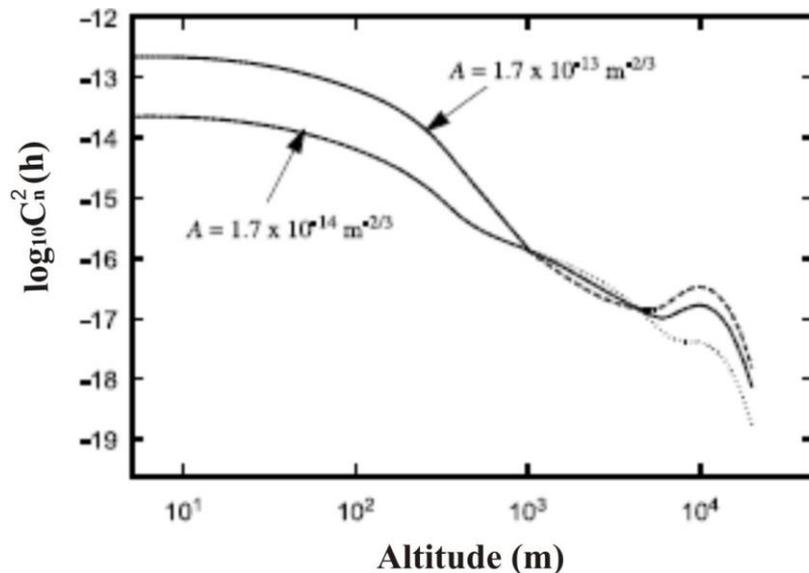


Figura 11: Variação de  $C_n^2$  com a altitude.

#### 4.3.1. Cintilação

Este fenômeno acontece quando as células de turbulência presentes no ar, no caminho da propagação da radiação eletromagnética, são menores que o diâmetro do feixe óptico, causando perturbações na frente de onda, devido à refração e difração do feixe. Como consequência, os componentes da frente de onda chegam ao receptor em tempos diferentes, ocasionando interferências construtivas e destrutivas. Como

resultado, surgem flutuações temporais na intensidade do sinal no receptor, conforme ilustrado pela Figura 12 [47].

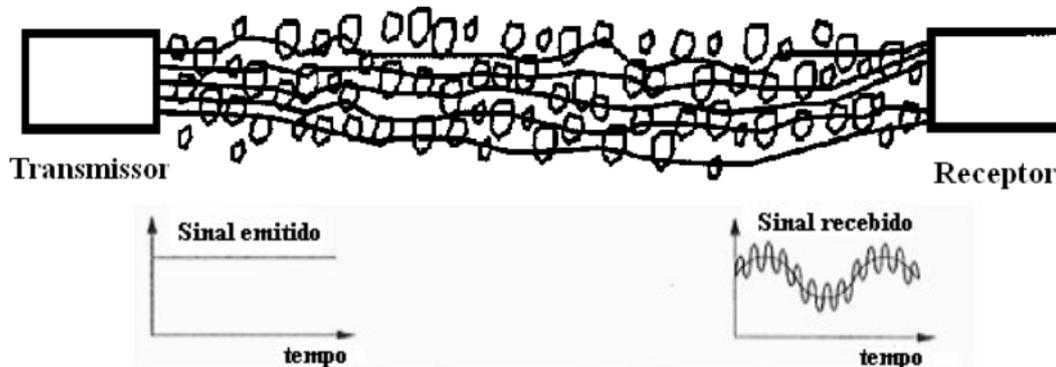


Figura 12: Efeitos provocados por pequenos bolsões de ar.

Um exemplo da cintilação atmosférica é conhecido como miragem, onde imagens de lagos são vistos em desertos, ou asfaltos com alta temperatura. Outro exemplo são as variações do brilho das estrelas produzido pelas distorções ora construtivas ora destrutivas na frente de onda, dando a impressão das estrelas estarem piscando.

A turbulência atmosférica causa flutuações da irradiância no sinal recebido. Dessa forma, a cintilação provocada pela turbulência atmosférica pode ser medida com base na variância normalizada das flutuações da irradiância recebida, calculada em termos do índice de cintilação ( $\sigma_I^2$ ) [31]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (4.4)$$

Onde  $I$  representa a irradiância normalizada do feixe óptico e o símbolo  $\langle \dots \rangle$  denota a média conjunta.

A intensidade de flutuações de uma onda plana em condições de “fraca turbulência” é calculada pelo método de Rytov, onde a variância da cintilação do sinal recebido é dada por [31]:

$$\sigma_I^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (4.5)$$

Onde,  $C_n^2$  é a constante de estrutura do índice de refração,  $k$  é o número de ondas e  $L$  é o comprimento do enlace em metros [31].

### 4.3.2. Deslocamento aleatório do feixe (*Beam Wander*)

Este fenômeno, também conhecido como divagação do feixe, acontece quando a luz passa por uma região onde as células de turbulência possuem diâmetros maiores do que o diâmetro do feixe ( $w$ ). Este efeito é caracterizado pela variação do centro do feixe, ao longo do eixo central de propagação. A expressão para calcular a variância radial do *Beam Wander* é dada por [47]:

$$\sigma_r^2 = 1,90C_n^2(2w)^{-1/3}L^3 \quad (4.6)$$

A Figura 13 (a) apresenta o feixe LASER sob a influência das células de turbulência e a Figura 13 (b) demonstra as variações dos centros instantâneos do feixe no plano do receptor.

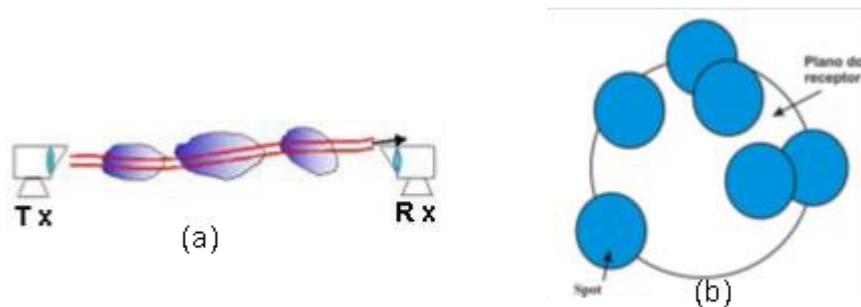


Figura 13: Efeito *Beam Wander* sobre a propagação da luz (a). Alteração da posição do spot de luz no receptor (b).

### 4.3.3. Alargamento do feixe (*Beam Spread*)

O alargamento do feixe ocorre quando o feixe luminoso atravessa um meio turbulento e seu raio efetivo é aumentado. A distância desse raio é a medida do ponto de maior intensidade até o ponto em que a potência diminui de um fator de  $1/e$ . Este efeito gera uma diminuição da densidade de potência óptica no receptor, pois a densidade varia inversamente com o raio. Dessa forma, as oscilações completamente aleatórias do canal de comunicação causadas por esse efeito, faz com que haja uma queda de intensidade na recepção, uma vez que a densidade de potência diminui com o aumento da área efetiva [48].

## CAPÍTULO 5

# TÉCNICA DE TRIÂNGULAÇÃO DE POTÊNCIAS

O capítulo anterior expôs a teoria que serve como base para compreensão da técnica de triangulação de potências ópticas. Foram abordados os principais efeitos atmosféricos que ocorrem na propagação do sinal óptico com ênfase na turbulência atmosférica. Além disso, discorre sobre a teoria envolvendo a constante de estrutura do índice de refração e sua relação com o *Beam Wander*.

Neste capítulo, será apresentada a técnica para medição de turbulência atmosférica em enlaces ópticos horizontais no espaço livre. Descrevem-se o histórico do arranjo experimental, a análise qualitativa e quantitativa, o cálculo da posição instantânea do centro do feixe óptico e a relação entre a alteração desta posição e a constante de estrutura do índice de refração ( $C_n^2$ ).

### 5.1. Histórico

As medições desse trabalho foram realizadas mediante o arranjo experimental originalmente desenvolvido em 2009 e 2011, com o propósito de mensurar a turbulência atmosférica em enlaces ópticos horizontais no espaço livre. Esta mensuração foi executada por meio do efeito da divagação do feixe para

validar a técnica que determina o centro do feixe óptico, a partir da técnica da triangulação de potência.

Os experimentos simularam o movimento do feixe em presença de turbulência atmosférica, por meio de deslocamento horizontal e vertical do anteparo em relação à fonte de LASER, porém as medidas continham erros devido aos desvios dos parafusos micrométricos utilizados no arranjo [49]. Para resolver essa questão, foi desenvolvido um sistema automatizado para a translação do LASER ao invés do anteparo com os fotodetectores, movimentando de forma contínua e não mais em estágios, por meio de um motor de passos ligado ao receptor [50]. O movimento do motor de passos tem uma frequência aproximada de 3Hz, relativamente menor ao Beam Wander de 200Hz. Após o primeiro experimento, os fotodiodos foram substituídos por outros mais sensíveis aos movimentos (ANEXO A) e que possuem menor ruído à iluminação do laboratório, pois a sensibilidade espectral é centrada em 880nm.

Em 2014, com base desse arranjo experimental, foram reelaborados quatro arranjos experimentais, com o objetivo de realizar medidas reais de turbulência atmosférica, contando com um sistema de transmissão e outro de recepção, sendo diferenciados pelas distâncias dos aparatos e as condições da propagação da luz. O primeiro arranjo foi montado com o auxílio de um alto falante, espelho e gerador de sinais, o objetivo é verificar a resposta às oscilações do feixe provocadas por turbulências atmosféricas em frequências próximas às encontradas na natureza. O gerador de sinais excitava o alto falante fazendo vibrar o espelho na mesma frequência da função gerada. O segundo arranjo foi aumentado a distância entre transmissor e receptor de 0,89 m para 3 m, a fim de verificar as dificuldades de alinhamento com o aumento da distância, mensurar o ruído da recepção devido ao conjunto colimador-expansor, analisar a forma da gaussiana, calibrar o apontador LASER para alinhamento grosso do sistema e verificar ruído na ausência de turbulência. Este experimento serviu de base para realizar as medidas com o terceiro e quarto arranjo, aquele foi feito alterando a distância de metros para dezenas de metros, simulando turbulência em um ambiente fechado, INDOOR, com uma pistola de ar quente e este, foi realizada a medida OUTDOOR, para o levantamento do perfil de turbulência para os dias das medidas [48].

## 5.2. Análise qualitativa

Conforme visto no capítulo anterior, a radiação eletromagnética ao atravessar a atmosfera pode sofrer alterações devido aos diversos fenômenos atmosféricos, entre eles a turbulência atmosférica. Este fenômeno ocasiona três tipos de efeitos: a cintilação, o alargamento do feixe e o deslocamento aleatório do feixe (*Beam Wander*). Neste trabalho é mais relevante o efeito do *Beam Wander*, pois os demais efeitos não apresentam elementos que auxiliem na técnica neste momento empregada.

A técnica foi desenvolvida utilizando o arranjo representado na Figura 14. Este arranjo consiste de um LASER, realizando a função de transmissor e um anteparo com quatro fotodetectores assumindo a função de receptor. O feixe óptico atravessa a atmosfera e projeta-se no anteparo no formato de um spot circular com distribuição gaussiana, conforme ilustrado na Figura 15 [48].

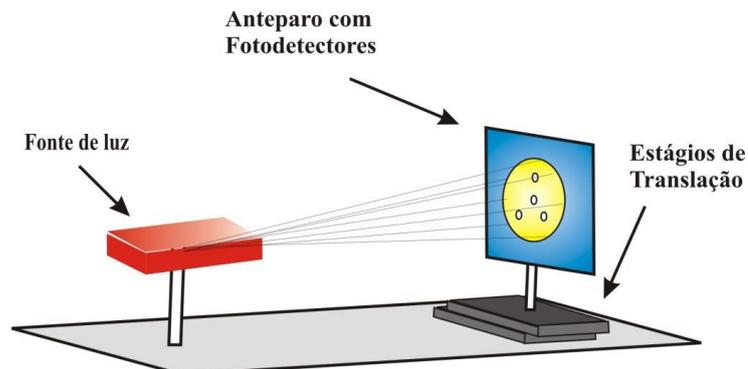


Figura 14: Arranjo contendo 4 fotodetectores em um anteparo.

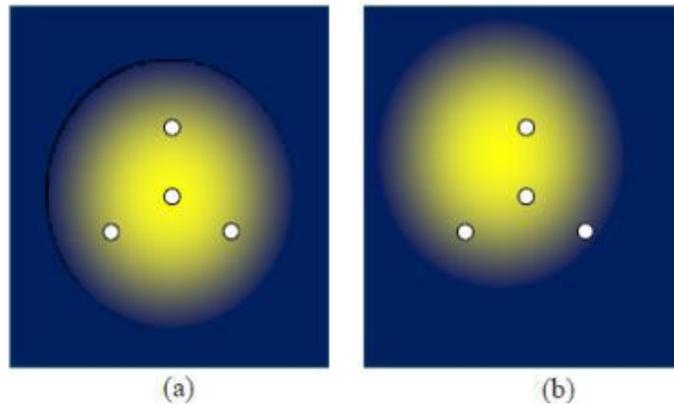


Figura 15: Posição da Gaussiana no momento  $t_0$  (a); Posição da Gaussiana no momento  $t_1$  (b).

Os quatro fotodetectores estão distribuídos da seguinte forma: três posicionados de forma a constituírem os vértices de um triângulo equilátero e o quarto fotodetector no centro de simetria do triângulo (Figura 16).

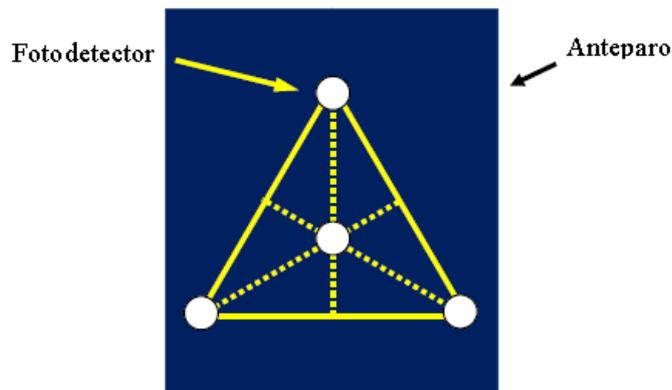


Figura 16: Anteparo com os fotodetectores dispostos na forma de um triângulo equilátero.

A energia transmitida pelo feixe LASER é absorvida pelos fotodetectores e transformada em corrente elétrica. Para tratar os sinais elétricos, há na recepção um conjunto de dispositivos que realizam a calibração e o tratamento dos dados dos fotodetectores.

A partir dos conhecimentos das características da distribuição gaussiana de potência óptica no plano do receptor, a posição dos fotodetectores e a intensidade de potência incidente em cada um deles, pode-se calcular a posição do centro do feixe óptico e sua variância com o tempo causada pelo *Beam Wander*. Dessa forma, determina-se a constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$ , que é uma medida da turbulência atmosférica [48].

### 5.3. Análise quantitativa

A partir do que foi exposto na seção anterior, pode-se, por ora ser apresentado à fundamentação matemática da técnica de medida de turbulência por triangulação de potências. Assumindo que o feixe de luz encontra-se parado, pode-se determinar a distância radial  $r_1$  entre um ponto aleatório  $D_1$  e o centro da projeção gaussiana pela expressão [48]:

$$P(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} \quad (5.1)$$

Onde  $W$  é a largura do feixe óptico,  $P_0$  a potência central da distribuição gaussiana e  $P(x, y)$  a potência do fotodetector em questão. Utilizando-se então três fotodetectores, onde  $i=1, 2$  e  $3$ , em posições conhecidas em relação à origem do plano cartesiano, como mostrado na Figura 17, pode-se determinar a potência incidente em cada um deles.

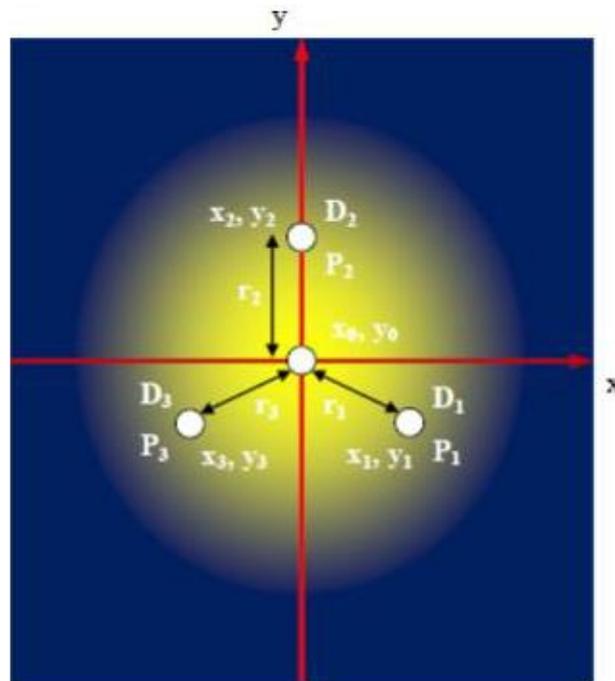


Figura 17: Posição dos fotodetectores no anteparo.

