ANÁLISE DA TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS APLICADA A ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Gúbio de Oliveira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, e Universidade Federal Fluminense, UFF, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Instrumentação Óptica.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra

Niterói
Dezembro/2019

ANÁLISE DA TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS APLICADA A ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, e Universidade Federal Fluminense, UFF, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Instrumentação Óptica.

Gúbio de Oliveira

Banca Examinadora:

_____

Presidente: Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva (UFF)

_____

Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra (UFRRJ)

_____

Prof. Dr. Andrés Pablo Lopéz Barbero (UFF)

_____

Prof. Dr. Carlos Rodrigues Pereira (UFRJ)

_____

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa (UFPA)

_____

Prof. Dr. Daniel Andres Rodrigues (UFRJ)

Niterói
Dezembro/2019

Dedico este trabalho àqueles que acreditaram em mim,
mesmo quando eu já não acreditava.

RESUMO

ANÁLISE DA TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS APLICADA A ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração é constituída pela transpiração das plantas e pela evaporação da água do solo. O entendimento deste fenômeno auxilia no planejamento do manejo das culturas, possibilitando uma irrigação otimizada, evitando o desperdício de água. A evapotranspiração ocorre devido ao processo de transporte de vapor de água da superfície para a atmosfera, ocasionado pelo fluxo de calor latente, devido à absorção de energia solar. Para realizar a estimativa deste fluxo existem vários métodos, entre eles o de razão de Bowen e da constante de estrutura do índice de refração. Ambos métodos foram explorados neste trabalho, por se apresentarem eficientes e amplamente difundidos e aceitos.

O método da constante do índice de refração se baseia nas medidas das flutuações do índice de refração devidas ao fluxo de calor sensível ocasionado pelo aquecimento do ar subjacente ao solo e às plantas. Sabendo-se, então, que parte da energia solar foi absorvida pelo solo e outra parte é responsável pelo fluxo de calor sensível, pode-se realizar um balanço de energia e estimar o fluxo de calor latente. Tendo em vista esta dinâmica, a determinação do fluxo de calor sensível é realizada medindo-se a turbulência atmosférica.

A turbulência atmosférica apresenta três efeitos sobre um feixe de luz que atravessa a atmosfera: a cintilação, o alargamento do feixe óptico e a divagação do feixe óptico (*beam wander*). Os equipamentos comerciais baseiam-se na cintilação e são denominados cintilômetros. Neste trabalho, foi utilizada a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas que leva em consideração o fenômeno do *beam wander*, onde, utilizando-se três fotodetectores, é possível triangular a posição instantânea do feixe óptico e sua variação. Quanto maior a variação desta posição, maior será a turbulência atmosférica.

Para provar o conceito desta utilização da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas foram realizados experimentos que verificaram sua efetividade na medida de turbulência atmosférica e a análise, em campo, das condições necessárias à sua aplicação para a estimativa do calor sensível.

Como resultados alcançados verificam-se medidas reais de vaporização de água em laboratório que quando comparadas aos fluxos de calor latente levantados em campo, apresentam curvas semelhantes, demonstrando a aplicabilidade da Técnica para estimativas de evapotranspiração. Adicionalmente, foram levantadas as condições necessárias à utilização da Técnica em campo, por meio de medidas realizadas com um cintilômetro e uma estação micrometeorológica instalados na Reserva Ecológica de Guapiaçu (RJ).

Palavras-chave: Evapotranspiração, turbulência atmosférica, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, *beam wander*.

ABSTRACT

ANÁLISE DA TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS APLICADA A ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Evapotranspiration consists of the transpiration of plants and the evaporation of water from the soil. Understanding this phenomenon helps in the planning of crop management, allowing for optimal irrigation, avoiding water waste. Evapotranspiration occurs due to the process of transporting water vapor from the surface to the atmosphere, caused by latent heat flux, due to the absorption of solar energy. To estimate this flow there are several methods, including the Bowen ratio and the refractive index structure constant. Both methods were explored in this work, as they are efficient and widely disseminated and accepted.

The refractive index constant method is based on measurements of refractive index fluctuations due to the sensitive heat flux caused by the heating of the air underlying the soil and plants. Knowing, then, that part of the solar energy has been absorbed by the ground and another part is responsible for the sensible heat flux, one can perform an energy balance and estimate the latent heat flux. In view of this dynamics, the determination of the sensible heat flux is performed by measuring the atmospheric turbulence.

Atmospheric turbulence has three effects on a beam of light passing through the atmosphere: scintillation, widening of the optical beam, and beam wander. Commercial equipment is based on scintillation and is called scintillometers. In this work, the Optical Power Triangulation Technique was used, which takes into account the beam wander phenomenon, where, using three photodetectors, it is possible to triangulate the instantaneous position of the optical beam and its variation. The greater the variation of this position, the greater the atmospheric turbulence.

Atmospheric turbulence has three effects on a beam of light passing through the atmosphere: scintillation, widening of the optical beam, and beam wander. Commercial equipment is based on scintillation and is called scintillometers. In this work, the Optical Power Triangulation Technique was used, which takes into account the beam wander phenomenon, where, using three photodetectors, it is possible to triangulate the instantaneous position of the optical beam and its variation. The greater the variation of this position, the greater the atmospheric turbulence.

To prove the concept of this use of the Optical Power Triangulation Technique, experiments were carried out to verify its effectiveness in the measurement of atmospheric turbulence and the field analysis of the conditions necessary for its application to estimate the sensitive heat.

As results achieved, there are real measurements of water vaporization in the laboratory, which, when compared to the latent heat flows surveyed in the field, present similar curves, demonstrating the applicability of the technique for evapotranspiration estimates. In addition, the necessary conditions for using the technique in the field were

raised, through measurements made with a scintillometer and a micrometeorological station installed in the Ecological Reserve of Guapiaçu (RJ).

Key words: Evapotranspiration, atmospheric turbulence, latent heat flow sensitive heat flow, beam wander.

Índice de Figuras

Figura 1 Representação gráfica do vento ao passar de uma região de pequena rugosidade para uma mais rugosa, evidenciando a transição do fluxo de ar do regime laminar para o turbulento, assim como o perfil de vento aumentado nas regiões turbulentas..... 19
Figura 2 - Representação da Cascata de Energia apresentando vórtices maiores próximos à entrada de energia, delimitando a escala externa e os vórtices menores na escala interna..... 21
Figura 3 - Gráfico C_n^2 x Tempo, apresentando o perfil de turbulência para um dia claro.. 26
Figura 4 - Representação da cintilação. (a) ilustração do feixe óptico ao passar por uma área de células de turbulência muito menores que o feixe óptico. (b) imagem da projeção do feixe óptico no plano do receptor. 27
Figura 5 *: Efeito do Beam Wander sobre a propagação da luz (a). Alteração do posição do spot de luz no plano do receptor (b).* 29
Figura 6 - Representação do modelo de divagação do feixe, evidenciando o Termo longo e o Termo curto que compõe o fenômeno..... 30
Figura 7 - Representação do em uma distribuição de potência óptica Gaussiana..... 31
Figura 8 - Representação dos perfis atmosféricos, onde de verifica a esquerda no alto o perfil neutro, na esquerda abaixo o perfil estável, na direita acima o perfil instável e por fim a comparação entre estes perfis. 38
Figura 9 – Imagem satélite da área onde foram instalados os instrumentos (REGUA) ... 52
Figura 10 -*: Foto do cintilômetro Scintec BLS 450 instalado na área de medidas.* 54
Figura 11 -Perfil de evapotranspiração no dia 25 de outubro de 2019 55
Figura 12 - Evapotranspiração estimada pelo cintilômetro em 26 de outubro de 2019 . 55
Figura 13 - Evapotranspiração estimada pelo cintilômetro em 27 de outubro de 2019 . 56
Figura 14 - Perfil de turbulência medida pelo cintilômetro em 25 de outubro de 2019 . 57
Figura 15 - Perfil de turbulência medida pelo cintilômetro em 26 de outubro de 2019 57
Figura 16 - Perfil de turbulência medida pelo cintilômetro em 27 de outubro de 2019 58
Figura 17 - Gráfico de dispersão do fluxo de calor latente e da turbulência atmosférica no dia 25 de outubro de 2019. 59
Figura 18 - Gráfico de dispersão do fluxo de calor latente e da turbulência atmosférica no dia 26 de outubro de 2019. 59
Figura 19 - Figura 5-9: Gráfico de dispersão do fluxo de calor latente e da turbulência atmosférica no dia 27 de outubro de 2019. 60
Figura 20 - Foto da estação micrometeorológica instalada na área de medidas, evidenciando os quatro anemômetros e três termo higrômetros..... 61
Figura 21 - Perfil de evapotranspiração levantado com o uso da razão de Bowen em 25 de outubro de 2019 62

Figura 22 - Perfil de evapotranspiração levantado com o uso da razão de Bowen em 26 de outubro de 2019 62
Figura 23 - Perfil de evapotranspiração levantado com o uso da razão de Bowen em 25 de outubro 63
Figura 24 - Gráfico de dispersão dos dados de fluxo de calor latente entre o cintilômetro e a razão de Bowen. 64
Figura 25 - Posição da Gaussiana no momento t (a); Posição da Gaussiana no momento t+Δt 65
Figura 26 - Arranjo contendo 4 fotodetectores em um anteparo 66
Figura 27 - Posição dos fotodetectores no anteparo. 67
Figura 28 - Gráfico do aumento do diâmetro do feixe óptico com a distância. 73
Figura 29 - Atenuação sofrida pelo sinal óptico ao se propagar por uma distância de 100 m. 74
Figura 30 - Atenuação do sinal de 250mW ao se propagar por 300m. 74
Figura 31 - Alteração da distância dos fotodetectores com o aumento da distância entre o receptor e o transmissor. 75
Figura 32 - Alteração da resolução calculada com o aumento da distância do transmissor para o receptor. 77
Figura 33 Alteração do tamanho médio dos vórtices turbulentos com a temperatura. . 78
Figura 34 Alteração da variação do tamanho médio dos vórtices turbulentos com a temperatura. 79
Figura 35 - Variância da posição do feixe óptico com a alteração da turbulência atmosférica; 80
Figura 36 - Arranjo experimental apresentando o transmissor, o receptor e a fonte de turbulência. 82
Figura 37 - Variação da taxa de vaporização em relação à temperatura. 83
Figura 38 - Variância de rc em relação à temperatura. 84
Figura 39 - Dispersão dos centros instantâneos do feixe na medida menos turbulenta (medidas em mm). 85
Figura 40 - Dispersão dos centros instantâneos do feixe na medida menos turbulenta (medidas em mm). 85
Figura 41 - Taxa de vaporização em função da variância de rc. 86

Sumário

1. Introdução 10
2. Turbulência 17
2.1. Turbulência 17
2.2 Turbulência Atmosférica 19
2.2.1. Modelo geral da cintilação 27
2.2.2. Modelo geral da divagação do feixe 28
2.2. Termodinâmica atmosférica 33
2.2.1. Propriedades aerodinâmicas 33
3. Evapotranspiração 41
3.1. Métodos de Medida da ET 43
4. Materiais e métodos 51
4.1 Dados do cintilômetro e da estação micrometereológica 51
4.1.1. Cintilômetro 52
4.1.2. Método da Razão de Bowen 60
4.1.3 Comparação dos dados do cintilômetro e da estação micrometeorológica 63
4.2. Técnica de Triangulação de Potências Ópticas 64
4.2.1. Análise das condições micrometeorológicas da REGUA para utilização da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas 71
4.2.2. Medidas de vaporização em laboratório e comparação com dados levantados em campo 81
5- Conclusão 88
Bibliografia 90

1. Introdução

A preocupação com o meio ambiente, biomas e ecossistemas têm trazido à tona temas importantes para a vida humana como o ciclo hidrológico e o manejo sustentável da água. O ciclo hidrológico determina a transferência da água da atmosfera para a Terra em forma de precipitação e sua evaporação e, ou transpiração (evapotranspiração) de volta para a atmosfera. O equilíbrio deste ciclo é determinante para vida humana, o que possibilita a distribuição da água na superfície da Terra, a produção agropecuária, a ocorrência dos fenômenos atmosféricos e da própria temperatura do ar. Um fenômeno determinante para o ciclo hidrológico é a evapotranspiração (ET), sendo então de elevada relevância para o entendimento dos processos atmosféricos e do manejo de água [1].