Com base nessa informação são calculadas as distâncias radiais  $r_i$  de cada fotodetector ao centro do feixe como a seguir [48]:

$$P_i(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r_i}{w}\right)^2} \quad (5.2)$$

$$e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} = \frac{P_i}{P_0} \quad (5.3)$$

Fazendo  $\frac{P_i}{P_0} = \bar{P}_i$  a potência normalizada em cada fotodetector, temos:

$$e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} = \bar{P}_i \quad (5.4)$$

$$\ln\left(e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2}\right) = \ln\bar{P}_i \quad (5.5)$$

$$\left(\frac{r_i}{w}\right)^2 = -\ln\bar{P}_i \quad (5.6)$$

Chega-se então a equação que define as distâncias radiais como sendo:

$$r_i^2 = W^2(-\ln\bar{P}_i) \quad (5.7)$$

Levando-se em consideração que a distância radial  $r_i$  se relaciona com as coordenadas retangulares como se segue:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (5.8)$$

Incluindo a equação 5.8 na 5.7 obtém o sistema de equações que definirá a posição do centro do feixe óptico pelo par ordenado  $(x_0, y_0)$ :

$$\begin{aligned} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - W^2(-\ln\bar{P}_1) &= 0 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - W^2(-\ln\bar{P}_2) &= 0 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - W^2(-\ln\bar{P}_3) &= 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Sabendo-se então a posição do centro do feixe  $(x_0, y_0)$ , pode-se calcular a sua distância  $r_c$  do centro cartesiano:

$$r_c = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (5.10)$$

Conforme a teoria já apresentada, a constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$  se relaciona com a variância da distância do centro do feixe ao centro de referência  $\langle r_c^2 \rangle$  pela equação:

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{1/3} \quad (5.11)$$

Com o valor da variância do centro do feixe óptico, pode-se então mensurar a turbulência atmosférica por meio do cálculo do  $C_n^2$  diretamente da equação 5.11.

## **CAPÍTULO 6**

### **SETUP EXPERIMENTAL E RESULTADOS**

Diante de todos os assuntos abordados até aqui, este capítulo tem como finalidade estabelecer uma relação entre a teoria vista (evaporação, turbulência atmosférica e a técnica de triangulação de potências) com os resultados alcançados no experimento realizado em bancada. Este experimento utiliza o arranjo experimental descrito no capítulo 5. O arranjo foi adaptado de forma que possa mensurar a turbulência atmosférica, associando-a com a presença de vapor d'água.

O presente capítulo divide-se em dois blocos experimentais: SETUP I e SETUP II. O primeiro (SETUP I) foi realizado em bancada, com transmissor e receptor separados por 345 mm. Medidas de turbulência atmosférica foram realizadas sem a presença de vapor d'água e com vapor d'água. O vapor d'água foi gerado por meio de um recipiente com água aquecido por um ebulidor. O segundo (SETUP II) foi realizado uma medida de turbulência atmosférica fora de bancada, dentro do laboratório. Esta medida foi realizada com o transmissor e o receptor separados a uma distância de 8,6 m, mantendo uma temperatura constante da água armazenada no recipiente, variando de 23 °C a 70 °C.

## 6.1. SETUP I

Antes da realização das medidas de turbulência atmosférica, procedeu-se com a caracterização e calibração dos equipamentos utilizados. Esses procedimentos foram realizados com o objetivo de conhecer o comportamento dos equipamentos e parametrizar o arranjo experimental, como por exemplo, a caracterização do ebulidor que teve a função de gerar fonte de calor ao recipiente com água para produzir vapor d'água.

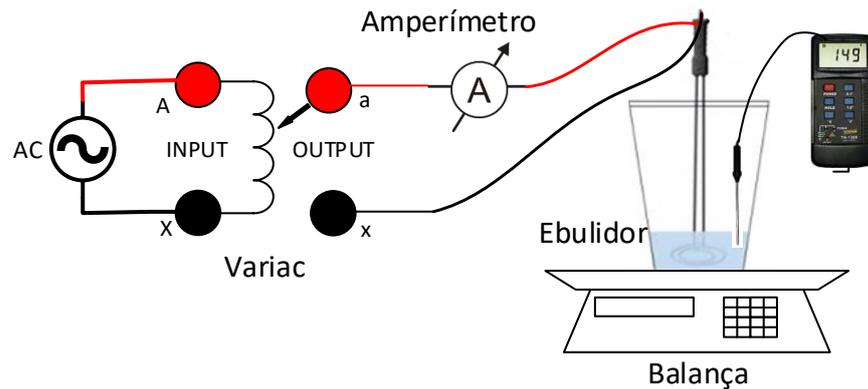
Desta forma, este bloco experimental pode ser dividido em três etapas: a primeira consistiu na caracterização do ebulidor. Na segunda etapa realizaram-se as pré-configurações do arranjo experimental (alinhamento do sistema transmissor e receptor, caracterização e calibragem dos fotodiodos e caracterização da curva gaussiana) e a medida de turbulência sem a presença de vapor d'água. Por fim, na terceira etapa efetuaram-se as medidas de turbulência atmosférica com o vapor d'água para diferentes intensidades de corrente elétrica para o ebulidor.

### 6.1.1. Caracterização do Ebulidor

O ebulidor foi alimentado com diferentes valores de energia elétrica a fim de obter um padrão de comportamento para os valores de temperatura e volume de água evaporada. A caracterização do ebulidor de 1.000 W e 127 V (modelo: Mergulhão Reforçado, fabricante: Indústria de Aparelhos Elétricos Cherubino Ltda) foi realizado imergindo-o em um volume de água de 4,56 l, dentro de uma cuba metálica com capacidade volumétrica de 7,2 l. O equipamento foi alimentado com uma corrente elétrica variando de 1 A a 9 A, por meio de um transformador regulador controlador de voltagem (Variac) da Atlas de 110 V e capacidade de 2 kVA, com o objetivo de trabalhar com diferentes intensidades de fluxo de vapor d'água. Para cada corrente elétrica foram mensurados:

- Temperatura da água utilizando um termopar da Instrutherm, modelo TH-1300, com sensor de temperatura tipo k (-10 °C a + 250 °C);
- Volume de água evaporada, por meio de uma Balança Digital Comercial (fabricante: Micheletti, modelo: AM-15) com precisão de 0,005 l; e
- Taxa de evaporação em função do tempo.

Todas as medidas foram feitas com um volume inicial de 4,56 l até atingir um volume final de 1,6 l, limiar onde se encontra a espiral do ebulidor que não pode ficar ligado sem estar submerso. Além disso, a corrente e a tensão de alimentação do ebulidor foram monitoradas na saída do Variac. As Figuras 18 e 19 mostram o esquemático e a imagem da montagem, respectivamente.



**Figura 18: Esquemático da caracterização do ebulidor.**



**Figura 19: Montagem das medições para caracterização do ebulidor.**

Os seguintes resultados foram alcançados para cada corrente elétrica de alimentação do ebulidor (Tabela 2):

Tabela 2: Taxa de evaporação e temperatura em função do tempo para cada corrente.

Corrente (A)	Taxa de evaporação (ml/min)	Temperatura em função do tempo (°C/min)
1	0,087	0,011
2	0,625	0,058
3	2,146	0,129
4	12,802	0,196
5	15,2	0,35
6	16,444	0,394
7	17,725	0,425
8	19,346	0,464
9	21,143	0,521

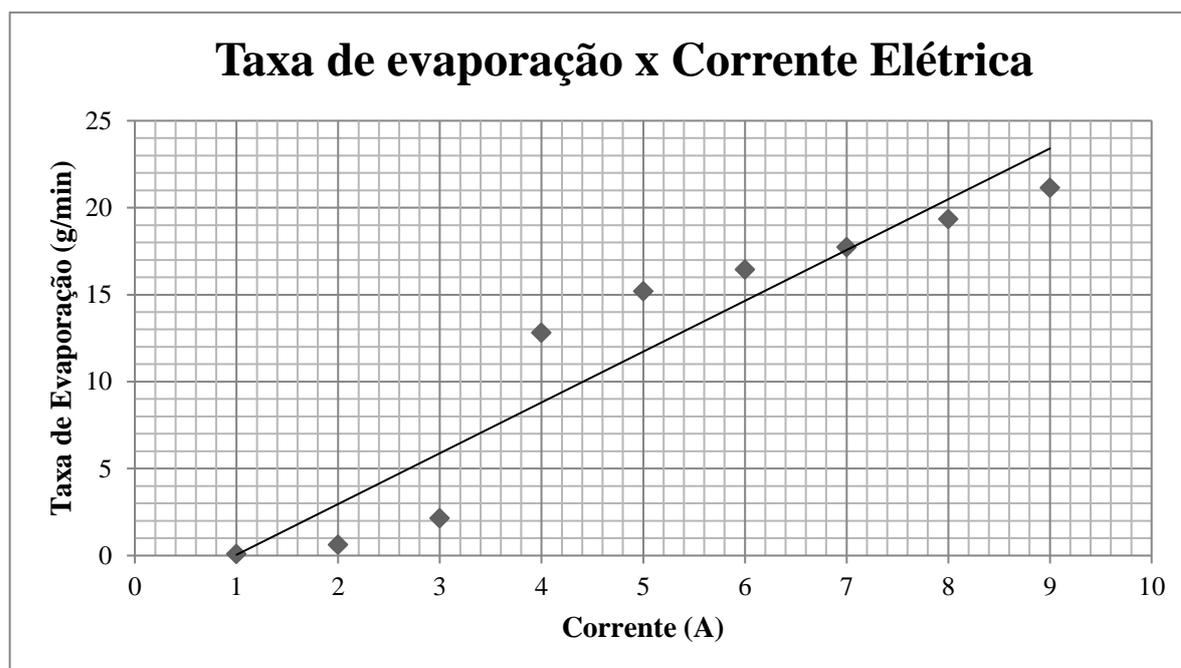


Figura 20: Taxa de Evaporação para cada corrente elétrica de alimentação do ebulidor.

Observa-se pelo gráfico da Figura 20, um salto no valor da taxa de evaporação, infere-se que no intervalo de 1 A a 3 A, a evaporação ocorre em baixas temperaturas, antes de alcançar a temperatura de ebulição, por isso ocorre de forma mais lenta. Nesse intervalo, o desprendimento das moléculas d'água acontece na superfície devido a maior volatilidade, cuja força tensorial é maior. A umidade, área de dispersão e vento são fatores que também influenciam na taxa de evaporação, sendo de forma mais significativa em baixas temperaturas. No entanto, no intervalo

de 4 A a 9 A, a temperatura de ebulição é atingida, causando este aumento brusco da taxa de evaporação.

As Figuras de 21 a 29, apresentam os gráficos sobre a quantidade de massa de água evaporada e a temperatura da água em função do tempo, com ebulidor alimentado com as correntes elétricas de 1 A a 9 A. Os valores de  $i_T$  e  $i_V$  representam, respectivamente, os graus de inclinação das curvas de ajustes da temperatura e volume de água evaporada.

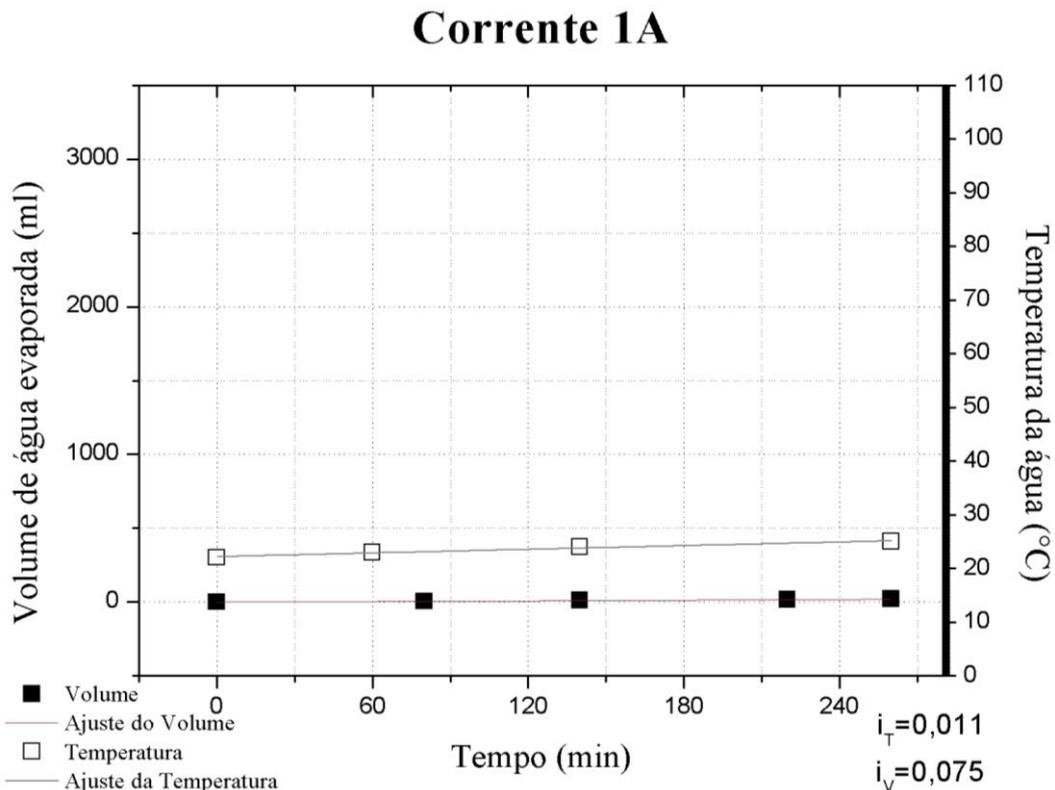


Figura 21: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 1 A.

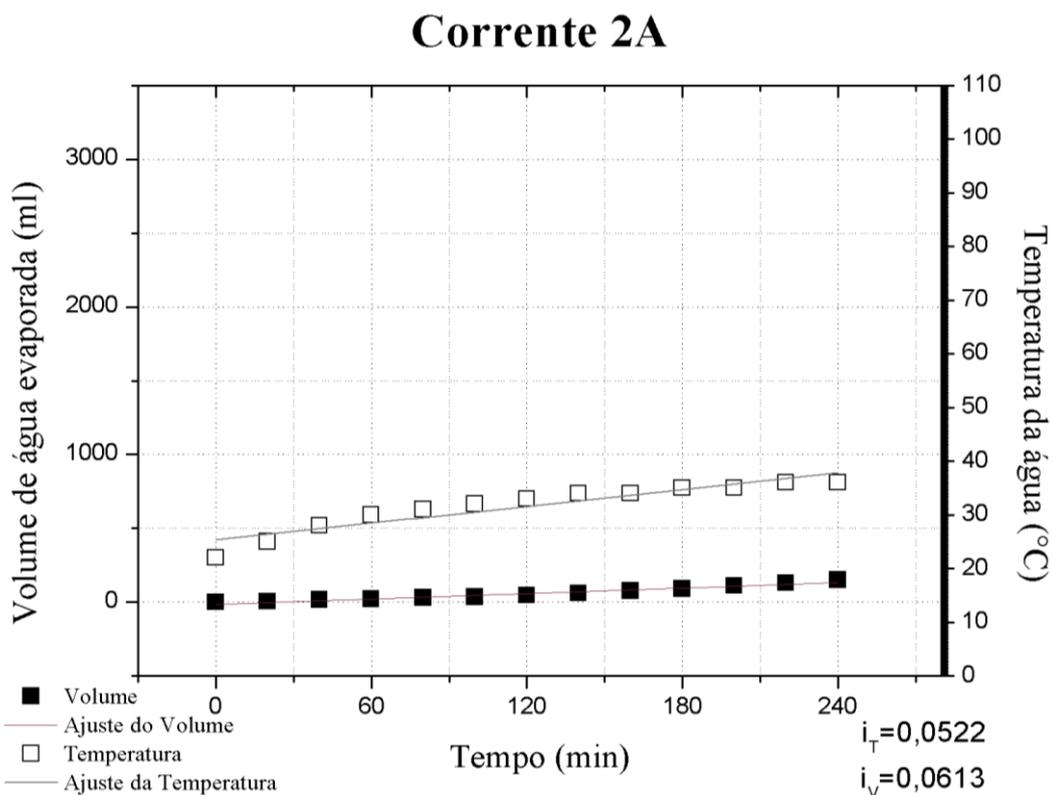


Figura 22: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 2 A.

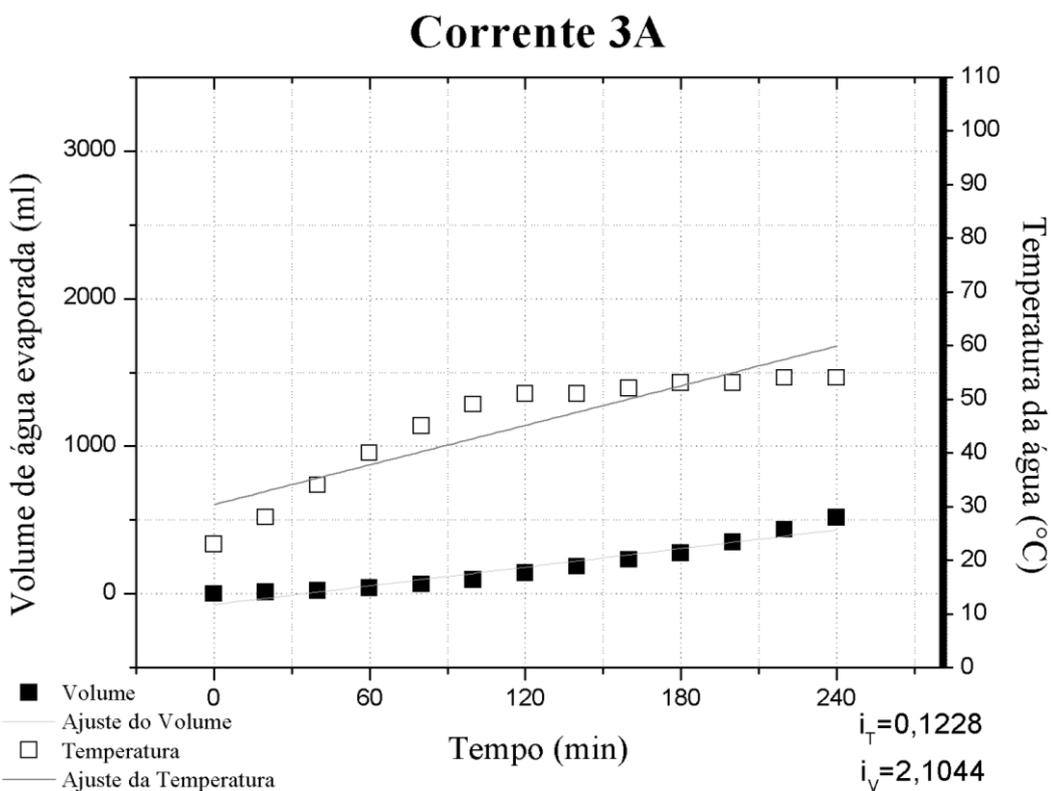


Figura 23: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 3 A.

Observa-se pelas Figuras de 21 a 23, gráficos de volume de água evaporada e temperatura para corrente elétrica de alimentação do ebulidor de 1 A

a 3 A, que a temperatura máxima da água não atingiu o seu valor de ebulição. Além disso, nota-se que a diferença do volume de água evaporada entre as medições de 1 A e 3 A aumentou em torno de 10,79% em relação ao volume inicial.

Pelos resultados obtidos demonstraram que apesar da temperatura não ter atingido a ebulição, o volume de água evaporada aumentou significativamente. Pela equação 2.1 fica evidente a relação existente entre a temperatura e o calor latente de evaporação, ou seja, à medida que a temperatura se eleva, o calor necessário para que evapore um milímetro de água é menor.

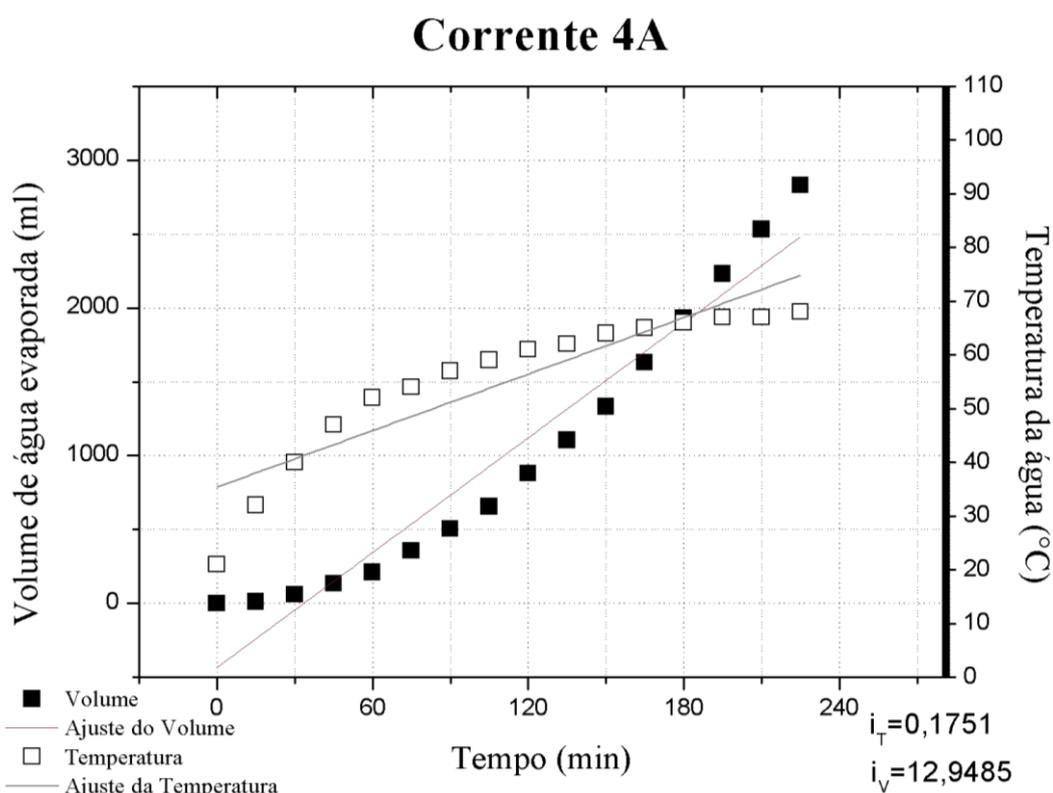


Figura 24: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 4 A.

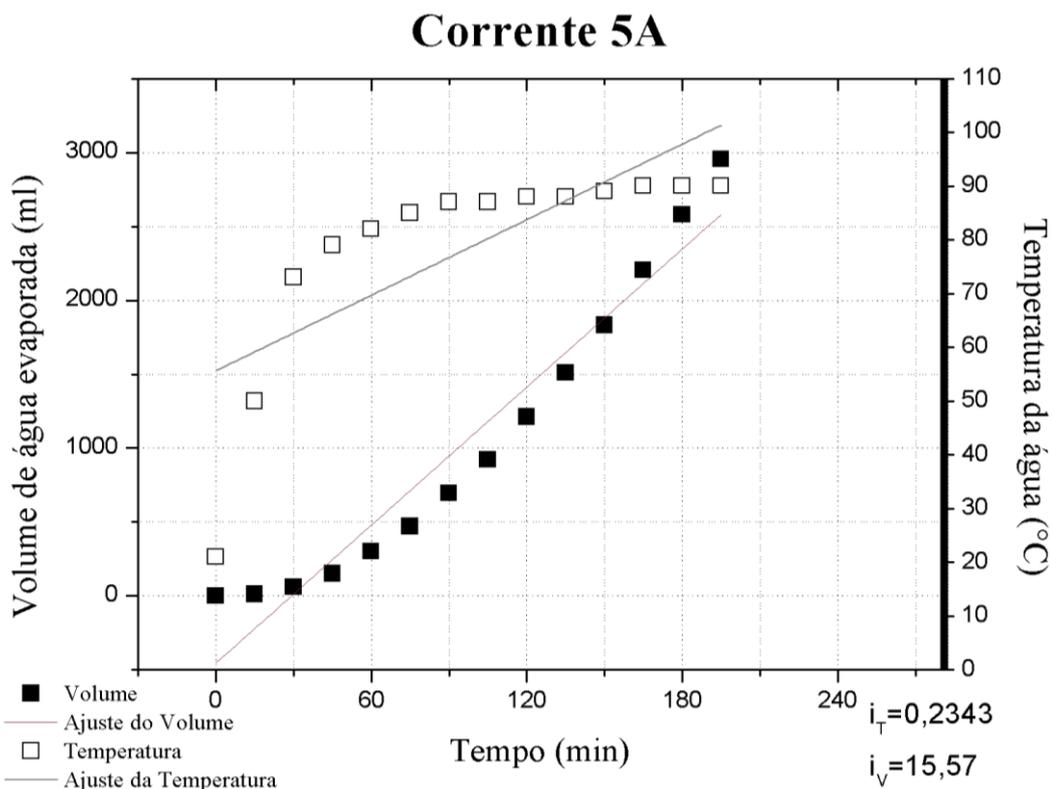


Figura 25: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 5 A.

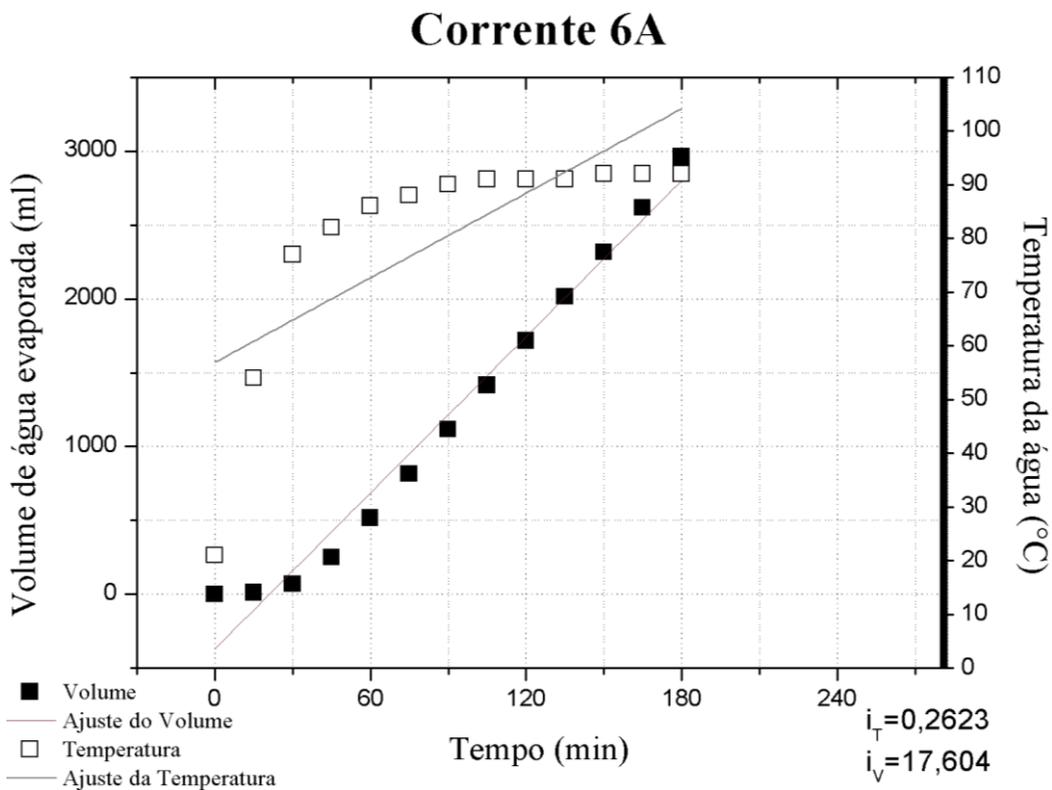


Figura 26: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 6 A.

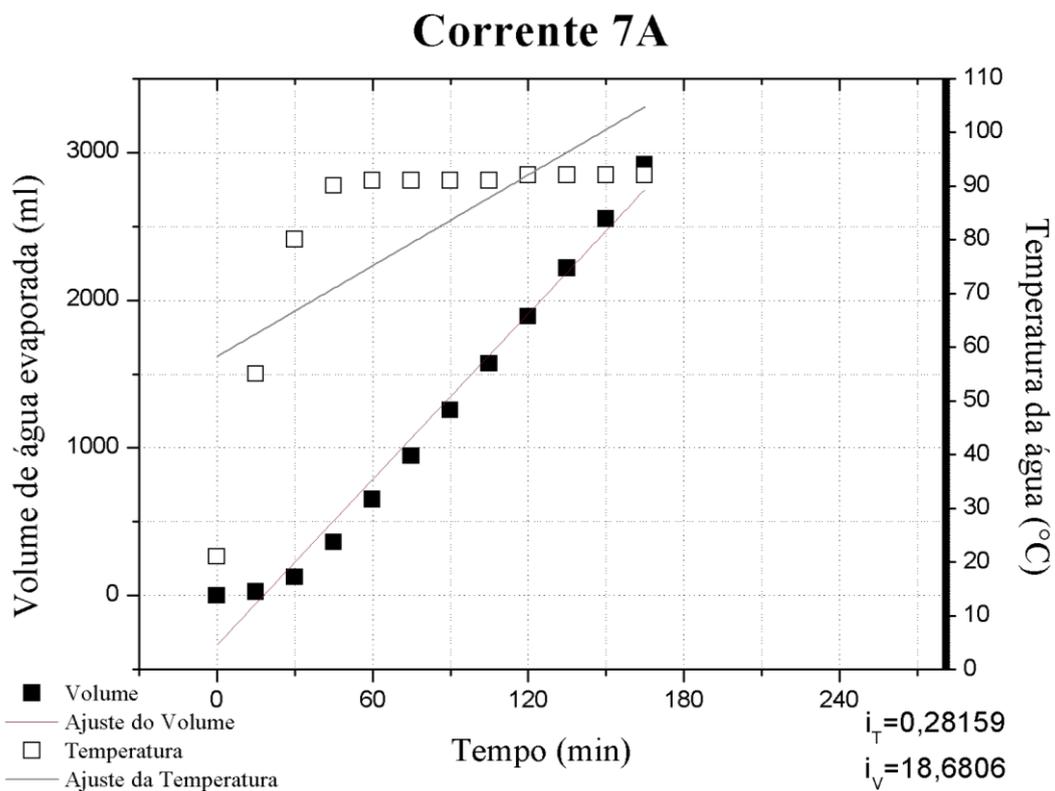


Figura 27: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 7 A.

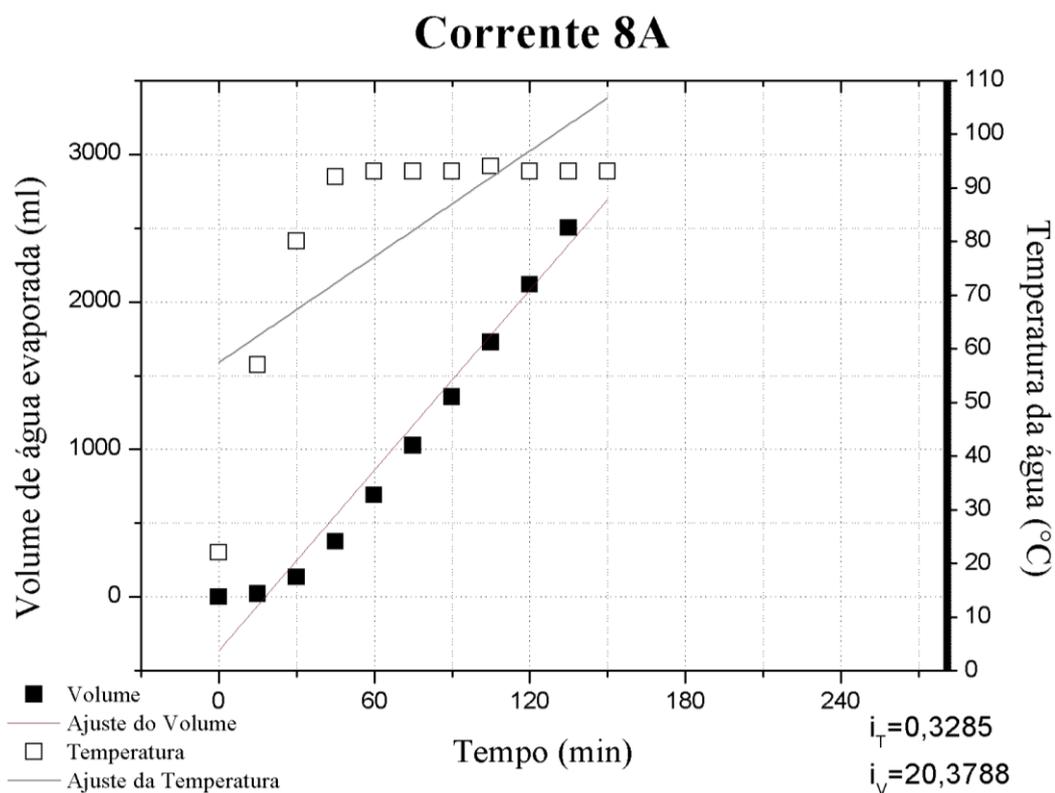


Figura 28: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 8 A.