A ET é um processo composto pelo fenômeno da evaporação da água do solo, rios e mares, assim como pela transpiração das plantas. Este fenômeno só é possível devido ao transporte de calor, umidade e momentum na interface superfície-atmosfera. Estes processos sofrem influência de elementos meteorológicos, da cobertura vegetal e da umidade do solo, o que demonstra a complexidade para sua mensuração. As medidas de ET podem ser realizadas de forma direta ou indireta. Entre os métodos de medida direta destaca-se o lisímetro, e entre os métodos de medida indireta estão os micrometeorológicos (covariância de vórtices turbulentos, aerodinâmico , e o balanço de energia-razão de Bowen, os baseados no balanço hídrico, os modelos físico-fisiológicos (Penman Montheith) ou empíricos (tanque classe A e os métodos ópticos (método da constante de estrutura do índice de refração do ar) [1].

Neste trabalho, os dois principais métodos estudados foram o do Balanço de Energia - Razão de Bowen (BERB) e o da constante do índice de refração. O primeiro considera a relação entre os fluxos de calor sensível e latente, tendo em vista os fenômenos de transporte suportados por processos aerodinâmicos. Este método é largamente aceito tendo em visto sua possibilidade de realizar estimativas precisas em escalas sub-horárias. O segundo se baseia na inteiração da luz com as propriedades atmosféricas da região por onde esta se propaga, notoriamente a turbulência atmosférica. A maioria dos métodos

possibilita a realização de estimativas de forma pontual amostrando uma pequena área, com exceção do equipamento comercial denominado cintilômetro, baseado no método da constante do índice de refração, que é capaz de medir áreas de quilômetros quadrados.

Assim, para medir a turbulência atmosférica e aplicar o método da constante do índice de refração, utilizou-se a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas, desenvolvida pelo Laboratório de Comunicações Ópticas (LACOP) da Universidade Federal Fluminense [2]. Esta Técnica se vale de um dos efeitos da turbulência sobre a luz propagante, a divagação do feixe óptico ou *beam wander.* O LACOP desenvolveu, então, um instrumento para a medida de turbulência atmosférica baseado na Técnica de Triangulação Óptica que foi testado com sucesso. Este instrumento tem como vantagens principais o baixo custo, a possibilidade de medir grandes áreas, além da inovação da utilização do efeito do *beam wander* para estimativa da ET.

O objetivo deste trabalho foi demonstrar que a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas pode ser aplicada para estimar o fluxo de calor latente, ou seja, a evapotranspiração. Para tanto, realizou-se a análise da aplicação da Técnica por meio dos dados levantados em campo, na Reserva Ecológica de Guapiaçu, no estado do Rio de Janeiro, com o auxílio de um cintilômetro e uma estação micrometeorológica. Foram, então, aplicados os métodos da constante do índice de refração e razão de Bowen, tendo como resultado a verificação da correlação entre a turbulência atmosférica e os fluxos de calor sensível e latente, demonstrando a possibilidade de utilização da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas para a estimativa da evapotranspiração. Além disso, foram calculadas seis condições necessárias à utilização futura do instrumento desenvolvido em bancada, em campo: diâmetro do feixe adequado, potência óptica suficiente no plano do receptor, distância adequada dos fotodetectores, resolução do instrumento para as condições de diâmetro do feixe e ruído encontrados, cálculo do tamanho dos vórtices turbulentos e verificação da existência de *beam wander*, resolução do instrumento adequada e por fim o a comparação da variância da posição do feixe óptico provocada pela turbulência medida pelo cintilômetro com valores levantados nos

experimentos anteriores a este. Todos estes dados confirmam a possibilidade da utilização do instrumento derivado da referida Técnica para a estimativa da ET. Por fim, verificou-se a relação entre as medidas de vaporização realizadas em laboratório e os dados levantados de fluxo de calor latente em campo. Como resultado verificou-se que ambos fluxos apresentam curvas características similares comprovando a aplicabilidade da Técnica para medir evapotranspirtação.

Revisão Bibliográfica

No primeiro trabalho estudado, o autor analisa a discrepância entre as estimativas realizadas por meio dos modelos SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e Ts-VI (Spacial Variability-based Surface Temperature- Vegetation Index) foi investigada na estação Yucheng na China. Os modelos SEBAL utilizam dados de satélite e transformam os pixels recebidos em informações de umidade, cada um com sua respectiva modelagem. Os resultados mostram que o SEBAL apresenta melhores valores de calor latente (ET) que o Ts-VI quando comparados com o LAS baseado em terra. Isso deve-se ao fato do Ts-VI apresentar excessiva simplificação em sua parametrização, determinando, então, a necessidade de incorporação de parâmetros como por exemplo a variação espacial da energia na superfície [3].

Em outro trabalho, verfica-se que os dois métodos mais comumente usados para medir as taxas de evapotranspiração são os métodos de balanço de energia da razão Bowen (BREB) e os métodos de correlação de Eddy (CE). Por outro lado, variáveis meteorológicas podem ser usadas para calcular as taxas de evapotranspiração. Os dois métodos mais utilizados para esse fim são a equação da combinação de Penman-Monteith (PM) e a aproximação de Priestley-Taylor (PT). O objetivo deste artigo é comparar esses diferentes métodos em condições não ideais, mais especificamente para uma pastagem em declive úmido. Os fluxos de calor latentes baseados em BREB e CE são comparados, e é encontrada uma boa concordância entre as estimativas dos dois métodos. Uma comparação

entre os resultados dos métodos MP e PT e os fluxos de calor latentes medidos é então realizada. Foi observado um forte ciclo anual nos valores calculados para o fator PTalfa , com um valor médio anual de 1,21 0,79. Esse ciclo anual está relacionado ao ciclo anual de umidade do solo, que pode ser avaliado pela umidade do solo ou pelo déficit de vapor do ar. Também foi observado um forte ciclo anual nas resistências de superfície invertida. Foi encontrada uma relação entre as resistências invertidas da superfície e em que os valores mais altos coincidem com baixas resistências da superfície e vice-versa

A comparação entre medidas de evapotranspiração (ET) realizadas por meio de LAS, EC e SEBS foi realizada na região heterogênea de Qianyanzhou, na China. O LAS foi instalado a 21,9m e seu receptor e transmissor ficaram separados por 1007m, enquanto o EC foi instalado a 23 m de altura. O experimento analisou a representação espacial do LAS ao observar o fluxo de calor para uma região complexa e heterogênea. Em seguida, verificou-se a performance do modelo SEBS aplicado também à uma superfície complexa e os valores encontrados foram comparados com aqueles adquiridos pelo LAS e EC. Os resultados mostraram que os dados do LAS são mais estáveis que os do EC, mesmo para regiões complexas e que os valores de calor sensível são menores no LAS, devido ao seu footprint ser maior e cobrir áreas com maior evapotranspiração que o EC. O SEBS calculou valores maiores de calor latente que o LAS, e subestimou os valores de calor sensível, apesar disso, os fluxos turbulentos do SEBS foram mais próximos daqueles encontrados pelo LAS do que pelo EC [4].

Também no campo das medidas de ET, encontra-se um trabalho que realizou as medidas de fluxo de calor sensível provenientes de um LAS, EC e Surface Temperature-Resistance (STR) foram comparadas em um experimento conduzido em Xiaotangshan, na China. A região considerada foi uma fazenda cuja produção ordinária é milho, caracterizando um campo de medidas homogêneo. O STR é um modelo aplicado a dados de temperatura para o sensoriamento remoto e cálculo de fluxo de calor sensível. O LAS foi instalado a 4,2m de altura e a distância entre o transmissor e receptor foi de 970m. O EC foi instalado no centro do campo a 2 m do solo. As medidas foram conduzidas a uma

frequência de amostragem de 0,5 Hz para o LAS e 20 Hz para o EC. Como resultado foi verificado que as medidas de fluxo de calor sensível encontradas pelos três métodos apresentaram altas correlações, sendo de 0,89 entre o STR e o EC e de 0,86 entre o STR e o LAS.. Uma observação notória dos autores indica que o LAS não discrimina o fluxo ascendente do descendente, sendo assim, não há como saber a direção da fonte de turbulência [5].

Na mesma linha da medida de ET por meio do calor sensível, realizou-se o levantamento de dados da região de Xiaotangshan, na China. As medidas foram realizadas por meio de três métodos diferentes: a razão de Bowen, o LAS e o EC. A região foi considerada homogênea e de solo nu. Foram utilizados dois LAS instalados a 4 m metros de altura do solo com distância de 940 m entre o receptor e o transmissor. E o EC foi instalado no meio do terreno visando equalizar as medidas. Como resultado foram encontradas as seguintes correlações nas medidas de calor sensível: LAS e razão de Bowen 0,89; LAS e EC 0,94; EC e razão de Bowen 0,86 [6].

Por fim, outro trabalho realizou o mapeamento da evapotranspiração (ET) diária da Baia de Pyne, na França, foi realizado durante 15 meses, por meio de dois métodos: Hydrus-Id e S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*). Os dados levantados foram comparados a fim de validar o método S-SEBI. O método Hydrus-Id é baseado no uso de dados micrometereológicos adquiridos em terra, como a temperatura do ar, a velocidade do vento, a umidade relativa, irradiação solar e o saldo de radiação. O modelo S-SEBI é baseado em imagens satélite adquiridas pelo equipamento ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). No S-SEBI os pixels das imagens são tratados, considerando-se as temperaturas máxima, mínima e encontrada, além do albedo da área. A Baia de Pyne conta com 65 km^2 e é composta de monocultura de uvas, oliva e trigo, floresta e zonas urbanas, sendo assim, esta região foi considerada heterogênea. Para o levantamento micrometereológico em terra, foram utilizadas sete estações posicionadas espalhadas pela região, fornecendo informações que foram tratadas

pelo Hydrus-ID. Os valores de ET encontrados por ambos os métodos apresentaram boa correlação com RMS relativo de 23% [7].

Este trabalho explorou a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas para medir, por meio do efeito *beam wander*, a turbulência atmosférica e aplicar o método da constante do índice de refração e o balanço de energia para estimar a evapotranspiração. Como resultado obteve-se a medida de turbulência e a análise da possibilidade de estimativa de turbulência atmosférica após o levantamento de todas as condições necessárias para levar a cabo esta estimativa. Todos os requisitos para a estimativa da ET foram constatados, faltando, então, realizar a medida da turbulência em campo e sua comparação com os valores de ET de outros equipamentos.

Motivação

Verifica-se que o método de razão de Bowen realiza uma estimativa pontual (as medidas devem ser realizadas em na camada limite de equilíbrio/fluxo constante), e que o cintilômetro permite estimativa em um transecto, dessa forma espera-se que o cintilômetro seja mais representativo de uma extensa área. O Bowen, utilizado com frequência em cultivos agrícolas, extensas áreas homogêneas, por outro lado, o cintilômetro é utilizado em áreas urbanas, com múltiplas funções (urbano, solo nu, água, culturas agrícolas e floresta) apresentando resultados satisfatórios para modelos hidrológicos e meteorológicos.