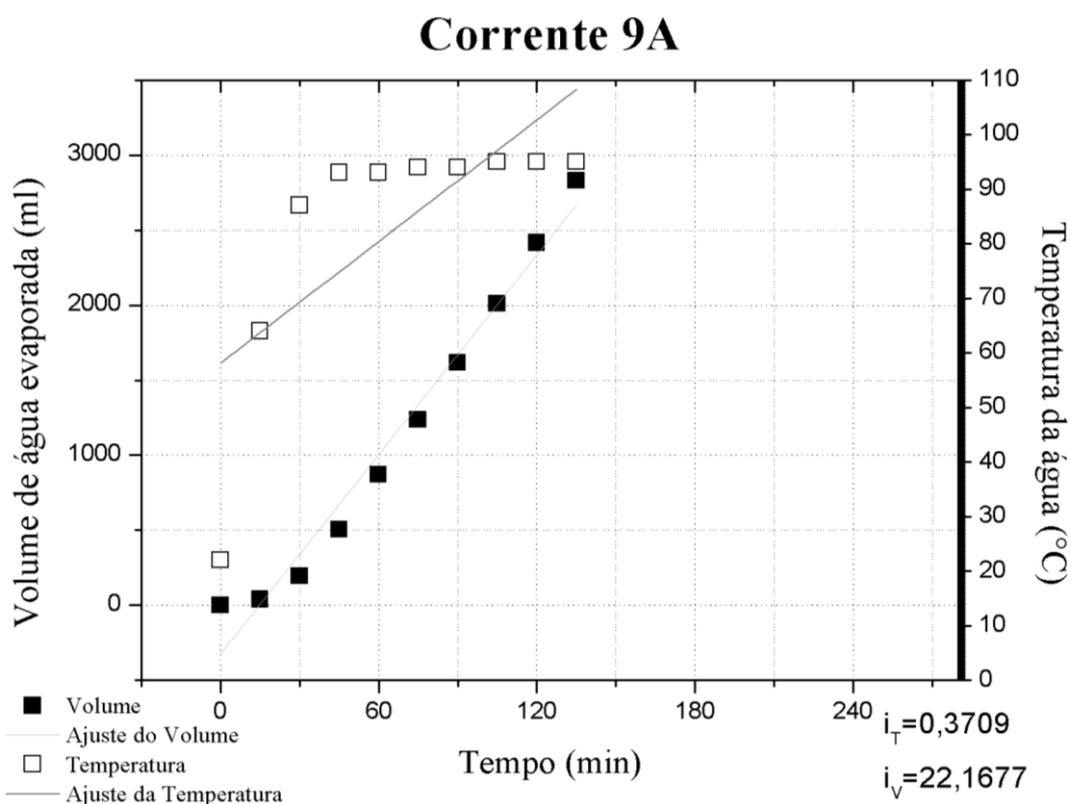


Figura 29: Evaporação e Temperatura da água com corrente de 9 A.

Nota-se pela análise das figuras de 24 a 29 que a temperatura da água atingiu seu valor de ebulição em um menor intervalo de tempo à medida que o valor

de corrente elétrica de alimentação do ebulidor aumentou. Da mesma forma, a quantidade de água evaporada foi maior para correntes elétricas também maiores, evidenciando a relação existente entre a temperatura e o calor latente de evaporação (equação 2.1) e também observável pelos valores de  $i_T$  e  $i_V$  resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3: Valores de  $i_T$  e  $i_V$  para as correntes de alimentação entre 1 A a 9 A.**

<b>Corrente</b>	<b>Inclinação da curva de ajuste da temperatura da água (<math>i_T</math>)</b>	<b>Inclinação da curva de ajuste do volume de água evaporada (<math>i_V</math>)</b>
1	0,01135	0,075
2	0,0522	0,61264
3	0,1228	2,1044
4	0,1751	12,94853
5	0,2343	15,57
6	0,26227	17,604
7	0,28159	18,68065
8	0,32849	20,37879
9	0,37091	22,16768

Os resultados estão de acordo com a teoria vista no capítulo 2, demonstrando que à medida que aumenta a temperatura, gerada pelo aumento da corrente elétrica de alimentação do ebulidor (Figura 31), a evaporação ocorre de maneira mais elevada porque há maior energia sendo fornecida na superfície evaporante pelo aumento da temperatura (Figura 30)

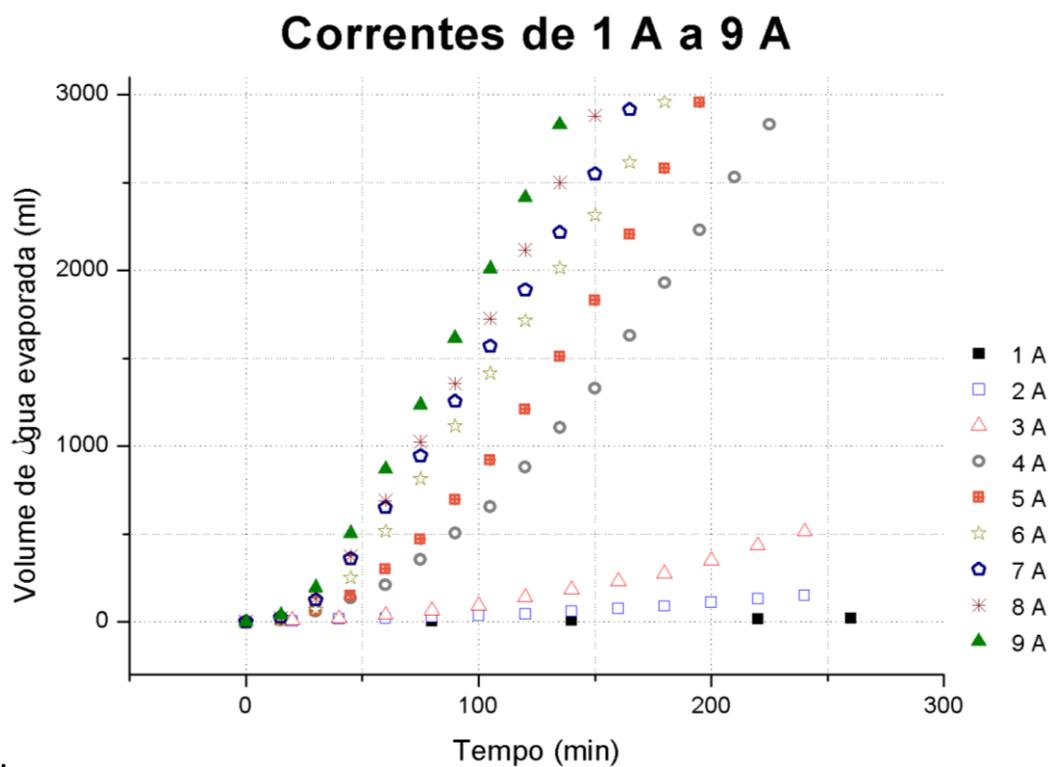


Figura 30: Massa de água evaporada para as correntes de 1 A a 9 A.

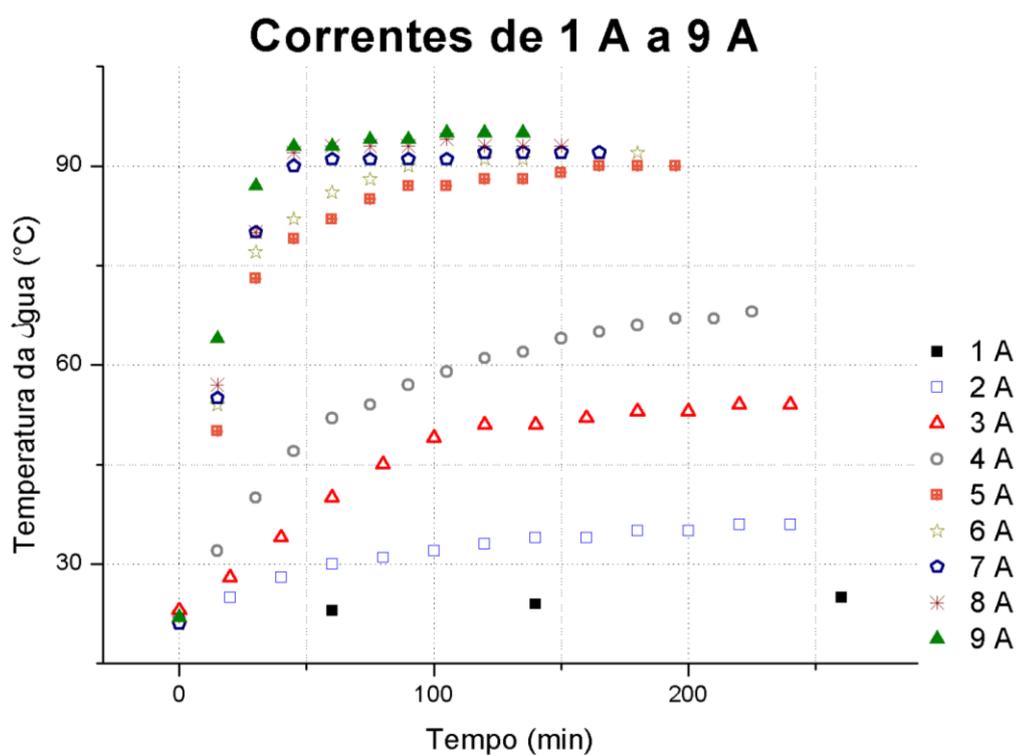


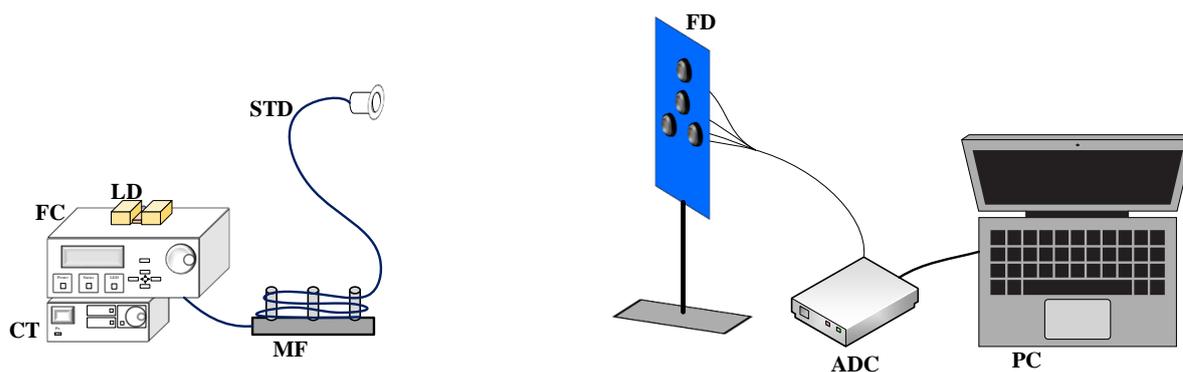
Figura 31: Temperatura da água para as corrente de 1 A a 9 A.

## **6.1.2. Medidas de Turbulência Atmosférica**

Nesta seção é subdividida em três etapas: A primeira apresenta o funcionamento do arranjo experimental com as especificações técnicas dos componentes utilizados nas medições, os procedimentos para o alinhamento do sistema transmissor e receptor, a caracterização e a calibragem dos fotodiodos e da curva gaussiana, a segunda o resultado da medida de turbulência sem vapor d'água e a terceira expõe os resultados e análises das medidas de turbulência com vapor d'água.

### **6.1.2.1. Configurações e caracterizações iniciais do arranjo experimental**

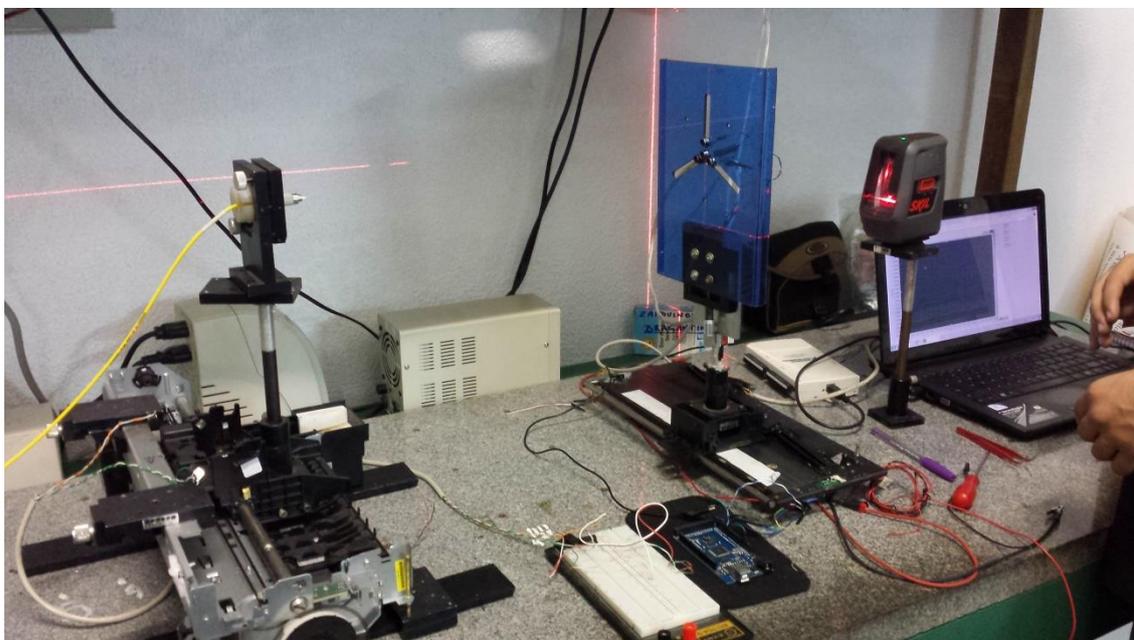
O arranjo experimental consiste de uma fonte de luz, um diodo LASER de bombeio (LD) com fibra pigtail Alta Birrefringência (HiBi) – 980 nm Pirelli, que é excitado por uma fonte de corrente (FC) da Newport, modelo 5030, e resfriado por um controlador de temperatura (CT) ILX Light Wave LDT-5525, que assumi o papel de transmissor do sistema óptico em espaço livre. Este diodo LASER gera uma fonte luminosa que percorre uma fibra óptica padrão (STD), com comprimento de onda de corte de 1.300 nm, passando por um filtro modal (MF), conectado na saída da fibra para eliminar os modos de alta ordem e os modos que se propagam pela casca, a fim de garantir que o feixe gaussiano seja de base circular no receptor. O feixe óptico, que atravessa o MF, é propagado para o espaço livre em direção ao anteparo, distante da saída da fibra em aproximadamente 345 mm, composto por quatro fotodetectores (Di), sendo três distribuídos nos vértices de um triângulo equilátero e um no centro. Estes realizam a conversão do sinal óptico em elétrico, que por sua vez chega ao conversor analógico-digital (ADC) da National Instruments 6210 para a conversão em sinal digital. Por fim, os dados das tensões do feixe óptico são interpretados pelo computador pessoal (PC), utilizando um ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas, LabVIEW, para o cálculo das posições dos feixes por meio do sistema de equações 5.9. O esquemático do SETUP pode ser visto na Figura 32 [48].



**Figura 32: Esquemático do arranjo montado em laboratório.**

Antes de iniciar as medidas de turbulência, foram realizados o alinhamento do sistema transmissor e receptor, a caracterização e a calibragem dos fotodiodos e a caracterização da curva gaussiana.

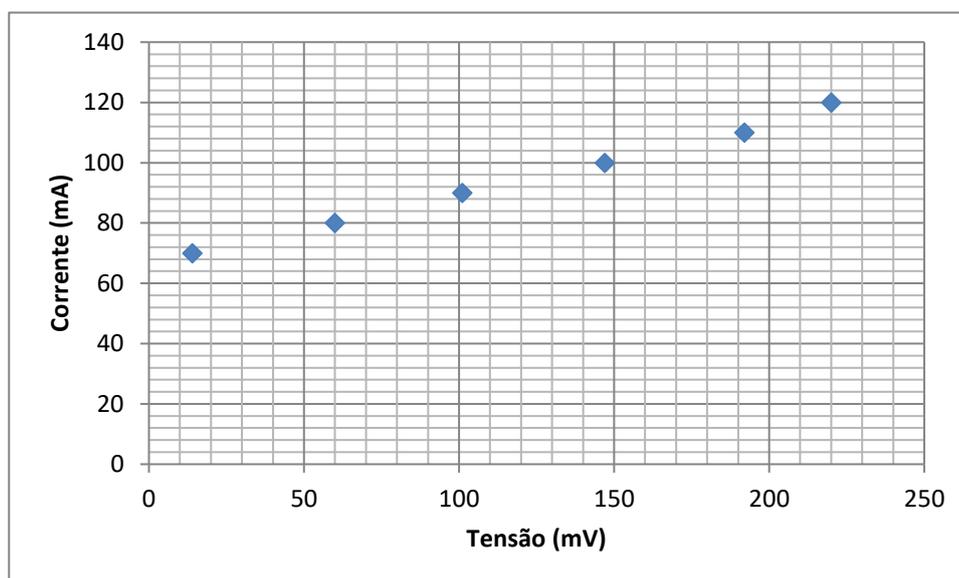
Para realizar o alinhamento do sistema transmissor e receptor, foi utilizado um LASER autonivelante, que projeta linhas horizontais e verticais capaz de fazer o nivelamento, prumo e alinhamento. A Figura 33 mostra o esquema montado para realizar o alinhamento do sistema transmissor e receptor.



**Figura 33: Alinhamento do sistema transmissor e receptor.**

Após o sistema alinhado, foi realizada a calibragem dos fotodiodos por meio de potenciômetros que ajustam as tensões captadas do feixe óptico pelos fotodiodos.

Cada fotodiodo foi caracterizado fazendo as medições das tensões variando gradualmente a corrente da fonte Newport 5030, resultado em uma resposta linear (Figura 34).



**Figura 34: Caracterização do fotodiodo central.**

Para a aquisição das tensões dos fotodiodos foi utilizado o programa LabVIEW, para a interpretação dos dados coletados pelos fotodiodos. A Figura 35 mostra o diagrama de blocos para a medição das tensões dos fotodiodos e a análise espectral dos sinais por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O sistema de aquisição de dados (DAQ Assistant) possibilita configurar os canais virtuais e obter as leituras das tensões dos fotodiodos.

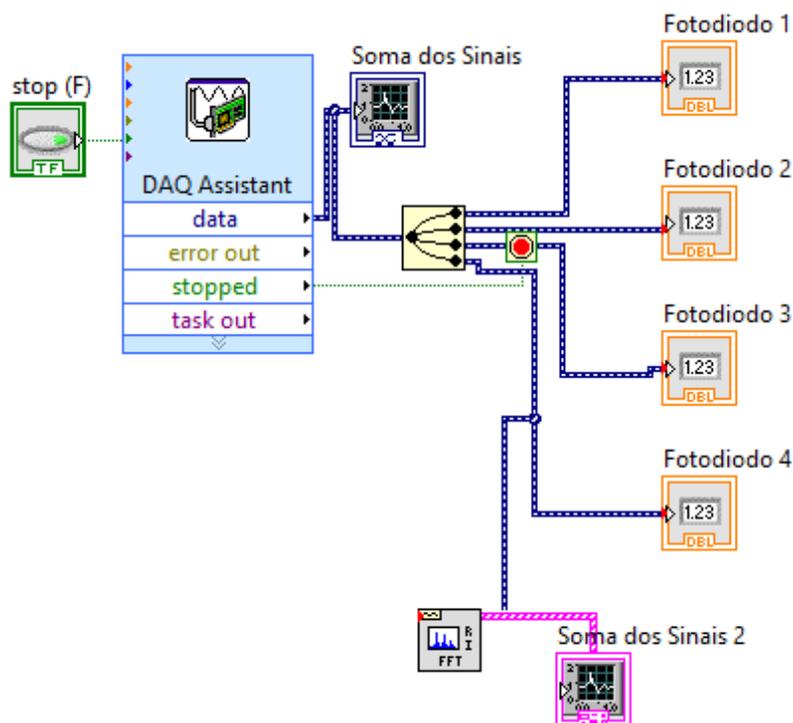


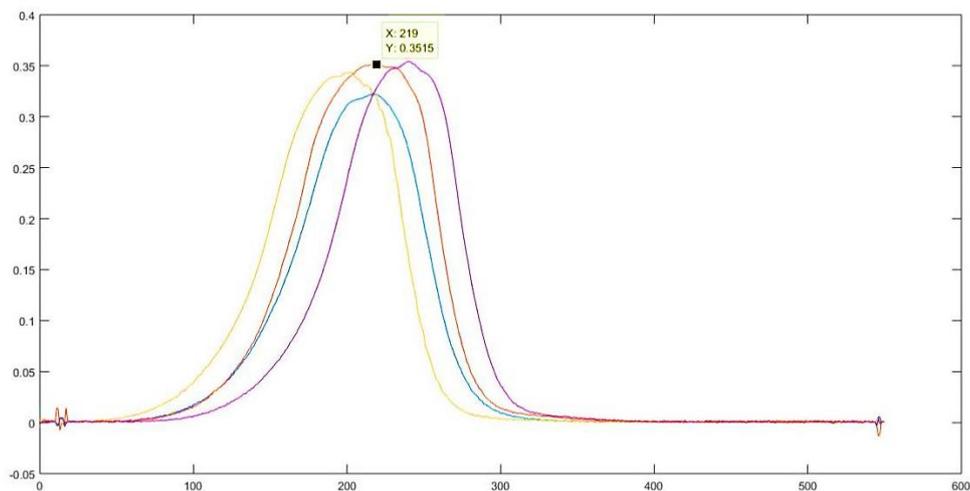
Figura 35: Diagrama de blocos para aquisição de dados dos fotodiodos.

A caracterização da curva gaussiana foi determinada fazendo a aquisição dos sinais recebidos dos fotodetectores durante a translação do anteparo contendo os mesmos, por meio de um motor de passos de ímã permanente, ligado a uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, Arduino Uno. O receptor percorreu uma distância de 310 mm, em 55 segundos, com taxa de amostragem de 10 amostras por segundo.

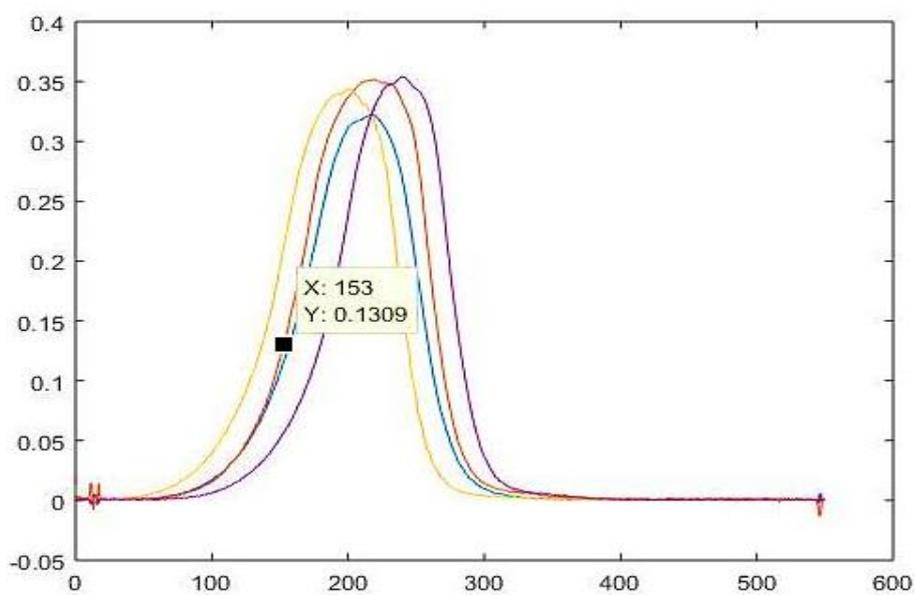
A Figura 36 contém o gráfico que mostra a curva gaussiana gerada no matlab, possui amplitude máxima de 0,3515 mV ( $V_0$ ) e o seu centro no eixo “X” em 219 amostras. Para encontrar o valor de  $W$ , calcula-se a tensão equivalente na posição em  $W$ , por meio da equação (6.1):

$$V = \frac{V_0}{e} \quad (6.1)$$

Obteve-se o valor de 0,1293 mV. No gráfico da Figura 37, o valor mais próximo do calculado é 0,1309 mV e seu valor equivalente em amostras é 153. Ao fazer a conversão de amostras para a distância equivalente, obtém-se o valor corresponde a 0,5636 mm para cada amostra, logo o  $W = 66 \times 0,5636 = 37,2$  mm.

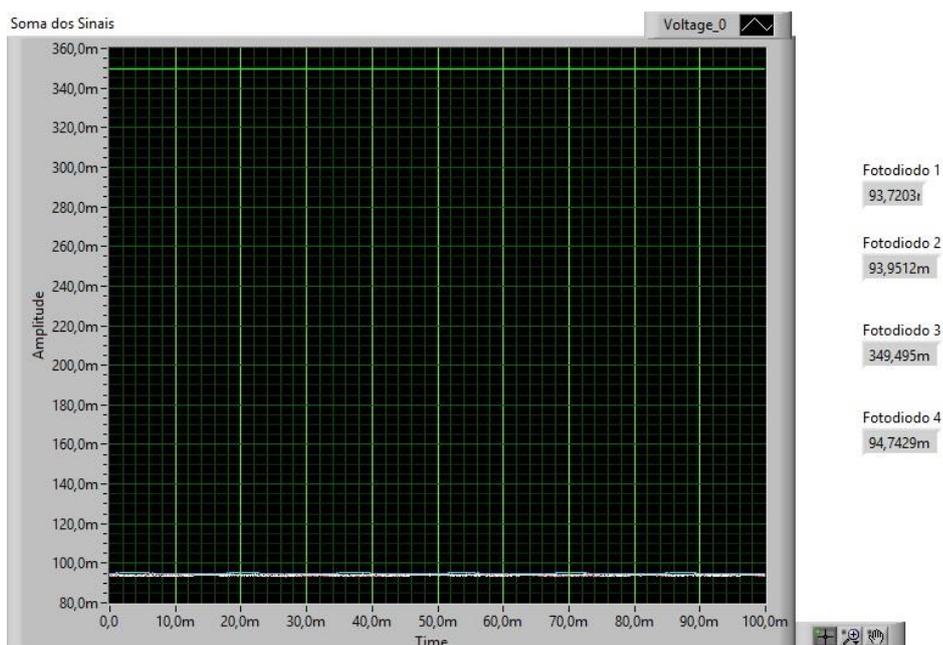


**Figura 36: Curva gaussiana com amplitude máxima.**

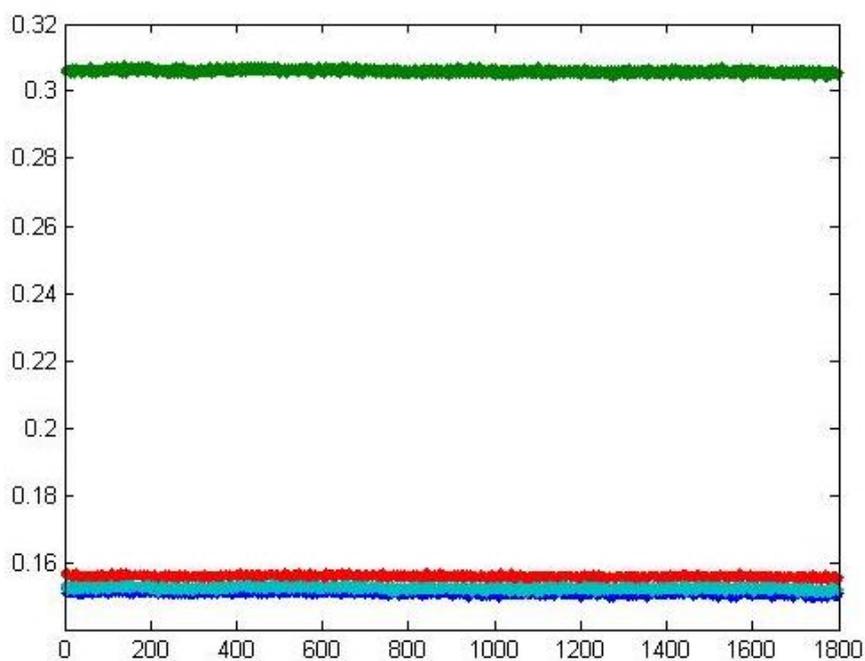


**Figura 37: Curva gaussiana com ponto limite da distância de W.**

Medidas sem vapor de água foram realizadas, as Figuras 38 e 39 mostram os valores de tensões dos quatro fotodiodos no LabVIEW e matlab, respectivamente.



**Figura 38: Valores de tensões dos 4 fotodiodos no LabVIEW.**



**Figura 39: Gráfico das tensões dos 4 fotodiodos no matlab.**

Observa-se pelas figuras 38 e 39, a linha verde com um valor maior de tensão do fotodiodo, pois é o fotodiodo central, as tensões dos demais fotodiodos estão representadas pelas linhas sobrepostas, o que representam o alinhamento do transmissor e receptor.

Adotando a distância de  $W= 37,2$  mm para a distância entre os fotodiodos, o sistema não retornou a tensão máxima de 351 mV e os demais fotodiodos de  $\frac{V_{máx}}{2} = 175,7mV$ , por isso o sistema foi adaptado para uma distância entre os fotodiodos de 25,2 mm.

### 6.1.2.2. Medida de Turbulência Atmosférica sem vapor d'água

Foi realizada a medida de turbulência sem a presença de vapor d'água a fim de comparação. O gráfico da Figura 40 apresenta a posição em "X" e "Y" do experimento, sem a utilização de vapor d'água. A dispersão em "X" é de aproximadamente 0,1384 mm e em "Y" de 0,2308 mm.

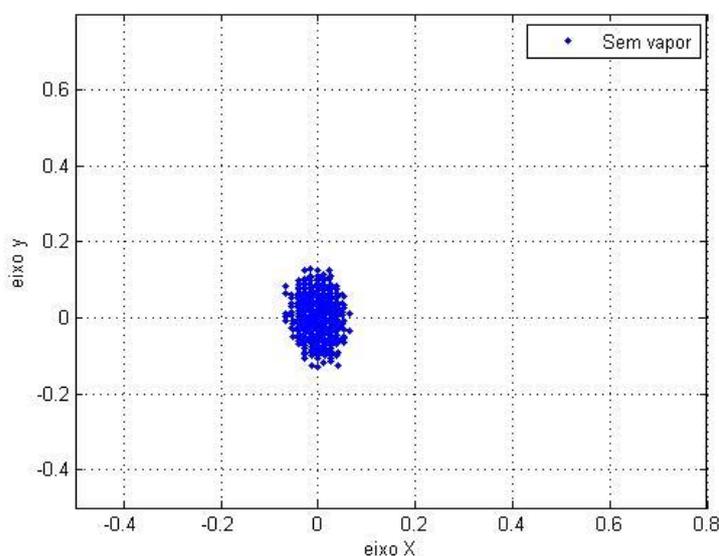


Figura 40: Gráfico das posições em "X" e "Y" da medida sem vapor d'água.

### 6.1.2.3. Medida de Turbulência Atmosférica com vapor d'água

A montagem do SETUP para as medições de turbulência atmosférica com vapor d'água é apresentada na Figura 41.



**Figura 41: SETUP para a medição de turbulência**

As medições de turbulência foram feitas de forma semelhante ao da caracterização do ebulidor, para cada corrente elétrica de alimentação do ebulidor, variando de 1 A a 9A, foram registrados os dados de temperatura da água e a massa de água evaporada.

Nessas medições, o intervalo de amostragem foi de 14 min, partindo de uma mesma massa inicial de 3.345 g, temperatura de 58 °C e taxa de amostragem de 10 Hz.

A Tabela 4 apresenta os valores das dispersões em “X” e “Y” para cada valor de corrente elétrica que alimenta o ebulidor. Observa-se o aumento gradual da dispersão tanto em “X” como em “Y” com o aumento da corrente.

Tabela 4: Valores de dispersão para cada valor de corrente.

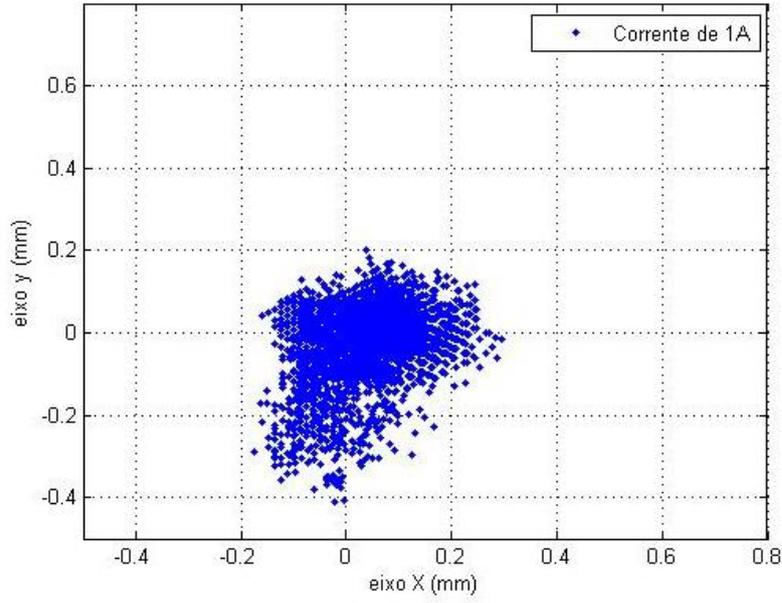
<b>Corrente (A)</b>	<b>Dispersão em “X”</b>	<b>Dispersão em “Y”</b>
<b>0</b>	0,1384mm	0,2308mm
<b>1</b>	0,4694mm	0,6135mm
<b>2</b>	0,1502mm	0,6176mm
<b>3</b>	0,3453mm	0,601mm
<b>4</b>	0,4654mm	0,7036mm
<b>5</b>	0,5358mm	0,741mm
<b>6</b>	0,5923mm	0,7717mm
<b>7</b>	0,7364mm	0,8038mm
<b>8</b>	1,0869mm	0,8584mm
<b>9</b>	1,2835mm	0,9042mm

Identifica-se, também, uma relação direta entre o aumento da corrente elétrica de alimentação do ebulidor com a massa de água evaporada, conforme os resultados apresentados pela Tabela 5. Há uma diferença no padrão de crescimento da dispersão em X no valor de corrente elétrica de alimentação de 1 A em relação aos demais valores de corrente elétrica. Esta diferença pode estar associada com a quantidade de calor inicialmente fornecida para a água que variou da temperatura ambiente até o valor de 58°C.