Assim, estas técnicas para a determinação da ET são, invariavelmente de alto custo (centenas de milhares de dólares), além de realizarem medidas pontuais, Verifica-se, desta forma, a necessidade de desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e fácil manejo, que possam realizar medidas de áreas extensas. Face o exposto, a utilização de uma nova técnica, comprovadamente eficaz de estimativa de turbulência, e por conseguinte de ET, torna-se imperiosa.

Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução e a motivação deste trabalho.. O Capítulo 2 apresenta a teoria relacionada à turbulência atmosférica, apresentando as teorias a respeito da turbulência atmosférica e termodinâmica atmosférica. O terceiro capítulo apresenta informações a respeito da evapotranspiração, sua definição, componentes e técnicas de medida e estimativa. No Capítulo 4 são expostos os métodos e materiais utilizados durantes as medidas de campo, apresentando o local das medidas, o cintilômetro, a estação micrometeorológica e o instrumento baseado na Técnica de Triangulação de Potências Ópticas e seus resultados. Por fim o Capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho.

2. Turbulência

O método de estimativa de evapotranspiração proposto neste trabalho baseia-se na relação existente entre a turbulência atmosférica e os fluxos de calor sensível e latente devidos aos fenômenos termodinâmicos existentes na atmosfera. Sendo assim, os seguintes assuntos envolvendo a turbulência foram abordados neste capítulo visando o entendimento do método proposto: Turbulência geral, a relação entre a turbulência e a termodinâmica atmosférica e medidas de turbulência atmosférica.

2.1. Turbulência

O estudo da turbulência inicia-se na disciplina conhecida como mecânica dos fluidos, onde se entende que os fluidos podem ser considerados como viscosos ou não viscosos, porém, para este estudo serão considerados apenas fluidos viscosos [8].

Os fluidos viscosos podem apresentar dois tipos de escoamento: laminar ou turbulento. O fluxo laminar é aquele em que as partículas do fluido se deslocam em suaves camadas, umas sobre as outras. O fluxo turbulento ocorre quando as partículas do fluido se misturam rapidamente ao longo do movimento em processos aleatórios.

A velocidade do escoamento laminar é unidirecional, por exemplo u, porém, no escoamento turbulento, a velocidade é dada por uma média $\bar{u}$ somado às flutuações aleatórias u' , v', w', nas três direções Cartesianas.

As equações que descrevem o movimento de um fluido foram propostas por Navier-Sotkes em 1827, porém apresentam difíceis soluções matemáticas, tornando quase inviáveis os estudos teóricos. Sendo assim, Prandtl demonstrou que muitos fluxos viscosos podem ser analisados dividindo-se em duas partes, a primeira próxima à fonte geradora da turbulência e a segunda no restante no fluido. Na primeira região, os efeitos da viscosidade apresentam-se importantes, caracterizando-se a camada limite, porém, no restante os efeitos da viscosidade são menos importantes e o fluido pode ser considerado não viscoso.

Então, o conceito de camada limite possibilita preencher o que faltava entre a teoria e a pratica, permitindo a solução de fluidos viscosos que seriam impossíveis com a aplicação das equações de Navier-Stokes ao fluido como um todo. Esta camada limite apresenta-se, principalmente, sobre superfícies planas, como asas de aviões, navios e terrenos planos. Sendo assim, considerando o fluxo sobre uma superfície plana infinita, sua velocidade pode ser representada por U. Esta velocidade será constante fora da camada limite, caracterizando um fluido não viscoso e incompressível, com a pressão também constante. Dentro da camada limite, porém, o fluxo será laminar durante uma pequena distância, ocorrendo a transição para o fluxo turbulento gradativamente, até que todo o fluxo se torne turbulento. Para fluidos incompressíveis, na ausência de transferência de calor, a transição entre o fluxo laminar e turbulento, dentro da camada limite, pode ser relacionada com o número de Reynolds. Pode-se afirmar que um calor típico para o número de Reynolds onde ocorre a transição é de 500.000.

A altura da camada limite de uma área turbulenta, no caso da cobertura vegetal influencia o deslocamento do ar por conta de sua rugosidade, depende da distância que o ar se deslocou para dentro da área coberta. Quando o ar se desloca de uma região menos rugosa, por exemplo, solo nu, para uma mais rugosa, por exemplo, um cultivo de milho, o ar é desacelerado a medida em que penetra na cultura. Assim, a camada limite que existia sobre o solo nu é perturbada pela mudança de rugosidade da vegetação, modificando a forma com o fluxo se desloca. A medida em que o deslocamento continua, a camada limite vai se reajustando até atingir um novo equilíbrio. Percebe-se então que a camada limite tem dependência com o tamanho da área a ser estudada. A Figura 1 apresenta uma representação do fenômeno [9].

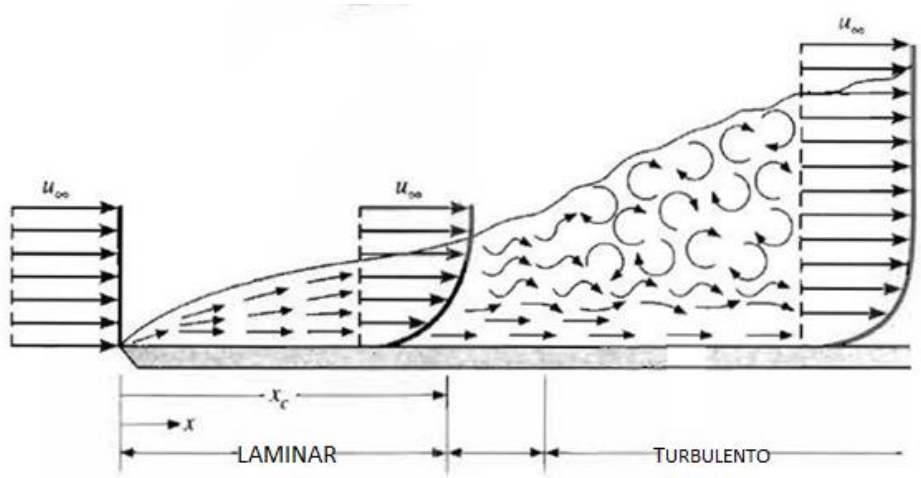


Figura 1 Representação gráfica do vento ao passar de uma região de pequena rugosidade para uma mais rugosa, evidenciando a transição do fluxo de ar do regime laminar para o turbulento, assim como o perfil de vento aumentado nas regiões turbulentas.

Para a determinação da camada limite (δ) e da bordadura, que na verdade é a distância que o ar tem que penetrar em determinada área para que a camada limite seja considerada equilibrada, deve-se considerar a altura média da vegetação (h_v). Quanto maior for a vegetação, tanto maior será a perturbação gerada na camada limite, pois maior será a resistência imposta ao deslocamento do ar, como consequência, verifica-se aumento na altura da camada limite. Estas duas grandezas se relacionam pela equação [10]:

$$\delta = 0{,}15 z_0^{0,2} x^{0,8} + d \qquad (2\text{-}26)$$

em que δ, *h* e *x* estão em metros.

2.2 Turbulência Atmosférica

A atmosfera terrestre é composta de moléculas de gases e pequenas partículas em suspensão. A luz interage com estes componentes dando origem a uma gama de fenômenos que influenciam sua propagação, tais como a turbulência, absorção e espalhamento. A

absorção e o espalhamento são dependentes do comprimento de onda e dão origem, principalmente, à atenuação. A turbulência atmosférica tem sua origem na alteração aleatória do índice de refração do meio e traz como consequências a divagação e o alargamento do feixe, além da cintilação.

Considerando-se a atmosfera um fluido viscoso, a turbulência sofrida é um processo fundamentalmente não linear e governado pelas equações de Navier-Stokes. Por conta da dificuldade de soluções de tais equações, Kolmogorov, em 1941, sugeriu uma subclasse de vórtices, que por possuírem a consistência estatística necessária, podem receber um tratamento teórico simplificado. Estes vórtices são gerados próximos às superfícies aquecidas, geralmente o solo, e apresentam grandes dimensões, na ordem de metros. À medida que o observador se afasta do solo, são encontrados vórtices menores, com dimensões na ordem de milímetros. A região onde são encontrados os menores vórtices foi denominada de escala interna (l_0) e a região que apresenta os maiores vórtices de escala externa (L_0). Entre l_0 e L_0 é encontrada a subescala inercial onde as variações das médias do índice de refração ocorrem de forma lenta, podendo-se, então, considerar uma única média para toda a subescala, o que facilita o tratamento estatístico das variações

Cabe ressaltar que os fenômenos de cintilação e *beam wander* estão relacionados ao tamanho das células de turbulência, ou seja, dos vórtices. Assim, nas regiões mais distantes do solo, onde os vórtices são pequenos, predomina a cintilação e a nas regiões mais próximas do solo, o predomínio é do *beam wander.* A teoria de cascata de energia Figura 2 ilustra a subescala inercial (L_0, l_0)[11].

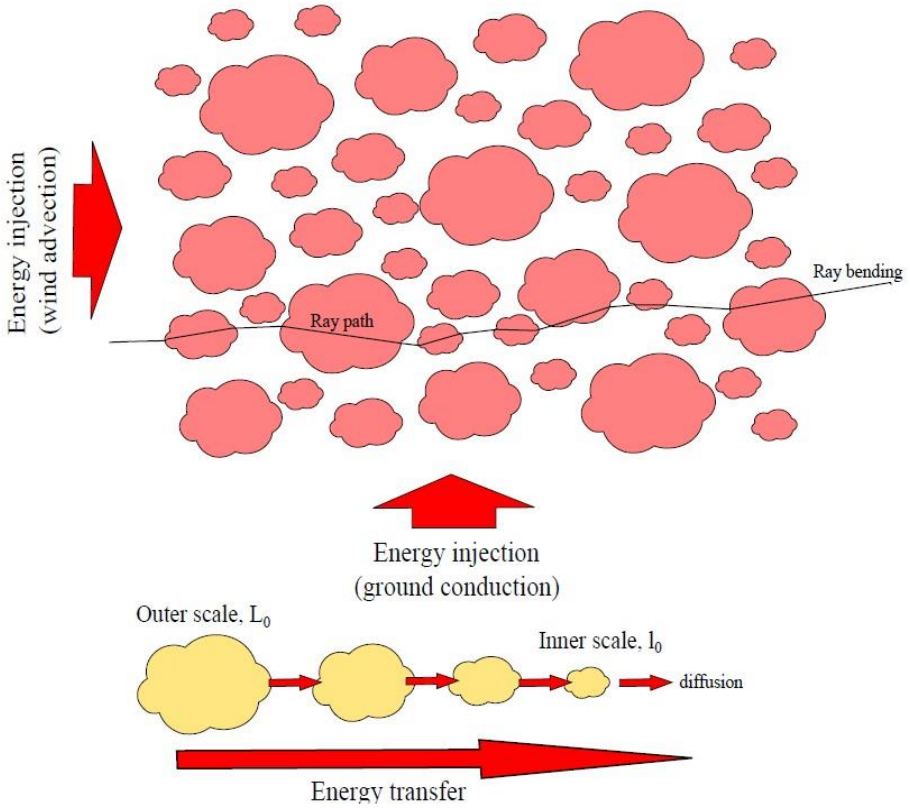


Figura 2 - Representação da Cascata de Energia apresentando vórtices maiores próximos à entrada de energia, delimitando a escala externa e os vórtices menores na escala interna.