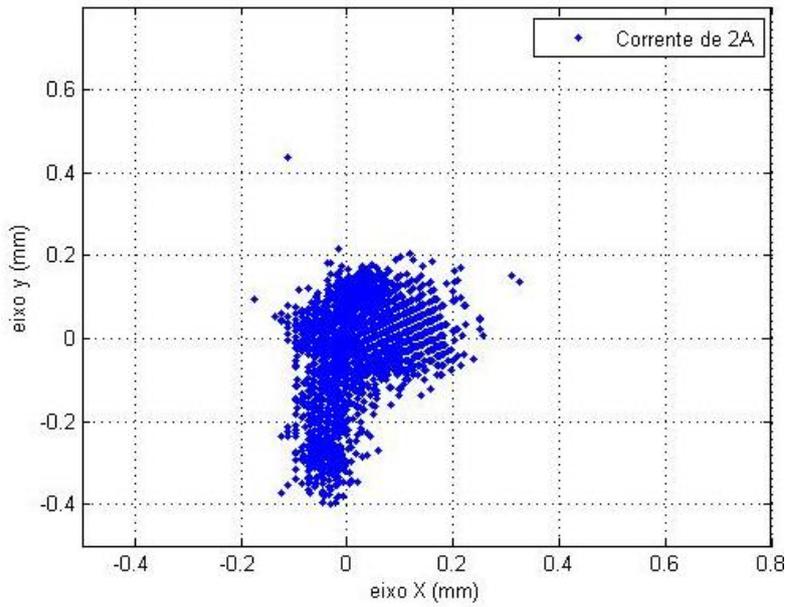
Tabela 5: Massa de água evaporada para cada valor de corrente.

<b>Corrente (A)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa de água evaporada (g)</b>	<b>Variação de Temperatura (°C)</b>
1	3345	3330	15	-10
2	3345	3305	40	-5
3	3345	3290	55	-2
4	3345	3280	65	3
5	3345	3255	90	10
6	3345	3250	95	15
7	3345	3215	130	24
8	3345	3185	160	30
9	3345	3100	245	36

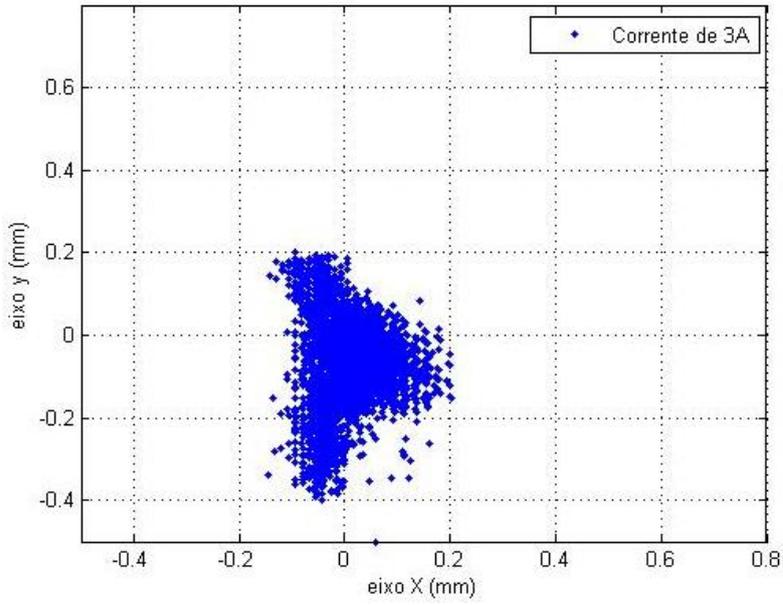
O objeto deste trabalho é relacionar o aumento do vapor d'água com o aumento da turbulência atmosférica no feixe óptico propagando no espaço livre. Para essa análise, foram plotados nas Figuras de 42 a 50, que apresentam as posições de "X" e "Y" do sinal óptico que chega ao receptor em relação ao centro do feixe no transmissor.



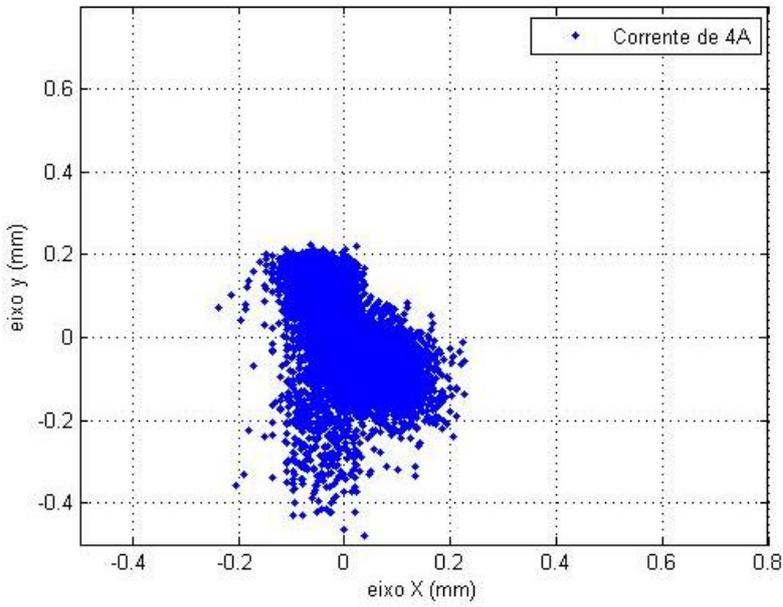
**Figura 42: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 1 A.**



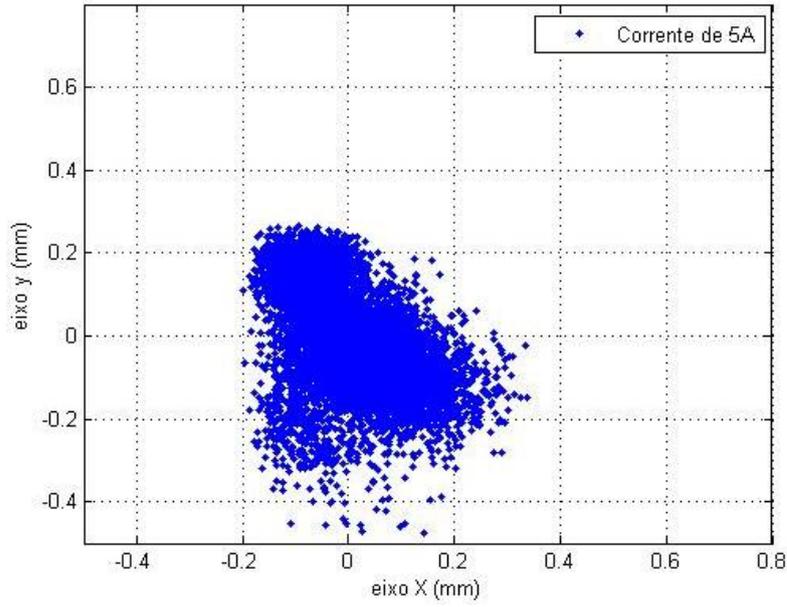
**Figura 43: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 2 A.**



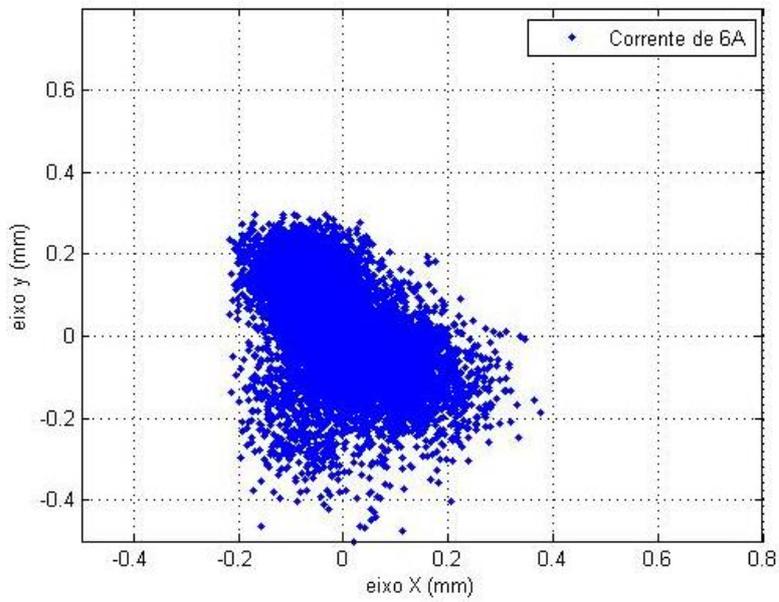
**Figura 44: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 3 A**



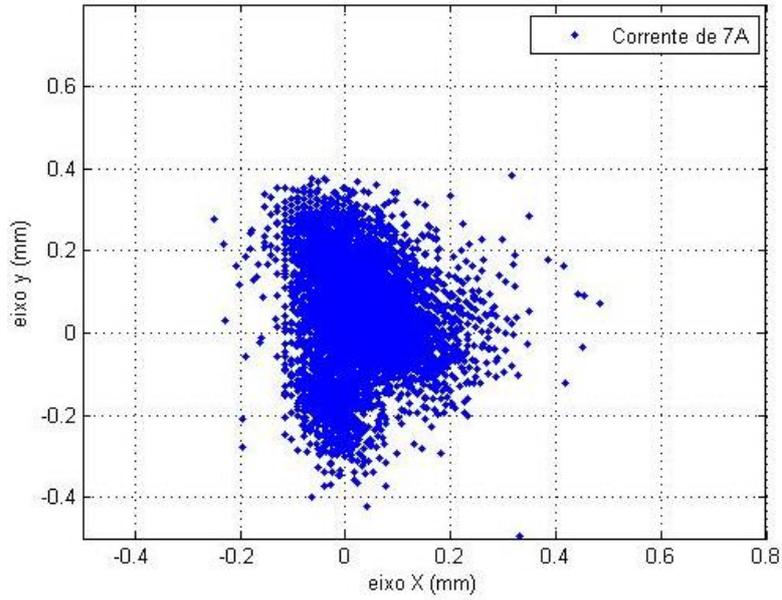
**Figura 45: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 4 A.**



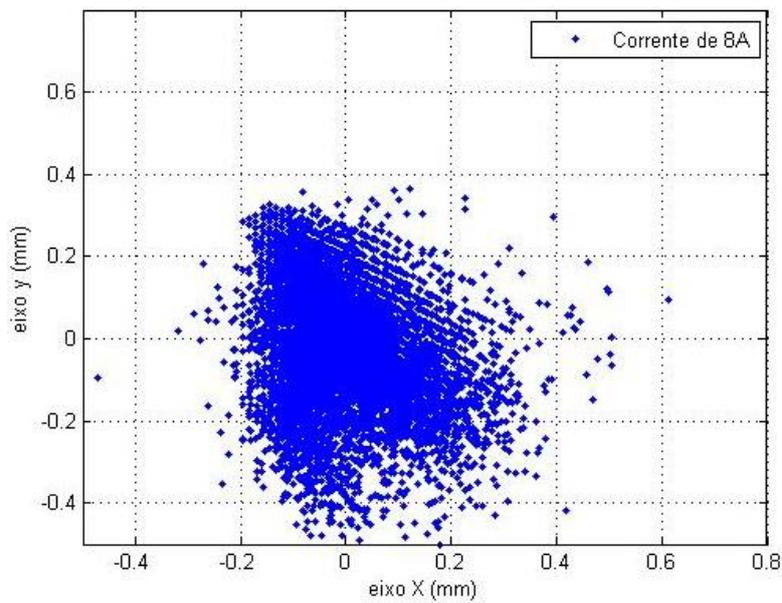
**Figura 46: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 5 A.**



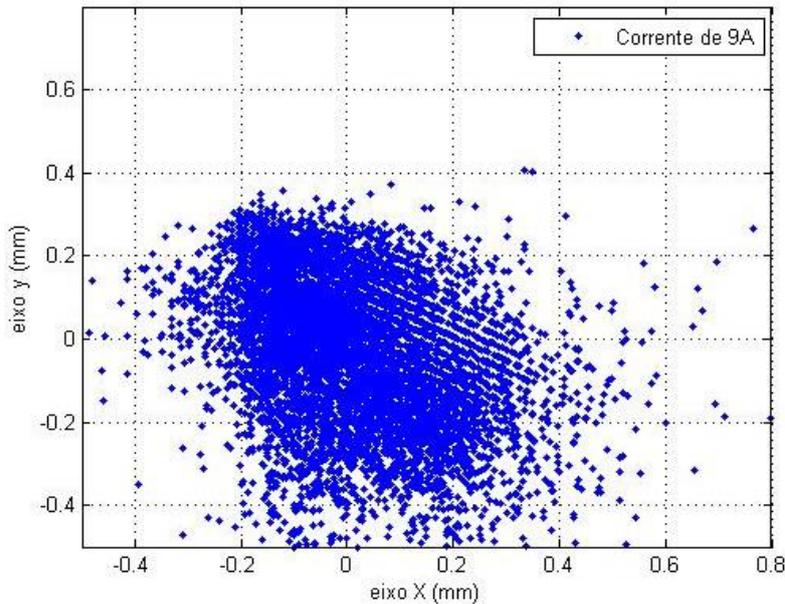
**Figura 47: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 6 A.**



**Figura 48: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 7 A.**



**Figura 49 Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 8 A.**



**Figura 50: Espalhamento dos centros instantâneos com corrente de 9 A.**

Na medida em que aumenta a corrente de alimentação do ebulidor, aumentam-se as dispersões em “X” e em “Y”, demonstrando uma relação direta da quantidade de vapor d’água com a turbulência atmosférica do feixe óptico, conforme pode ser visto nas Figuras de 42 a 50 e nos valores da Tabela 6.

Na Tabela 6 estão registrados os dados de medição realizada em intervalos de tempo de 14 min, variando a corrente elétrica de alimentação do ebulidor entre 1 A a 9 A. Para melhor compreensão desta tabela, deve-se atentar que:

- a massa de água foi medida em sua total evaporação; e
- as correlações entre a massa de água evaporada e as dispersões foram calculadas de acordo com a equação de Pearson:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.2)$$

Onde as variáveis  $x_i$  e  $y_i$  assumem os valores das massas e das dispersões e os valores  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são os valores das médias aritméticas de ambas as variáveis.

Tabela 6: Resultados das medidas de Turbulência Atmosférica.

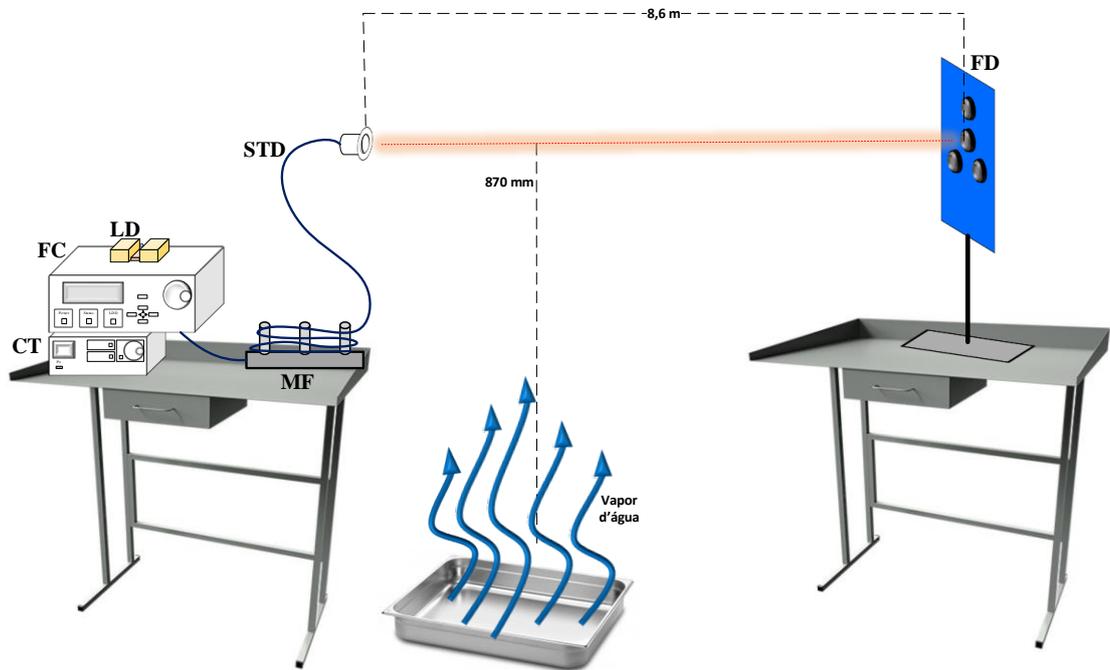
Corrente (A)	Massa de água evaporada (g)	Dispersão em X	Dispersão em Y	Correlação entre massa de água evaporada com a dispersão em X	Correlação entre massa de água evaporada com a dispersão em Y
1	15	0,4694	0,6135	0,930796404	0,93633951
2	40	0,1502	0,6176		
3	55	0,3453	0,601		
4	65	0,4654	0,7036		
5	90	0,5358	0,741		
6	95	0,5923	0,7717		
7	130	0,7364	0,8038		
8	160	1,0869	0,8584		
9	245	1,2835	0,9042		

Percebe-se pela Tabela 6 que com o aumento da massa d'água evaporada, ocorre, também, o aumento da dispersão das projeções do feixe no receptor. Este aumento evidencia a influência do fluxo de vapor d'água na turbulência sofrida pelo feixe LASER, comprovada pela alta correlação entre o efeito do *Beam Wander* (dispersão) e a quantidade de vapor d'água, em consonância com a equação (3.15). Pois esta equação demonstra a relação direta entre o aumento do calor latente  $E$  com o aumento da constante de estrutura do índice de refração  $C_n^2$

## 6.2. SETUP II

Após verificar, previamente, em bancada, que há a influência do fluxo do vapor d'água na turbulência atmosférica sofrida pelo feixe óptico, realizou-se o SETUP II, visando aumentar a distância do emissor ao receptor, assim como a sensibilidade do arranjo ao fluxo de vapor d'água. Para tanto, o transmissor e receptor foram separados por 8,6 m. Uma fonte de turbulência (recipiente com água) foi posicionada próxima ao transmissor, mantendo-se a temperatura da água constante em intervalos de 10 °C,

iniciando-se com 23 °C e alcançando o valor máximo de 70 °C. A Figura 51 representa o SETUP II.



**Figura 51: Arranjo experimental para medição de turbulência atmosférica do SETUP II.**

Visando a caracterização do fluxo de vapor d'água, foram realizadas as medidas de evaporação da massa de água nas temperaturas de 23 °C a 70 °C. A Tabela 7 apresenta os resultados de fluxo de vapor d'água e a Figura 52 apresenta o gráfico da Tabela 7.

Tabela 7: Taxa de evaporação por temperatura da água.

Temperatura da água (°C)	Taxa de Evaporação (mg/h)
23	22,2
30	43,9
40	85,87
50	193,6
60	353,4
70	600,6

### Evaporação x Temperatura (SETUP II)

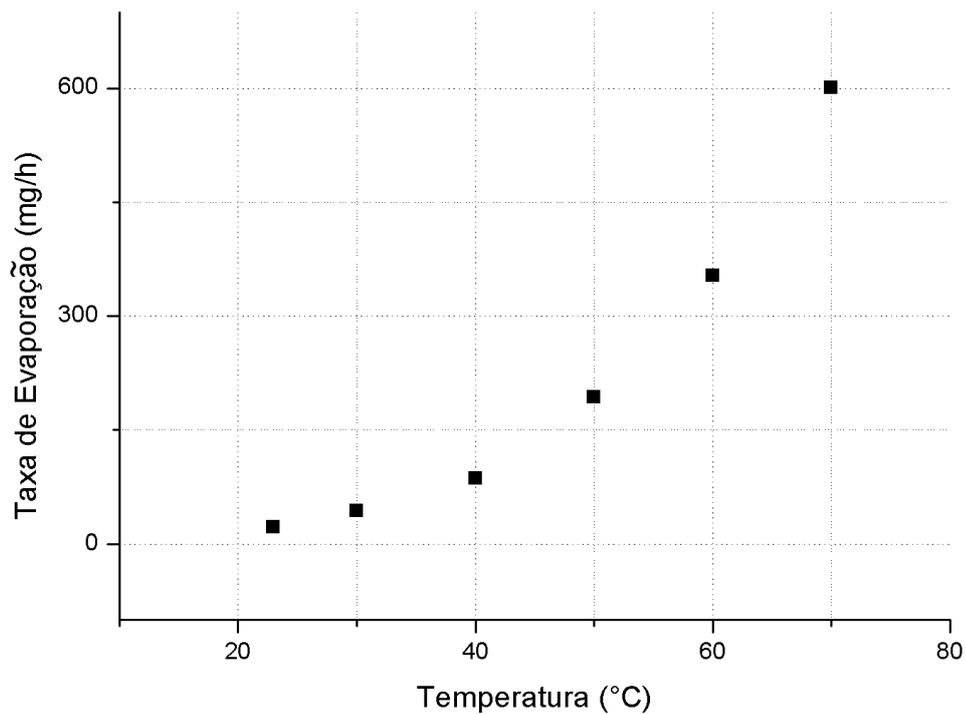


Figura 52: Gráfico da taxa de evaporação por temperatura do SETUP II.

Após a caracterização do fluxo do vapor d'água pela temperatura procedeu-se a medida de turbulência atmosférica. Como resultado verificou-se a crescente dispersão das posições da projeção do centro do feixe com o aumento do fluxo de vapor d'água. As Figuras 53 a 58 apresentam as dispersões para as temperaturas de

23 °C a 70 °C. A Tabela 8 sumariza os valores de variância dos valores  $R_c$  com as temperaturas e a Figura 59 apresenta o gráfico dos valores da Tabela 8.

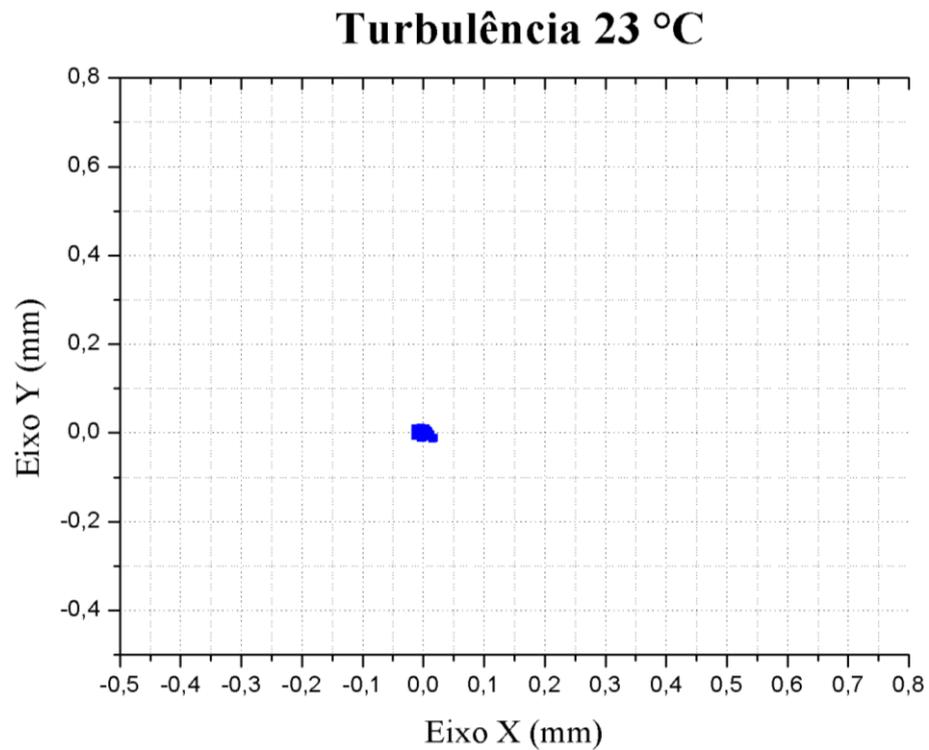


Figura 53: Espalhamento dos centros instantâneos com temperatura da água a 23 °C.

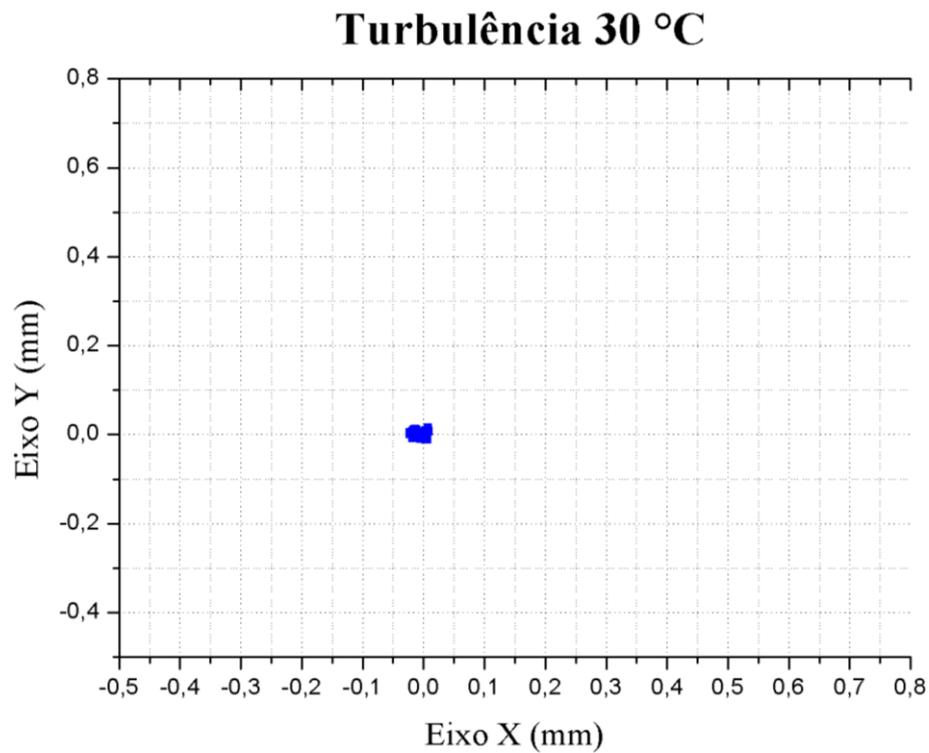


Figura 54: Espalhamento dos centros instantâneos com temperatura da água a 30 °C.

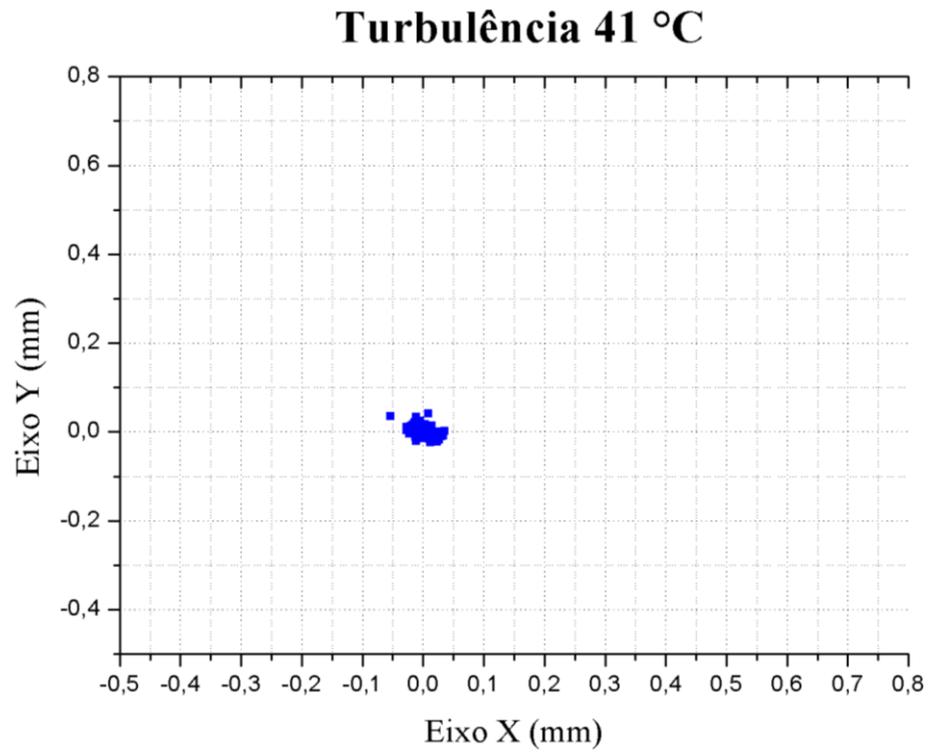


Figura 55: Espalhamento dos centros instantâneos com temperatura da água a 41 °C.

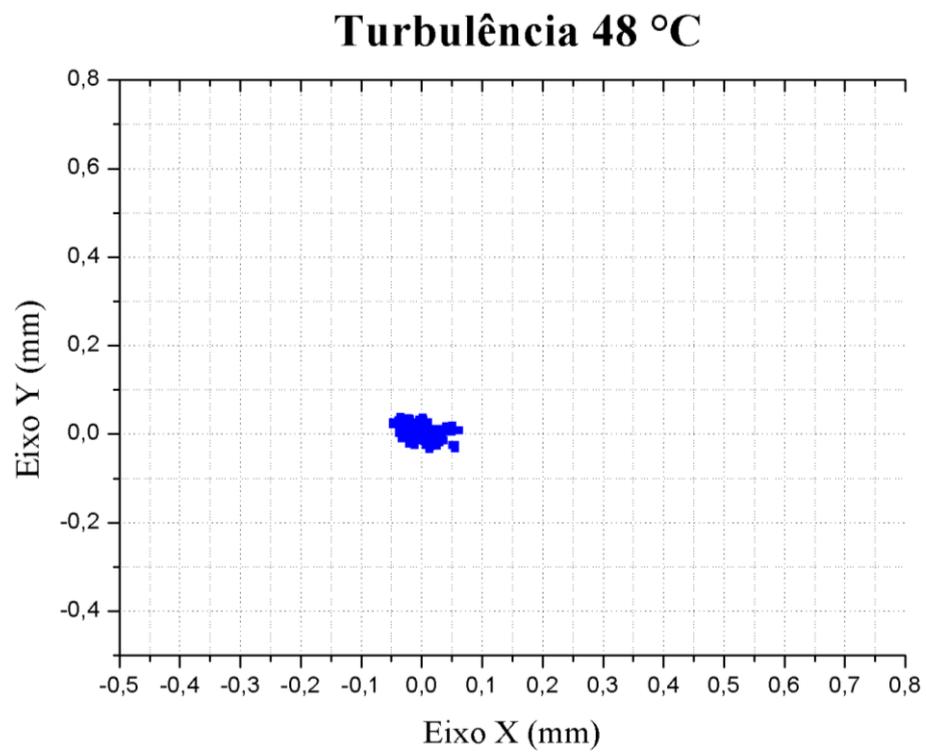


Figura 56: Espalhamento dos centros instantâneos com temperatura da água a 48 °C.

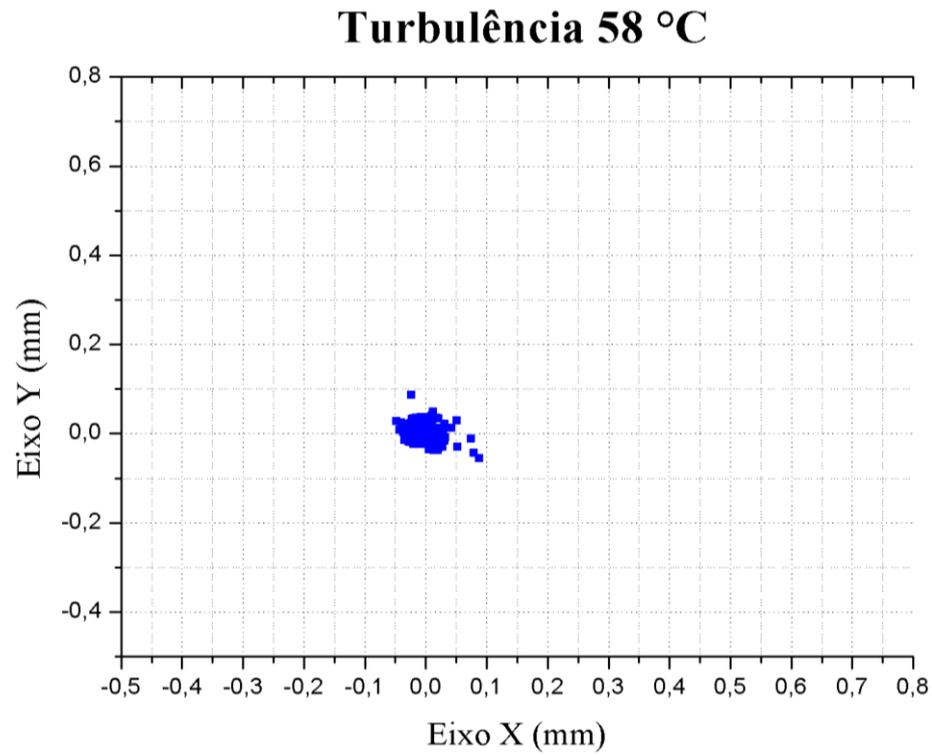


Figura 57: Espalhamento dos centros instantâneos com temperatura da água a 58 °C.