A taxa de dissipação de calor do meio, ϵ, é determinada pela escala interna, l_0, e pela velocidade das células, $\mathcal{V}o$, como segue:

$$\boldsymbol{\epsilon} \approx \frac{\boldsymbol{\nu v_0^2}}{\boldsymbol{l_0^2}} \tag{2-1}$$

A equação acima é genérica e pode ser aplicada a qualquer tamanho de escala. Percebe-se que as flutuações na temperatura e velocidade, em campos turbulentos, são determinadas apenas pelo tamanho da escala dos vórtices e pela dissipação de energia. A

energia transferida em cada escala, l_0 , considerando-se a velocidade $\mathcal{V}_l$, para a próxima escala é dada por

$$\boldsymbol{\epsilon} \approx \frac{\boldsymbol{v_0^3}}{\boldsymbol{l_0}} \tag{2-2}$$

Combinando as duas equações e eliminando $\mathcal{V}_0$ tem-se o valore teórico da escala interna:

$$l_0 \approx \eta \approx \sqrt[4]{\frac{v_0^3}{\epsilon}} \tag{2-3}$$

A dependência inversa da escala interna com a taxa de dissipação como apresentando na equação acima, demonstra que turbulências intensas têm escalas internas pequenas e que o inverso ocorre com turbulências fracas. Porém, a escala externa L_0 é proporcional a $\epsilon^{1/2}$, assim, cresce ou decresce diretamente com a intensidade da turbulência.

O tratamento estatístico das flutuações espaciais do índice de refração e da temperatura depende da existência de homogeneidade estatística e de uma média para todo o intervalo espacial estudado. Porém, as médias variam em breves intervalos espaciais, o que dificulta o tratamento estatístico. Notadamente, se forem discriminados intervalos pequenos de distância entre os pontos de observação, encontra-se uma homogeneidade estatística localizada. Nestes intervalos a variação da média é tão lenta que se pode determinar uma única média para todo o intervalo. Assim, o processo passa a ser considerado aleatório e estacionário. Utilizando-se a teoria de Kolmogorov e a cascata de energia, podem-se determinar estes pequenos intervalos espaciais, denominados subescala inercial (L_0, l_0). Dessa forma, as correlações entre as variações de qualquer um dos pontos

do campo (do índice de refração e da temperatura) observados independem de suas posições espaciais, dependendo apenas da separação entre seus vetores de posição. Tais campos, como os definidos pela subescala inercial, são caracterizados pela função de estrutura. A temperatura e índice de refração da atmosfera podem receber este tratamento especial, dando origem à constante de estrutura da temperatura e constante de estrutura do índice de refração.

Os parâmetros atmosféricos, tais com a temperatura e o índice de refração, não podem ser tratados como processos estritamente estacionários, pois suas médias variam em pequenos intervalos espaciais, como dito anteriormente. Kolmogorov, em 1974, propôs a função estrutura como parte de sua nova teoria estatística [11]. A aplicação desta teoria no estudo da turbulência permite dizer que um processo aleatório $x(t)$ pode ser expresso como sendo:

$$\boldsymbol{x(t) = m(t) + x_1(t)} \tag{2-4}$$

em que, $m(t)$ é a média e $x_1(t)$ é a variação no instante t do parâmetro estudado, satisfazendo $\langle x_1(t) \rangle = 0$. Assim, a função estrutura associada ao processo aleatório $x(t)$ pode ser definida como sendo [11] :

$$\boldsymbol{D_x(t_1, t_2) = \langle [x(t_1) - x(t_2)]^2 \rangle = [m(t_1) - m(t_2)]^2 + \langle [x_1(t_1) - x_1(t_2)]^2 \rangle} \tag{2-5}$$

Tendo em vista que a média na subescala inercial varia lentamente, a diferença entre as medias na equação 3-2 se aproxima de zero e a função estrutura se torna:

$$\boldsymbol{D_x(t_1, t_2) \cong \langle [x_1(t_1) - x_1(t_2)]^2 \rangle} \tag{2-36}$$

ou seja, as variações do processo se tornam mais importantes que o processo em si.

O índice de refração n é considerado um fator de grande importância na propagação da luz pela atmosfera. A sua forte relação com a temperatura somada à mistura ocasionada pela turbulência altera sensivelmente a direção do feixe de luz, degradando o sinal óptico. O índice de refração pode ser expresso matematicamente como sendo

$$\boldsymbol{n(R,t) = n_0 + n_1 \ (R,t)} \tag{2-7}$$

em que, R é uma determinada posição no espaço, t o tempo, $n_0 = \langle n(R,t) \rangle \cong 1$ é o valor da média do índice de refração e $n_1 \ (R,t)$ representa o desvio aleatório de $n(R,t)$ com relação a sua média e $\langle n_1 \ (R,t) \rangle = 0$. Pode-se assim expressar o índice de refração como sendo:

$$\boldsymbol{n(R) = 1 + n_1 \ (R)} \tag{2-8}$$

em que, $n(R)$ foi normalizado pelo seu valor $n_0 n_0$. Tendo em vista que no tratamento de propagação da luz o tempo pode ser suprimido, a equação passa a depender apenas da posição R.

As flutuações na temperatura e pressão determinam a flutuação do índice de refração para a faixa de comprimento de onda do infravermelho (IR) [11]:

$$\boldsymbol{n(R) \cong 1 + 79 \times 10^{-6} \frac{P(R)}{T(R)}} \tag{2-9}$$

em que, P é a pressão em milibares e T a temperatura em kelvin.

O campo aleatório do índice de refração é, ainda, estatisticamente homogêneo e isotrópico, assim, suas variações dependem apenas da distância escalar entre dois vetores

de posição $R = |R_1 - R_2|$. Kolmogorov, uma análise dimensional, mostrou que a função estrutura do índice de refração (n) dentro da subescala inercial satisfaz a lei universal de potência de 2/3:

$$\boldsymbol{D_n = \langle (n_1 - n_2)^2 \rangle = C_n^2 R^{\frac{2}{3}}, \quad lo \ll R \ll Lo} \tag{2-10}$$

em que, n_1 e n_2 representam os índices de refração em dois pontos separados pela distância R e C_n^2 é a constante de estrutura do índice de refração em m $^{4/3}$/s^2. O comportamento encontrado para escalas onde R<<lo varia com o quadrado da separação entre os pontos observados. A forma assintótica da constante de estrutura fica então:

$$\boldsymbol{D_n(R) = \begin{cases} C_n^2 R^{\frac{2}{3}}, & lo \ll R \ll Lo \\ C_n^2 lo^{-4/3} R^2, & 0 \ll R \ll lo \end{cases}} \tag{2-11}$$

O C_n^2 é a constante de estrutura do índice de refração e indica o quão forte são as flutuações do índice de refração e consequentemente a turbulência do local. Os valores típicos do C_n^2 variam de $10^{-17} m^{-2/3}$, que corresponde à turbulência fraca a $10^{-13} m^{-2/3}$ ou mais, correspondendo a turbulência forte.

A exemplo do desenvolvimento utilizado para o índice de refração, a função de estrutura da temperatura é definida matematicamente como sendo:

$$\boldsymbol{D_T(R) = \begin{cases} C_T^2 R^{\frac{2}{3}}, & lo \ll R \ll Lo \\ C_T^2 lo^{-4/3} R^2, & 0 \ll R \ll lo \end{cases}} \tag{2-12}$$

em que, T_1 e T_2 são as temperaturas dois pontos de uma determinada região e R a distância

entre estes dois pontos e C_T^2 a constante de estrutura de temperatura [11].

O C_n^2 se relaciona como a constante de estrutura de temperatura C_T^2 como segue:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2}\right)^2 C_T^2 \tag{2-13}$$

A Figura 2-3 apresenta um gráfico de medida de C_n^2 realizada por um cintilômetro, para um dia claro [9]. Tendo em vista que as variações na temperatura influenciam na constante de estrutura do índice de refração, verifica-se no gráfico o aumento do C_n^2 nos momentos de maior insolação, ou seja, no período compreendido entre 12h e 14h.

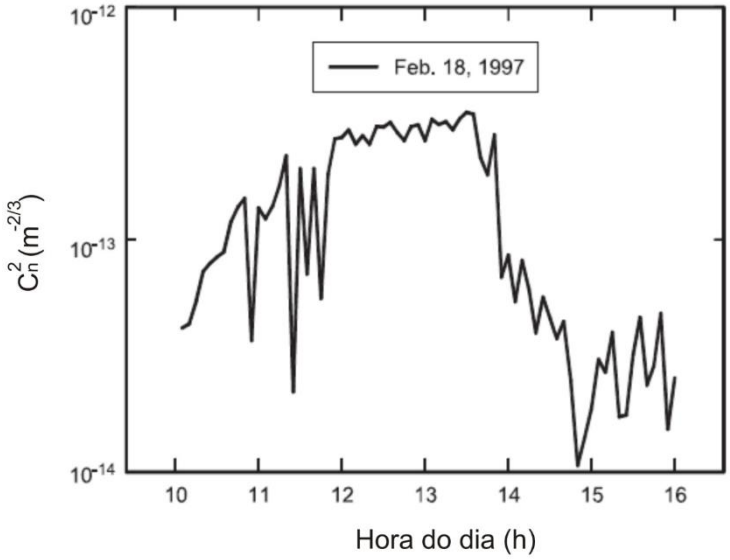


Figura 3 - Gráfico C_n^2 x Tempo, apresentando o perfil de turbulência para um dia claro.

O Cn^2 varia também com a altitude, diminuindo à medida que o sistema se afasta das superfícies aquecidas. A Figura 2-4 apresenta o gráfico do perfil de turbulência a partir do solo até 10.000 metros. O Cn^2 varia com a altitude h a taxa de próximo ao solo o Cn^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} $m^{-2/3}$ [12].

2.2.1. Modelo geral da cintilação

A cintilação ocorre quando a luz atravessa região da atmosfera onde vórtices turbulentos são relativamente menores que o diâmetro do feixe óptico. Assim a frente de onda óptica é deformada, alterando-se a distribuição da potência óptica e como consequência ocorre o aparecimento de "manchas" no plano do receptor (Figura 4). Este fenômeno se torna expressivo a alturas maiores que 1,5m. A Figura 4 apresenta a propagação do sinal óptico por um meio onde as células de turbulência são menores que o feixe [11].

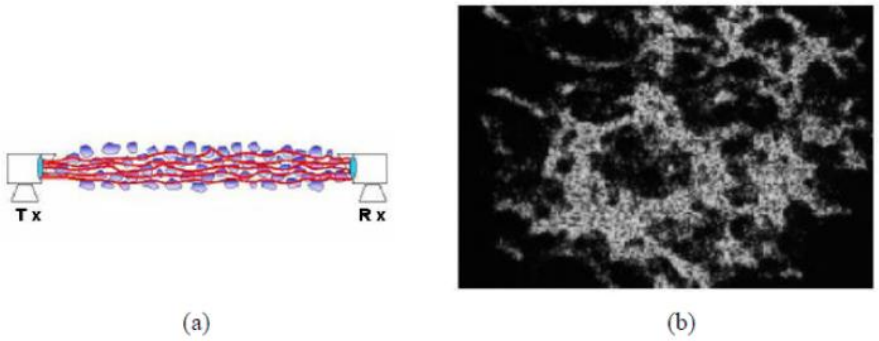


Figura 4 - Representação da cintilação. (a) ilustração do feixe óptico ao passar por uma área de células de turbulência muito menores que o feixe óptico. (b) imagem da projeção do feixe óptico no plano do receptor.

A variação da potência percebida no plano do receptor devida à cintilação, pode ser expressa pelo índice de cintilação, σ^2_I:

$$\sigma_I^2 = \frac{var(I)}{\langle I \rangle^2} \approx \sigma_{lnI}^2 \tag{2-14}$$

onde

$\mathrm{var(I)} = E((I - \langle I \rangle)^2)$,

I = irradiance incident upon the sensor,

$\mathrm{E}(\ldots)$ = expectation or mean value and

$\langle I \rangle = \mathrm{E(I)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I_i$ denotes the mean of the irradiance or expected value,

N is the number of samples and

I_i is the ith sample irradiance.

Tendo em vista que a variância da irradiação pode ser descrita como sendo:

$$var(I) = E(I^2) - (E(I))^2 = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2 \tag{2-15}$$

Logo pode-se escrever que o índice de irradiação é:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \tag{2-16}$$

2.2.2. Modelo geral da divagação do feixe

O alargamento do feixe, Beam Spread, ocorre quando o feixe ao passar por um meio turbulento tem seu raio efetivo (W) aumentado. Este raio consiste na distância do centro do feixe onde a intensidade normalizada do sinal cai a 1/e. O alargamento do feixe tem como consequência a diminuição da densidade de potência óptica no receptor, tendo em vista que esta densidade varia inversamente como o raio [11].

A divagação do feixe (*beam wander*) ocorre quando a luz atravessa uma região onde as células de índice de refração são maiores, relativamente ao tamanho do diâmetro do feixe (W). Neste caso, ocorrem variações aleatórias da posição do centro do feixe óptico

no plano do receptor. Este fenômeno tem maiores amplitudes a alturas menores que 1,5 m. A Figura 5 (a) apresenta o feixe LASER sob a influência das células de turbulência e a Figura 5 (b) demonstra as variações dos centros instantâneos do feixe no plano do receptor.

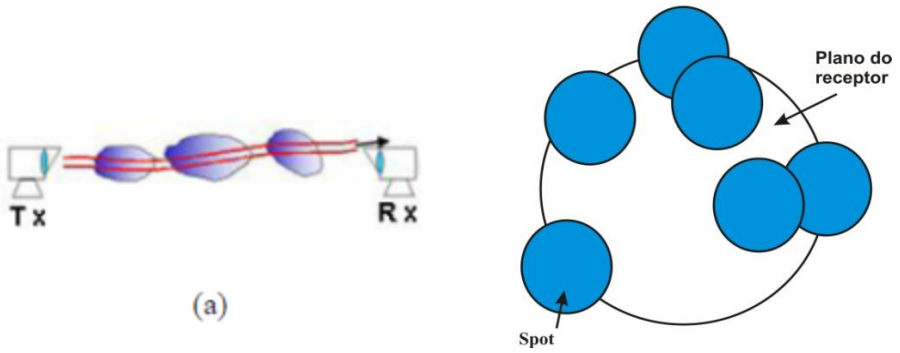


Figura 5 *: Efeito do Beam Wander sobre a propagação da luz (a). Alteração do posição do spot de luz no plano do receptor (b).*

Sendo o *Beam Wander* a variação contínua e aleatória da posição do centro instantâneo do feixe óptico no plano do receptor, este efeito, no receptor, se assemelha a variações angulares do transmissor. O efeito *Beam Wander* sobre o centro instantâneo do feixe óptico, implica num movimento em 2D composto de duas escalas espaciais com diâmetros típicos Wxx, diferindo em pelo menos uma ordem de grandeza: termo curto (WST) e termo longo (WLT). O conjunto das posições instantâneas do centro do feixe projetado no plano do receptor denomina-se termo curto (WST) e é representado na Figura 2-9 pelos círculos menores (azuis). O conjunto dos termos curtos delimita um círculo maior denominado termo longo (WLT) [11].

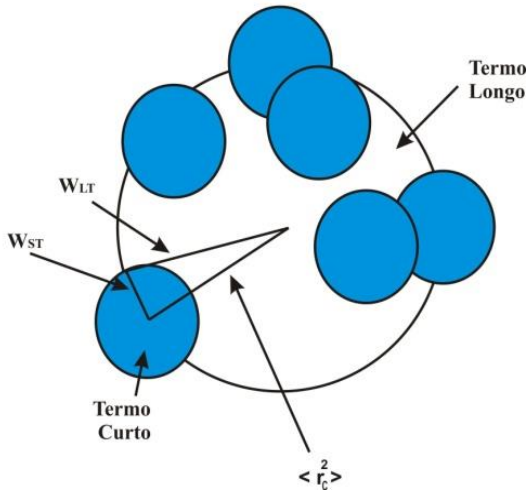


Figura 6 - Representação do modelo de divagação do feixe, evidenciando o Termo longo e o Termo curto que compõe o fenômeno.

Tomando-se o termo longo como primeiro termo da equação e elevando ao quadrado tem-se:

$$W_{LT}^2 = W^2 + W^2T_{ss} + W^2T_{LS} \tag{2-17}$$

em que W^2 é a parcela que representa a difração, $W^2T_{ss}W^2T_{ss}$ representa a parcela do *Beam Breathing* e W^2T_{LS} representa a parcela do *Beam Wander*. Matematicamente o *Beam Wander* é a variância do centro instantâneo do feixe no plano do receptor. Esta variância pode ser expressa por [11]:

$$\langle r_c^2 \rangle = W^2T_{LS} = 4\pi^2k^2W^2\int_0^L\int_0^\infty \kappa\phi_n(\kappa)H_{LS}(\kappa,z)\left(1-e^{-\frac{\Lambda L\kappa^2\xi^2}{k}}\right)d\kappa dz \tag{2-18}$$

em que κ é número de onda escalar, $\phi_n(\kappa)$ é o modelo de espectro de potência para a flutuação do índice de refração, L é a distância entre o receptor e o transmissor, $H_{LS}(\kappa,z)$

$H_{LS}(\kappa, z)$ e a função do filtro Gaussiano e $\xi = \frac{1-z}{L}$ é a distância normalizada. A função filtro Gaussiano e a densidade espectral espacial de potência da flutuação do índice de refração são respectivamente:

$$H_{LS}(\kappa, z) = exp[-\kappa^2 W^2(z)] = exp[-\kappa^2 W_0^2 ({\Theta_0}^2 + {\Lambda_0}^2)] \tag{2-19}$$

$$\phi_n(\kappa) = 0{,}033 c_n^2 \kappa^{-\frac{11}{3}} \left[1 - exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_0^2}\right)\right] \tag{2-20}$$

em que κ_0 caracteriza a escala dos obstáculos (exterior ou interior) e W(z) é o tamanho do feixe Gaussiano no receptor distante L do transmissor e W_0 (Figura 2-10) é o raio do feixe no plano do transmissor. Vale ressaltar que Θ_0 é chamado de parâmetro de curvatura e que Λ_0 é conhecido como taxa de Fresnel. Para um valor fixo de $z = L$ e raio de curvatura F_0 o parâmetro de curvatura identifica-se e o feixe é colimado, convergente ou divergente, sendo $\Theta_0 = 1, \Theta_0 < 1 \; e \; \Theta_0 > 1$ respectivamente.

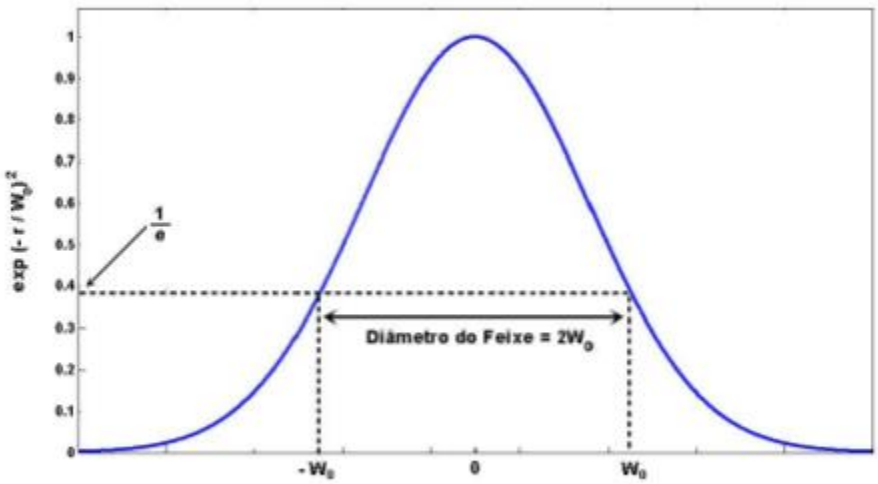


Figura 7 - Representação do em uma distribuição de potência óptica Gaussiana.

Resolvendo-se a integral da equação 2-76, chega-se à generalização da variância do centro do feixe óptico [12]:

$$\langle r_c^2 \rangle = 7{,}25 C_n^2 L^3 W_0^{\frac{1}{3}} \int_0^1 \xi^2 \left\{ \frac{1}{\left|\Theta_0 - \underline{\Theta_0}\right|^{\frac{1}{3}}} - \left[\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2 \left(\Theta_0 - \underline{\Theta_0}\xi\right)^2} \right]^{\frac{1}{6}} \right\} d\xi \tag{2-21}$$

Casos especiais para a formulação da divagação do feixe

Existem casos especiais onde a equação da variância pode ser reduzida considerando cada um dos fatores de seus casos especiais como segue [16]:

Feixe colimado ($\kappa_0 = 0,\ \langle \Theta \rangle_0 = 1$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2{,}42 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \tag{2-22}$$

Feixe Focado ($\kappa_0 = 0,\ \langle \Theta \rangle_0 = 0$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2{,}72 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \tag{2-23}$$

Feixe colimado ($\kappa_0 \neq 0,\ \langle \Theta \rangle_0 = 1, \Theta_0 = 0$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2{,}42 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \left[1 - \left(\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{\frac{1}{6}} \right] \tag{2-24}$$

Feixe Focado ($\kappa_0 \neq 0,\ \langle \Theta \rangle_0 = 1, \Theta_0 = 1$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2{,}72 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \left[1 - \frac{8}{9} \left(\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + 0{,}5\kappa_0^2 W_0^2} \right)^{\frac{1}{6}} \right] \tag{2-25}$$

2.2. Termodinâmica atmosférica

A convecção da umidade no ar é o principal fenômeno termodinâmico a ser compreendido no estudo da evapotranspiração. Verifica-se, então, que a água contida no ar pode ser expressa como a razão de mistura conhecida como a massa de água por unidade de massa de ar seco, *r* ou pela umidade específica, *q*. Estas grandezas são relacionadas pela equação $q = r/(1+r)$. porém, na pratica, $r<<1$, verificando-se que existe pouca diferença entre elas. Sendo assim, a equação do estado do ar, contendo água, pode ser expressa por [9]:

$$p = \rho R_d T_\rho \tag{2-26}$$

em que *p* é a pressão atmosférica, R_d é o calor específico do ar seco e Tρ é a densidade de temperatura, expressa por

$$T_\rho = T \frac{1 + r/\varepsilon}{1 + r_T} \tag{2-27}$$

em que ϵ=0,622 e representa a razão entre o calor específico do ar seco e do ar úmido e r_T é a razão de mistura da água total, contemplando a razão de mistura do vapor de água e a razão de mistura das nuvens.

2.2.1. Propriedades aerodinâmicas

Visando a compreensão das propriedades aerodinâmicas que influenciam a turbulência atmosférica, inicialmente, verifica-se que o transporte de uma determinada propriedade S, por um gás, pode ocorrer por meio de moléculas, partículas ou vórtices, que

foram denominados portadores. Invariavelmente, o transporte da propriedade S ocorrerá de uma área de grande concentração para uma de menor concentração [9].

Para verificar o fluxo de S, considera-se que o gradiente de variação desta propriedade é *dS/dz*. Assumindo-se que *n* portadores por unidade volume, como velocidade *w* se movem verticalmente pra cima e que a quantidade de S pode ser expressa por $nS = \rho q$, em que q é a concentração especifica de S e ρ é a densidade desta propriedade, o fluxo de S por uma altura *l* pode ser expresso como sendo [15]

$$\mathbf{F} = -\rho w l \left(\frac{d\,q}{dz}\right) \tag{2-28}$$

O sinal de menos indica que o fluxo é descendente se q aumenta com a altura.