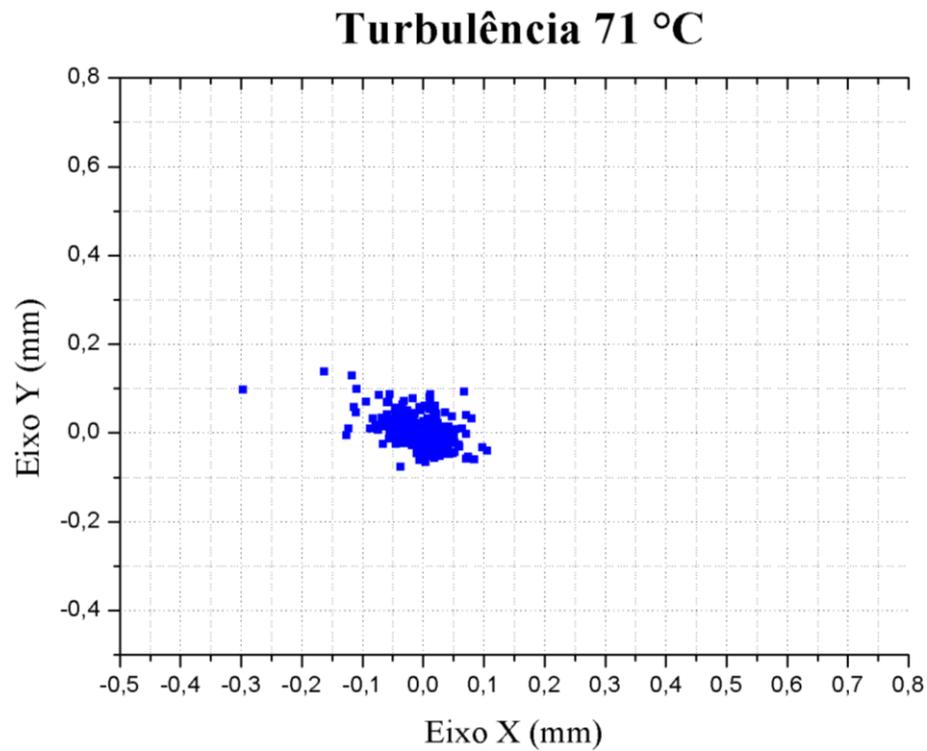


Figura 58: Espalhamento dos centros instantâneos com temperatura da água a 71 °C.

Tabela 8: Valores de Rc por temperatura da água.

Temperatura da água (°C)	Variância de Rc (mm)
23	$1,697 \cdot 10^{-5}$
30	$3,433 \cdot 10^{-5}$
40	0,0001936
48	0,0003545
58	0,0004148
70	0,001657

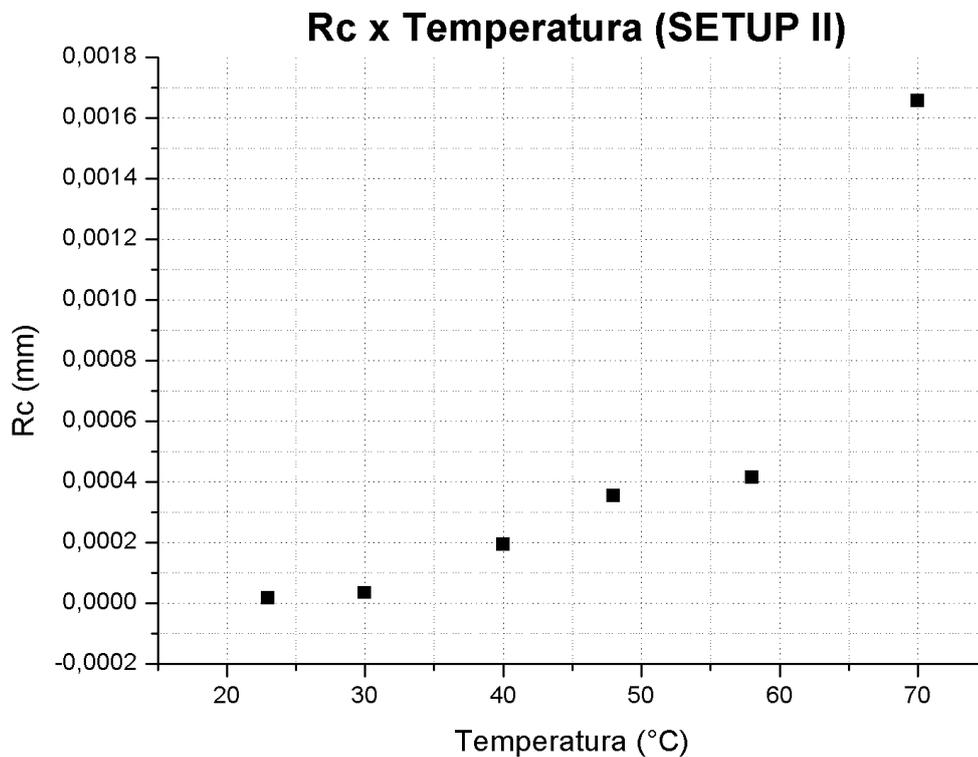


Figura 59: Gráfico de Rc por temperatura do SETUP II.

Analisando os resultados obtidos, por meio das Figuras 53 a 58, verifica-se o aumento da dispersão do centro do feixe óptico à medida que aumenta a temperatura da água. Ao analisar a Tabela 7 conjuntamente com a Tabela 8, verificou-se que, como esperado, a variância de Rc aumenta exponencialmente com a temperatura, assim como o fluxo de vapor d'água. Realizando-se, então, a correlação entre a variância de Rc e o fluxo de vapor d'água, encontra-se o valor de 0,9427,

representando grande relação entre o fluxo de vapor d'água e a turbulência atmosférica. Essa dependência está em consonância com a equação 3.15. Sendo assim, o arranjo experimental foi capaz de discriminar os vários fluxos de vapor d'água por meio da turbulência atmosférica, representada pela variância dos  $R_c$ . Pode-se então afirmar, que é exequível a medida direta da Evapotranspiração por meio da técnica de triangulação de potência, utilizando-se o efeito do *Beam Wander*, causado pela turbulência atmosférica.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a viabilidade de mensurar a evaporação por meio dos efeitos que a turbulência atmosférica geram em um feixe óptico.

Constituiu como fator de maior motivação dessa pesquisa a importância da mensurabilidade da Evapotranspiração para o uso eficiente da água, desta forma foram apresentados os conceitos da ET e os métodos de medidas existentes. Antes de propor o novo método de medida, o leitor foi embasado na teoria relacionada aos efeitos que uma onda eletromagnética pode sofrer ao passar pela atmosfera. Após esse embasamento, foi apresentado a técnica de triangulação de potências utilizada e os resultados alcançados com o arranjo experimental. Com este arranjo foram realizadas as medições dos deslocamentos aleatórios dos centros instantâneos com a presença de vapor d'água. Os resultados demonstraram a forte relação que o coeficiente de estrutura do índice de refração tem com os coeficientes de estrutura de temperatura e umidade. Os valores das correlações obtidas foram de 0,93 no SETUP I e 0,94 no SETUP II.

Em uma perspectiva futura seria interessante a realização de experimentos em campo referenciando com métodos já consagrados, como o lisímetro e o método Penman-Monteith; fazer as medições utilizando um ambiente controlado em

temperatura, umidade, vento e pressão com o intuito de parametrizar o meio experimental; e a produção de estudos na tentativa de associar a medição de outros fluxos de vapor, como o carbono.

## CAPÍTULO 8

### BIBLIOGRAFIA

- [1]. CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W.. *Applied Hydrology*. Nova Iorque, EUA. McGraw-Hill, 1988.
- [2]. ANDRÉ, R. G. B.; VISWANADHAM, Y. Distribuição de energia numa cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Revista Brasileira de Meteorologia*, Brasília, v. 1, n. 1, p. 20-37, 1986.
- [3]. NUNES, A. B.; MARIANO G. L.. *Meteorologia em tópicos volume 2*. Ed. DR Ltda. 2015.
- [4]. LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. - *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1992
- [5]. CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. *Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial*. *Bragantia*, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125- 137, 2000.
- [6]. AFFÉRI, A.; TRENTO, E.; PINTO, R.. *Manual como fazer um Plano Diretor de Irrigação de Canaviais (PDIC)*. Projeto cana pede água
- [7]. ABOUKHALED, A.; ALFARO J. F.; M. Smith. *Lysimeters*. Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
- [8]. BURBA, G.; ANDERSON, D.. *A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements*. Lincoln, Nebraska, EUA. LI-COR Biosciences, 2010.

- [9]. AUBINET, M.; VESALA, T.; Papale, D.. *Eddy Covariance*. Springer, 2012.
- [10]. PEÑA, R. V.; CHÁVEZ, L. T.; NOLASCO, A. Q.; PICHARDO, G. C. *Comparacion de algunos metodos micrometeorologicos para estimar la evapotranspiracion, en el area de montecillo, mexico*. Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, México, 2001.
- [11]. Natural Resources Management and Environment Department. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Corporate Document Repository. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.htm>. Acesso em 27 de dezembro de 2016.
- [12]. MARIANO, D. C.. *Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem e evaporação da água do solo em função de resíduos culturais de soja e trigo*. Maringá-PR, 2013. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, 2013.
- [13]. ALLEN, R. G.. *Crop Evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper Nº 56, 2006.
- [14]. AGUIAR, R. G.. *Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia*. Cuiabá-MT, 2005. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá-MT, 2005.
- [15]. PEÑA, R. V.; CHÁVEZ, L. T.; NOLASCO, A. Q.; PICHARDO, G. C. *Comparacion de algunos metodos micrometeorologicos para estimar la evapotranspiracion, en el area de montecillo, mexico*. Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, México, 2001.
- [16]. MARIN, F. R.. *Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado*. Piracicaba-SP, 2003. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade Federal de São Paulo, Piracicaba-SP, 2003.
- [17]. POISSON, A; FERNANDEZ, A.; PEREZ, D. G.; BARILLE, R.; DUPONT, J.C.. *Thin LASER beam wandering and intensity fluctuations method for evapotranspiration measurement*. Optics & Laser Technology, 80, 2016. 33–40.
- [18]. GENEVA: United Nations Children’s Fund and World Health Organization; 2015. *Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment*. ([http://www.wssinfo.org/fileadmin/user\\_upload/resources/JMP-Update-report-2015\\_English.pdf](http://www.wssinfo.org/fileadmin/user_upload/resources/JMP-Update-report-2015_English.pdf), accessed 5 October 2015).

- [19]. BAIN, R; CRONK, R; HOSSAIN, R. *Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review*. Trop Med Int Health. 2014;9:917–27.
- [20]. MAVI, H. S.; TUPPER, G. J.. *Agrometeorology Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. New York, The Haworth Press, 2004.
- [21]. CARVALHO, D.F. de; OLIVEIRA, L.F.C. de. *Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada*. Viçosa: Ed. UFV, 2012.
- [22]. RAVEN, J. A.; WOLLENWEBER, B. e HANDLEY, L. L.. *A comparison of ammonium and nitrate as nitrogen sources for photolithotrophs*. New Phytol., 1992. 121:19-31.
- [23]. CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C.. *Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa*. Pesquisa Agropecuária Tropical (PAT -e-ISSN 1983-4063), v. 41, n. 3, p. 456-465, jul./set. 2011.
- [24]. BRAS, Rafael L. *Hydrology: an introduction to hydrologic Science*. Califórnia, Estados Unidos: Addison-Wesley, 1990.
- [25]. CAMPECHE, L.F.S.M. *Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.)*. 2002. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- [26]. ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. *Lysimeters*. Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and Drainage, Paper 39).
- [27]. VAREJÃO-SILVA, M. A.. *Meteorologia e climatologia*. Recife, Pernambuco, Brasil. Março de 2006.
- [28]. CARVALHO, L. G.; DANTAS, A. A. A.; NETO, P. C.. *Evapotranspiração*. Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Núcleo de Agrometeorologia e Climatologia, Lavras (MG).
- [29]. ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. *Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, 1998.
- [30]. NEHLS, T., Y.N. Rim, and G. WESSOLEK (2011): *Technical note on measuring run-off dynamics from pavements using a new device: the weighable tipping bucket*. Hydrology and Earth System Sciences, 2011.

- [31]. GRUPO DE RECURSOS HÍDRICOS. *Apostila de hidrologia*. Universidade Federal da Bahia.
- [32]. CABRERA, M. C. M.. *Quantificação da alteração no balanço hídrico devido a cavas de mineração utilizando lisímetros e tanques de evaporação*. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2011.
- [33]. LIMEIRA, R. C., SOUSA F. A. S., BORGES P. F.. *Análise das evaporações estimadas pelo tanque classe A e pelo evaporímetro de Piche*. Paraíba, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. Unidade acadêmica de ciências atmosféricas – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
- [34]. GRACE, J.. *Understanding and managing the global carbon cycle*. Journal of Ecology. Edinburgh, UK, 2004.
- [35]. WILLEBRAND, Heinz; GHUMAN, Baksheesh. *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Estados Unidos da América: Sams, 2002.
- [36]. RANA, G.; KATERJI, N. *Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review*. Eur. J. Agron. 13 (2–3) (2000) 125–153.
- [37]. MEIJNINGER, W. M. L.; HARTOGENSIS, O. K.; KOHSIEK, W.; HOEDJES, J.C.B.; ZUURBIER, R.M.; DE BRUIN, H.A.R.. *Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface – Flevoland field experiment*, *Boundary-Layer Meteorol.* 105 (1) (2002) 37–62.
- [38] DE BRUIN, H. A. R.; VAN DEN HURK, B. J.; KOHSIEK, W.. *The scintillation method tested over a dry vineyard area*, *Boundary -Layer. Meteorol.* 76 (1–2) (1995) 25–40.
- [39] HILL, R.J.; CLIFFORD, S.F.; LAWRENCE, R.S.. *Refractive-index and absorption fluctuations in the infrared caused by temperature, humidity, and pressure fluctuations*. *J. Opt. Soc. Am.* 70 (1980) 1192–1205.
- [40] ANDREAS, E. L.. *Two-wavelength method of measuring path-averaged turbulent surface heat fluxes*, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 6 (1989) 280–292.
- [41] WESELY, M.L.. *The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index*. *J. Appl. Meteor* 15 (1976) 43–49.
- [42] PANOFSKY, H. A.; DUTTON, J. A.. *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1984.

- [43]. ANDREWS, L. C.; PHILLIPS, R. L.. *Laser Beam Propagation through Random Media*. Washington, EUA. Spie Press, 2005
- [44]. F.R. Martins, *Influência do Processo de Determinação da Cobertura de Nuvens e dos Aerossóis de Queimada no Modelo Físico de Radiação BRASIL-SR*. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.
- [45]. CLARK, R. N.. *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy*. John Wiley and Sons, Inc. New York, EUA, 1999.
- [46]. BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D.. *Absorption and scattering of light by small particles*, John Wiley, New York, 1983.
- [47]. Kim, I. I.; et al.. *Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink LASER communication system*. Opt. Eng. 37(12), 1998.
- [48]. GÚBIO, Oliveira; SILVA, Vinicius Nunes Henrique – *Caracterização da constante de estrutura do índice de refração ( $C_n^2$ ) através de triangulação de potências ópticas*. Niterói, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2014.
- [49]. SILVA, Vinicius Nunes Henrique. *Desenvolvimento Experimental de uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre*. Niterói, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2009.
- [50]. ASSIS, Nelson Cevidanes Nascimento. *Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude*. Niterói, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2012.

## **CAPÍTULO 9**

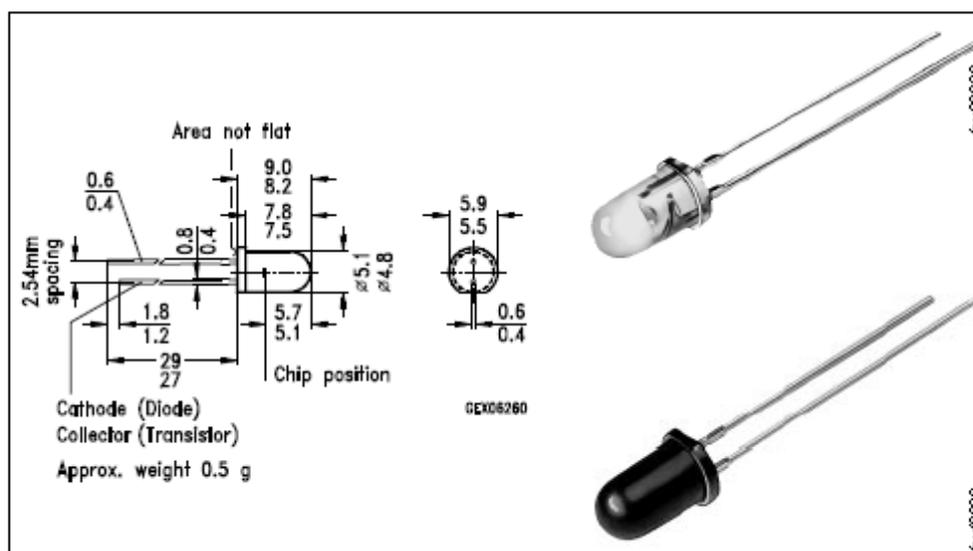
## **ANEXOS**

## Anexo A: Especificações dos fotodetectores SFH213 FA

# SIEMENS

**Neu: Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit**  
**New: Silicon PIN Photodiode with Very Short**  
**Switching Time**

**SFH 213**  
**SFH 213 FA**



Maße in mm, wenn nicht anders angegeben/Dimensions in mm, unless otherwise specified.

### Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 400 nm bis 1100 nm (SFH 213) und bei 880 nm (SFH 213 FA)
- Kurze Schaltzeit (typ. 5 ns)
- 5 mm-Plastikbauform im LED-Gehäuse
- Auch gegurtet lieferbar

### Features

- Especially suitable for applications from 400 nm to 1100 nm (SFH 213) and of 880 nm (SFH 213 FA)
- Short switching time (typ. 5 ns)
- 5 mm LED plastic package
- Also available on tape