Considerando-se como $q = \rho_s/\rho$ que é a concentração especifica e que $r_s = \rho_s/\rho_a$, ou seja, é a massa da propriedade S por unidade de massa de ar seco, o fluxo pode ser expresso como sendo

$$\mathbf{F} = \overline{\rho_a}\overline{w'r'_s} \tag{2-29}$$

em que, w' é a variação do vento vertical e r'_s é a flutuação da concentração da propriedade S.

Para o a determinação do transporte de momentum, r'_s torna-se a flutuação horizontal da velocidade do ar, u' e o fluxo vertical do momentum passa a ser dado por $\overline{\rho u' w'}$. Assim, considerando que o fluxo como constante com a altura, este pode ser denominado como tensão de cisalhamento (τ), como segue [9]:

$$\tau = \overline{\rho u' w'} \tag{2-30}$$

Outra forma de expressar a tensão de cisalhamento é partindo da $\mathbf{F} = \overline{\rho_a}\overline{w'r'_s}$ e considerando que $K_M = wr$ (coeficiente de transferência de turbulência para o momentum),

tem-se:

$$\tau = \rho K_M \frac{\partial u}{\partial z} \tag{2-31}$$

Por similaridade, pode-se expressar os fluxos de calor, vapor de água e massa como sendo:

$$C = -K_H\left[\partial(\rho c_p T)/\partial z\right] \tag{2-32}$$

$$E = -K_V[\partial\chi/\partial z] \tag{2-33}$$

$$F = -K_S[\partial S/\partial z] \tag{2-34}$$

Na hipótese da similaridade entre os coeficientes na condição de atmosfera neutra (as condições de estabilidade são abordadas no final desta seção), $K_M = K_H = K_V = K_S$ e como consequência:

$$\frac{-\rho c_p \partial T/\partial z}{\mathbf{C}} = \frac{\rho \partial u/\partial z}{\boldsymbol{\tau}}. \tag{2-35}$$

Outras relações podem ser feitas por analogia entre E, C ou F com τ. Adicionalmente, se considerar que $\boldsymbol{\tau} = \rho u_*^2$, onde u* é a velocidade de fricção dada por $u_*^2 = \overline{u'w'}$, tem-se que

$$\begin{aligned}\mathbf{C} &= -c_p(\partial T/\partial u)\boldsymbol{\tau} \\ &= -\rho c_p(\partial T/\partial u)u_*^2\end{aligned} \tag{2-36}$$

$$\mathbf{E} = -(\partial\chi/\partial u)u_*^2 \tag{2-37}$$

$$\mathbf{F} = -(\partial S/\partial u)u_*^2. \tag{2-38}$$

Em situação de estabilidade neutra. u* pode ser estimado utilizando-se apenas o

perfil de vento e a concentração da propriedade que se deseja medir o fluxo. Assim, visando eliminar u* pode-se diferenciar a equação de perfil de vento, onde *k* é a constante de Von Karman

$$\frac{\partial u}{\partial[\ln(z-d)]} = \frac{u_*}{k}. \tag{2-39}$$

E substituindo nas equações de fluxo, tem-se que

$$\mathbf{C} = -\rho c_{\mathrm{p}} k^2 \frac{\partial u}{\partial[\ln(z-d)]} \frac{\partial T}{\partial[\ln(z-d)]}. \tag{2-40}$$

Considerando-se o uso de apenas dois anemômetros e termômetros em diferentes alturas, a expressão de fluxo de calor é expressa como sendo:

$$\mathbf{C} = \rho c_{\mathrm{p}} k^2 \frac{(u_1-u_2)(T_2-T_1)}{\{\ln[(z_2-d)/(z_1-d)]\}^2}. \tag{2-41}$$

É importante notar que o uso de apenas duas alturas para as medidas de vento, calor e umidade podem ocasionar erros de medida, aconselhando-se, então a utilização de instrumentos em quatro ou mais alturas.

O método supracitado sofre modificações quando a condição da estabilidade atmosférica é não-neutra. Nesta condição, é necessário saber o perfil de *u* e *T* para estimar u* e as quantidades K_M. K_H, K_V e K_S não serão mais consideradas iguais. Assim, pode-se dizer que o fluxo de calor passa a ser [9]

$$\mathbf{C} = \rho c_p k^2 \frac{(u_1 - u_2)(T_2 - T_1)}{\{\ln[(z_2 - d)/(z_1 - d)]\}^2} (\Phi_H \Phi_M)^{-1}, \tag{2-42}$$

em que, $(\Phi_H \Phi_M)^{-1}$ é o fator de estabilidade.

Verifica-se então a necessidade de definição do conceito de estabilidade atmosférica para a utilização da correta abordagem do método aerodinâmico. Na estabilidade neutra, a estrutura dos vórtices turbulentos pode ser vista como sendo circular com o diâmetro aumentando à medida em que aumenta a altura e o comprimento da mistura é dado por *l=kz.* Sendo assim,

$$u' = w' = u_* = l \partial u / \partial z, \tag{2-43}$$

relembrando que *u'* e *w'* são as flutuações da componente da velocidade horizontal e vertical respectivamente.

No caso da condição instável, que ocorre quando a superfície está significativamente aquecida, os movimentos verticais perceberão aumento, ocasionando, então a situação na qual *w'* será maior que *u'.* Por outro lado, quando ocorre o inverso, e a temperatura da superfície diminui, como é perceptível à noite, *u'* se torna maior que w'. A Figura 2-6 sumariza estas informações.

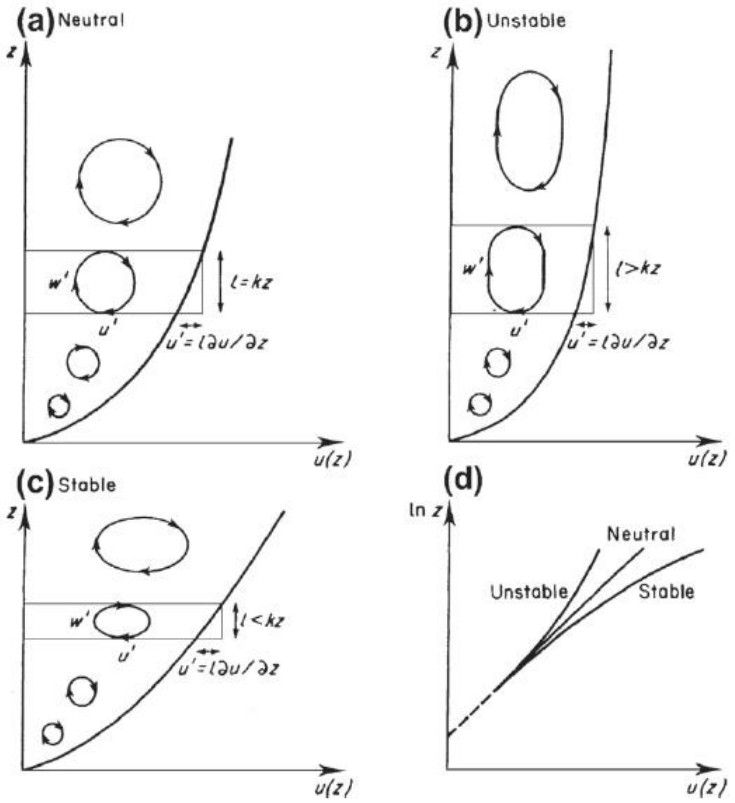


Figura 8 - Representação dos perfis atmosféricos, onde de verifica a esquerda no alto o perfil neutro, na esquerda abaixo o perfil estável, na direita acima o perfil instável e por fim a comparação entre estes perfis.

Assim, para refletir a realidade encontrada nas condições de estabilidade e instabilidade, aplicou-se um fator de correção ϕ_M, denominado função estabilidade, que é maior que um no caso de estabilidade, menor que um no caso de instabilidade e um no caso de neutralidade. Logo, o perfil de vento pode ser expresso, em sua forma diferencial, como sendo [9]

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k(z-d)}\Phi_{\mathrm{M}}, \tag{2-44}$$

Então, os coeficientes de transferência passam a ser considerados como

$$K_{\mathrm{M}} = k u_*(z-d)\Phi_{\mathrm{M}}^{-1}. \tag{2-45}$$

e

$$K_{\mathrm{H}} = k u_*(z-d)\Phi_{\mathrm{H}}^{-1} \tag{2-46}$$

em que, (*z-d*) representa a altura do equipamento que está realizando a medida em relação à cultura.

A dependência da função ϕ com relação à estabilidade é geralmente expressa como uma função de parâmetros que depende da taxa de dissipação de energia pela turbulência. Os dois parâmetros amplamente utilizados são o número de Richardson (Ri) e o comprimento de Monin-Obukhov (L), cujas funções são as seguintes

$$\mathrm{Ri} = (gT^{-1}\partial T/\partial z)/(\partial u/\partial z)^2 \tag{2-47}$$

e

$$\mathrm{L} = \frac{-\rho c_{\mathrm{p}} T u_*^3}{kg\mathbf{C}}, \tag{2-48}$$

em que, g é a aceleração da gravidade, T é a temperatura em Kelvins, C é o fluxo de calor sensível. Números positivos de Ri correspondem à condição de estabilidade e negativos à condição de instabilidade. A relação existente entre os parâmetros é a seguinte:

$$(z - d)/\mathrm{L} = (\Phi_{\mathrm{M}}^2/\Phi_{\mathrm{H}})\mathrm{Ri}. \tag{2-49}$$

Então, para uma condição instável, tem-se que

$$\Phi_{\mathrm{M}}^2 = \Phi_{\mathrm{H}} = \Phi_{\mathrm{V}} = [1 - 16(z - d)/\mathrm{L}]^{-0.5}, \tag{2-50}$$

E para uma condição estável

$$\Phi_{\mathrm{M}} = \Phi_{\mathrm{H}} = \Phi_{\mathrm{V}} = [1 + 5(z - d)/\mathrm{L}], \tag{2-51}$$

3. Evapotranspiração

A evapotranspiração é o somatório da evaporação de corpos d'água, solos saturados ou de superfícies não saturadas e da transpiração das plantas [3]. 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 é processo de transformação de calor sensível em calor latente. 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 [4]:

$$L = 2497 - 2.37T \; [Jg^{-1}] \tag{3-1}$$

em que T é a temperatura em ºC do ambiente. A energia é fornecida pela radiação solar direta e pela temperatura do ar. Esse vapor é transferido da superfície para a atmosfera, devido à uma diferença de pressão que, faze com que o ar fique mais úmido. A quantidade de vapor que é transferida para a atmosfera diminui e, pode até mesmo cessar, caso o ar fique saturado e não haja a circulação das massas de ar [5]. A evaporação dependente de variáveis meteorológicas como a radiação solar, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento [4].

A transpiração é um processo biofísico pelo qual a 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 do mesmo. No caso das plantas, este processo serve para a diminuição de sua temperatura interna e absorção de nutrientes do solo. Assim, o superaquecimento causado pela incidência da radiação solar direta nas folhas das plantas é prejudicial, pois pode ocasionar a desidratação, o que desencadeia uma fotoinibição da fotossíntese e consequentemente a morte da planta. A fim de evitar o superaquecimento, o fenômeno da transpiração proporciona a diminuição da temperatura da planta, pela absorção de energia quando ocorre a evaporação da água, cerca de 2450 $J.g^{-}$

[1] (igual a 245 $J.mm^{-1}$) de energia é absorvida . Assim, por meio das raízes, a planta absorve a água do solo juntamente com os nutrientes nela contido. Essa água é transferida na planta pelo sistema de vaso e, chega à cavidade estomática, sendo então convertida em vapor e transferida para a atmosfera através dos estômatos abertos, cuja função é permitir as trocas gasosas entre a planta e o ar atmosférico [6].

Evapotranspiração global é somatório da evaporação que ocorre nos oceanos (E_0) e continentes ($E_{vt}C$), aproximadamente 574.200 km³/ano de volume de água é evaporada para a atmosfera. Esse vapor d'água forma as nuvens, que podem resultar em precipitação e, assim, retornar a água e outras substâncias fundamentais à vida dos seres vivos para a superfície. Do total da água evaporada, cerca de 119.000 km³/ano é precipitado nos continentes (PC), onde uma parte infiltra no solo promove a recarga das reservas freáticas e a reidratação do mesmo e, serve como depósito de água disponível para a vegetação terrestre e para as atividades biológicas. Outra parte, aproximadamente 458.000 km³/ano é precipitada nos oceanos (P_0). Completa-se assim o ciclo hidrológico, adicionando o retorno da água escoada superficialmente (ESS) pelo solo, que não foi capaz de absorver, e o deságue das águas subterrâneas (ESB) e dos rios nos oceanos [7].

A evapotranspiração pode ser classificada em potencial (**ETp)**, de referência (**ETo)**, de cultura (**ETc**) e real (**ETr)**. A evapotranspiração potencial é a estimativa da máxima perda de água na forma gasosa para a atmosfera de uma extensa cobertura vegetal uniforme, sem restrição hídrica para atender às necessidades da evaporação do solo e transpiração vegetal. O conceito foi introduzido por Thornthwaite em 1944 e aperfeiçoado por Penman em 1956 [8]. A ETo, por sua vez, considera que a perda de água por evaporação, ou transpiração para a atmosfera, ocorre, exclusivamente, devido às condições atmosféricas sobre a vegetação, sem interferências advectivas e pode ser estimada por modelos matemáticos teórica-empíricas, essas fórmulas foram desenvolvidas para diversas condições climáticas. Na década de 1960, Monteith baseado na equação de Penman, propôs um novo modelo que estimasse a ET, incluindo a resistência aerodinâmica e a resistência do dossel ao fluxo de vapor d'água, que foi parametrizado no boletim de Irrigação e

Drenagem no 56 da FAO para uma cultura hipotética (altura 0,12 m, albedo de 0,23, índice de área foliar de 2,88, resistências ao transporte de vapor d'água de 70 s m^{-1}), passando a se chamar de Evapotranspiração de Referência (ET_0). Adicionalmente, a ETc é o conceito utilizado para definir a quantidade de água consumida por uma cultura sem restrição hídrica e em qualquer fase de seu desenvolvimento. É semelhante a ET_0, porém substituindo a grama por uma cultura qualquer, entende-se como sendo a ET_0 em cada fase de desenvolvimento da cultura. Este conhecimento serve como base para projetos de irrigação. Por fim, ETr é a quantidade total de água transferida para a atmosfera, sob quaisquer condições de vegetação e disponibilidade hídrica existente. A determinação do consumo de água é essencial para a obtenção de maiores produtividades, redução de custos de produção e principalmente para a gestão sustentável do uso da água [13].

Os elementos meteorológicos que exercem grande influência sobre a evapotranspiração são: o saldo de radiação, a temperatura e umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e o vento [14]

Além dos fatores meteorológicos, os fatores relacionados à cobertura vegetal influenciam na ET. A espécie, o albedo, o índice foliar, a altura das plantas e a profundidade das raízes são as principais características a serem observadas.

Também a capacidade de armazenamento de água pelos solos influencia na conservação da taxa de ET. Solos argilosos têm a capacidade de manter a taxa de ET por períodos mais longos por possuírem maior capacidade de absorção de água. Por outro lado, os solos arenosos retêm pouca água e demandam raízes mais profundas para suprir o menor acúmulo de água [1,15].

3.1. Métodos de Medida da ET

As medidas de ET podem ser realizadas de forma direta ou indireta. Entre os métodos de medida direta destaca-se o lisímetro, e entre os métodos de medida indireta estão os micrometeorológicos (covariância de vórtices turbulentos, aerodinâmico, e o balanço de energia-razão de Bowen), os baseados no balanço hídrico (Penman Montheith),

empíricos (tanque classe A) e os métodos ópticos (método da constante de estrutura do índice de refração do ar). Neste trabalho, apenas os métodos micrometereológicos serão desenvolvidos.

Balanço de Energia e método da razão de Bowen

A energia solar que incide sobre a superfície durante o dia, tem como resultado processos físicos e fitosiológicos, como por exemplo, a ET e fotossíntese. Neste estudo, a fotossíntese foi desconsiderada por representar apenas 3 % do consumo de energia solar. Quando o solo possui quantidade adequada de água, a ET é o principal processo consumidor da energia solar e, pode representar entre 70 – 80 % da energia absorvida que se transforma em calor latente, devido à evaporação da água e, ou a transpiração vegetal. Outra parte da energia solar aquece a superfície, transformando-se em calor sensível. Parte deste calor é emitido por meio de radiação e, aquece o ar subjacente, iniciando, portanto, um processo convectivo de transporte de calor, responsável pelo troca de energia das camadas aquecidas com as camadas mais frias da atmosfera. O ar aquecido, que inicialmente estava em contato com a vegetação, encontrava-se úmido e ao ser transportado pela convecção, auxilia no processo de ET. A segunda parte do calor sensível é absorvido pelo solo, aquecendo-o e, sendo transferido para profundidades maiores.

Assim, o balanço de energia pode ser considerado como segue [1,16]:

$$\boldsymbol{\lambda Et = R_n - G - H} \tag{3-2}$$

em que, R_n representa o saldo de radiação, λE_té o fluxo de calor latente, representando a ET, H é o fluxo de calor sensível, que foi transferido para a atmosfera, G é o fluxo calor sensível que foi transferido para o solo e H é o calor sensível responsável pelo aquecimento das plantas.

Tendo em vista a teoria apresentada, Bowen propôs, em 1926, uma solução para o

balanço de energia realizando o quociente entre os calores sensível, H, e o calor latente, λET:

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{\boldsymbol{\lambda E_t}}{\boldsymbol{H}} \tag{3-3}$$

em que, os fluxos de energia na direção da superfície são positivos, representando energia entrando no sistema e os fluxos que saem da superfície são negativos, representando energia cedida. Assim, o valor de β pode ser positivo ou negativo. No período diurno, o valor de λEt sempre será negativo em dias ensolarados por conta da absorção da energia solar e evaporação de água, o que faz com que β dependa apenas H. Assim, se H é positivo, existe uma fonte de advecção de ar aquecido de fontes mais quentes e secas, trazidas pelo vento. Nesta condição o valor de λEt pode ser maior do que o saldo de radiação, R_n não sendo, portanto, uma condição padrão para a estimativa de ET [17].

Ao substituir a equação 3-4 na equação 3-3, tem-se:

$$\boldsymbol{\lambda Et} = \frac{\boldsymbol{R_n - G}}{\boldsymbol{1 - \beta}} \tag{3-4}$$

Sabendo-se que $\beta = {}^{C}/_{\lambda E} = \gamma\, {}^{\partial T}/_{\partial e}$, em que $\gamma\, {}^{\partial T}/_{\partial e}$ pode ser determinado medindo-se a temperatura e umidade em diferentes alturas, o método da razão de Bowen pode ser generalizado, escrevendo-se o balanço de energia como sendo [1]:

$$\boldsymbol{R_n - G = C + \lambda E = \mathrm{K}\, \rho C_p \gamma^{-1} (\partial\, {}^{T}/_{\partial z})} \tag{3-5}$$

Assim, o fluxo de calor sensível C (ou H) pode ser determinado pela equação

$$\boldsymbol{C = (R_n - G)\left(\partial T / \partial Te\right)} \tag{3-6}$$

e o fluxo de calor latente, torna-se:

$$\boldsymbol{\lambda E = (R_n - G)\left(\partial T / \partial Te\right)\gamma^{-1}} \tag{3-7}$$

Método de Covariância de Vórtices Turbulentos

Este é um dos métodos micrometeorológicos mais utilizados para estimar fluxos da superfície. O método de Covariância de Vórtices Turbulentos, ou *Eddy Covariance* (EC), é um método matemático para determinar fluxos turbulentos [9]. Este método é matematicamente complexo e deve-se tomar uma série de cuidados na obtenção e processamento de dados, porém permite avaliar de forma confiável os fluxos turbulentos de calor e vapor H_2O. No Brasil, essa técnica tem sido empregada com sucesso em medições nas florestas da Amazônia, cerrados, cultivos de cana-de-açúcar e arroz [1].

No entanto, o método apresenta limitações importantes devido às condições de estabilidade atmosférica, pois necessita que os instrumentos sejam instalados na área da camada limite de equilíbrio ou de fluxo constante, cujo fluxo é aproximadamente constante com a altura.

Por meio do método de *Eddy Covariance* é possível calcular o fluxo sensível da superfície H. O valor de H (W/m²) é dado pela seguinte equação [19]:

$$\boldsymbol{H = \rho c_p \overline{w'T'}} \tag{3-8}$$

em que, ρ é a densidade de ar (kg/m³), c_p o calor específico, w a velocidade da componente

vertical do vento (m/s) e T a temperatura (K), ρ é obtido pela fórmula:

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{R_h T}} \tag{3-9}$$

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

$$\boldsymbol{R_h} = \frac{\boldsymbol{R_d}}{\boldsymbol{1-\left(q\frac{P_{sat}}{P}\right).\left(1-\frac{R_d}{R_v}\right)}} \tag{3-10}$$

em que R_n 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 e_a pressão de saturação de vapor d'água do ar, definido por:

$$\boldsymbol{P_{sat} = 6,1078\,.\,10^{\frac{7,5T_C}{T_C+273,3}}} \tag{3-11}$$

em que, T_C é a temperatura em ºC. O fluxo de calor latente $\boldsymbol{\lambda E}$ pode ser calculado, então, por meio do saldo de radiação, expresso na equação (2-3).

Método da Constante de Estrutura do Índice de Refração

Pode-se calcular o valor do fluxo sensível a partir do valor de C_n^2. Desde que alguns dados meteorológicos adicionais sejam adquiridos. Este método tem grande semelhança com o método dos vórtices turbulentos, sendo uma extrapolação deste último.

A constante de estrutura do índice de refração C_n^2 pode ser descrita como uma relação entre as constantes de estrutura de temperatura C_T^2 e humidade C_q^2 e o sua

covariância C_{Tq}, conforme equação abaixo [16]:

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 + \frac{A_T A_q}{T_q} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 \tag{3-12}$$

em que, A_T e A_q são quantidades dependentes do comprimento de onda e da média de temperatura (T), humidade (q) e pressão atmosférica (P, hPa).

Para o comprimento de onda do infravermelho, essas quantidades são dadas por [16]:

$$A_T = -0{,}776x10^{-6} \frac{P}{T} \tag{3-13}$$

$$A_q = -47x10^{-6} q \tag{3-14}$$

Assim, o primeiro termo da equação (17) contém C_T^2, 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_T^2, dada por:

$$C_n^2 = C_T^2 \left(\frac{-0{,}78\ x\ 10^{-6} P}{T^2}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{0{,}03}{\beta}\right)\right] \tag{3-15}$$

em que, β é a razão de *Bowen*, que relaciona a temperatura com a umidade do ar pela razão entre o calor sensível com o calor latente . O segundo termo é a correção do efeito da umidade.

A teoria de similaridade de Monin–Obukhov permite relacionar a constante de estrutura de temperatura com o escalar de temperatura T*:

$$C_T^2 = T^{*2}\,(z-d)^{\frac{-2}{3}} f_h\left(\frac{z-d}{L_0}\right) \tag{3-16}$$

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

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

$$f_h\left(\frac{z-d}{L_0}\right) = 4{,}9\left(1 - 6{,}1\frac{z-d}{L_0}\right)^{-2/3} \tag{3-17}$$

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

$$f_h\left(\frac{z-d}{L_0}\right) = 4{,}9\left(1 - 2{,}2\frac{z-d}{L_0}\right)^{2/3} \tag{3-18}$$

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

$$L_0 = \frac{u^{*2}T}{kgT^*} \tag{3-19}$$

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

$$\boldsymbol{u^* = \frac{ku}{ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \psi}} \tag{3-20}$$

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

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

$$\psi\left(\frac{z-d}{z_0}\right) = 2ln\left[\frac{1-x}{2}\right] + ln\left[\frac{1-x^2}{2}\right] - 2\arctan(x) + \frac{\pi}{2} \qquad (3\text{-}21)$$

com $x = \left(1 - 6{,}1\frac{z-d}{L_0}\right)$ e condições estáveis (se $z/L_O > 0$):

$$\psi\left(\frac{z-d}{z_0}\right) = 5{,}2\frac{z-d}{L_0} \qquad (3\text{-}22)$$

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

$$H = -\rho c_p u^* T^* \qquad (3\text{-}23)$$

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

$$\lambda E = R_n - G - H \qquad (3\text{-}24)$$

em que, $R_n[Wm^{-2}]$ é a radiação líquida e $G[Wm^{-2}]$ é o fluxo de calor do solo. Calcula-se assim a evapotranspiração por meio da turbulência atmosférica.

4. Materiais e métodos

Este trabalho tem como objetivo principal demonstrar que um instrumento de baixo custo, desenvolvido utilizando-se a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas é capaz de estimar a evapotranspiração. Para tanto, os seguintes objetivos secundários foram proposto: realizar a verificação das condições necessárias à utilização da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas para a estimativa da evapotranspiração, em campo; e realizar a comparação entre os dados de calor sensível e turbulência levantados com o auxilio de dois equipamentos comerciais e os dados levantados em laboratório com um instrumento desenvolvido com a Técnica.

Sendo assim, primeiramente foram levantados dados micrometereológicos por meio de um cintilômetro e uma estação micrometereológica. Em seguida, estes dados possibilitaram o desenvolvimento dos objetivos secundários.

4.1 Dados do cintilômetro e da estação micrometereológica

Nesta seção são apresentados os arranjos utilizados para a estimativa do calor sensível e do calor latente, em campo, pelo cintilômetro e pelo método da Razão de Bowen. Os equipamentos foram instalados na Reserva Ecológica de Guapiaçu no estado do Rio de Janeiro (REGUA), na latitude 22°27’ 10” S e longitude 042°46’13” W. A área analisada compreende 420 x 160 m de vegetação homogênea do tipo gramínea com altura média de 40 cm. As posições destes equipamentos encontram-se na Figura 9.

Primeiramente, é importante o cálculo do tamanho da bordadura (x). Esta grandeza começa no ponto de transição entre duas vegetações com portes diferentes. Neste local denominado x=0, o ar tem características, como umidade e temperatura, de ambas as vegetações e a medida em que se desloca, vai adquirindo as características apenas da última vegetação. Este cálculo visa o correto posicionamento dos equipamentos dentro da camada limite. A bordadura foi então calculada por meio das relações contidas na seção 2.1.3.

Considerando-se que a altura da vegetação é de 0,4 m e que d=0,67 h_{veg}, assim como z_0 = 0,1 h_{veg}, encontrou-se o valor da bordadura de 19 m. A camada limite considerada foi de 3 m, que é a altura onde se encontra o mais elevado dos quatro anemômetros da estação micrometeorológica. Os dados foram coletados a cada dez minutos durante os dias 25, 26 e 27 de outubro de 2019 na REGUA.

Figura 9 – Imagem satélite da área onde foram instalados os instrumentos (REGUA)

4.1.1. Cintilômetro

Para que a seja possível utilizar a teoria da cintilação em equipamentos como o

cintilômetro, torna-se necessário determinar a relação entre a variância da potência óptica e a o Cn^2. Para tanto, partiu-se da descrição matemática da propagação da onda eletromagnética [20]:

$$\nabla^2 \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) + k^2[1 + \Delta\epsilon(\mathbf{r}, t)]\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = -4\pi i k \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}) \tag{4-1}$$

em que E é o campo elétrico, *k* é o número de onda, $\Delta\epsilon$ é a variabilidade da permissividade e J(r) é o vetor densidade de corrente associada ao campo elétrico.

A melhor solução para esta equação é a encontrada por Rytov, onde a sua aproximação tem como único requisito para validade que a variância seja menor que a unidade ($\sigma_R < 1$), como normalmente ocorre para as condições de turbulência fraca. A solução de Rytov divide a equação da onda em duas partes, a primeira é o campo que não sofre perturbações e a segunda é uma equação exponencial complexa que apresenta termos de ordens maiores. No caso da turbulência fraca e homogênea, ao se aplicar o método de Rytov para a solução da equação da onda associada ao espectro de Kolmogorov da densidade espectral, encontra-se uma relação entre a variância da potência óptica e Cn_2, aplicada às ondas planas [21]:

$$\langle \chi^2 \rangle = 1.228 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} d^{\frac{11}{6}} \tag{4-2}$$

Por meio desta relação, aplicada às medidas advindas do cintilômetro, é possível o cálculo da turbulência atmosférica por meio do fenômeno da cintilação.

O cintilômetro utilizado foi um LAS (Large Aperture Scintilometer) Scintec BLS 450 com capacidade de medidas de Cn^2, CT^2 e calor sensível (H). O equipamento pode ser utilizado em distâncias de 100 a 6000 m, sendo capaz de auxiliar na determinação da evapotranspiração quando associado a uma estação micrometeorológica. A distância escolhida para a utilização do cintilômetro foi de 220 m com uma altura de 1,92 m, sendo assim, dentro da camada limite. A Figura 1 apresenta a montagem do equipamento em campo.

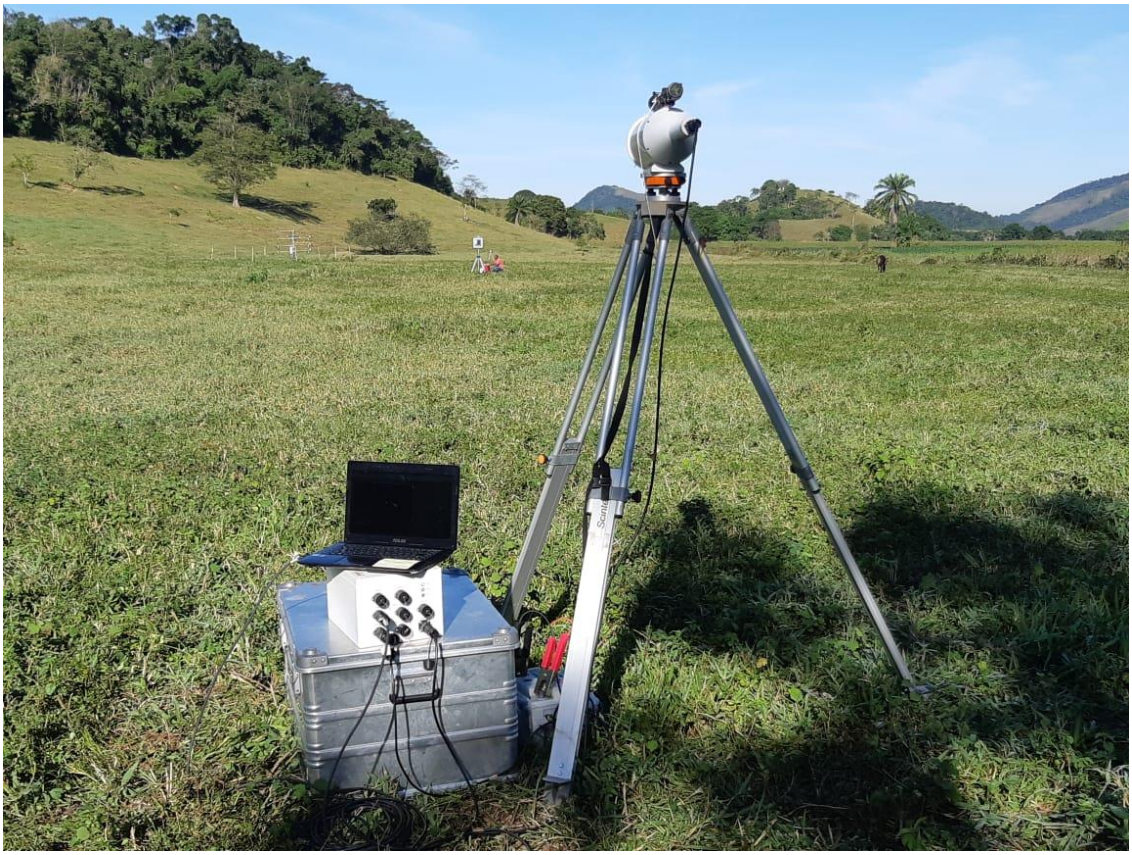


Figura 10 -*: Foto do cintilômetro Scintec BLS 450 instalado na área de medidas.*

Primeiramente, verificou-se o valor do fluxo de calor latente estimado pela cintilômetro, de acordo com o previsto no Capítulo 2 . Os dados foram levantados durante quatro dias, iniciando-se pela manhã e terminando no final da tarde. Obteve-se, para o dia 25 de outubro de 2019 um valor mínimo de fluxo de calor de -28,10 W/m^2, correspondendo ao horário de 17:50 e máximo de 1057,12 W/m², correspondendo ao horário de 11:30. A Figura 11 apresenta os dados de evapotranspiração por horário.

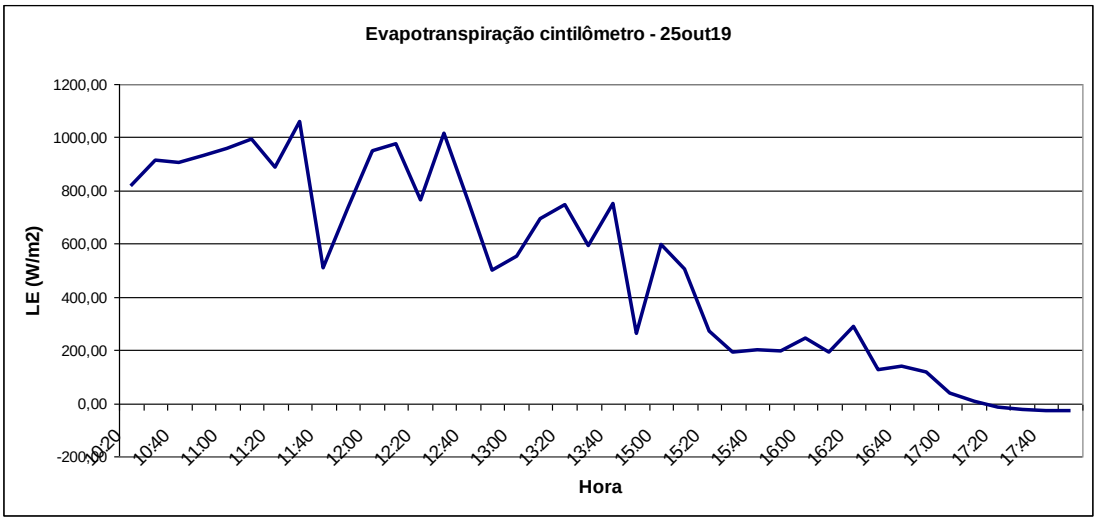


Figura 11 -Perfil de evapotranspiração no dia 25 de outubro de 2019

As medidas tiveram continuidade no dia 26 de outubro de 2019, quando foi verificado um valor mínimo de evapotranspiração de -29,52 W/m^2, correspondendo ao horário de 17:50 e máximo de 953,07 W/m^2, correspondendo ao horário de 11:20. A Figura 12 apresenta o gráfico de evapotranspiração deste dia.

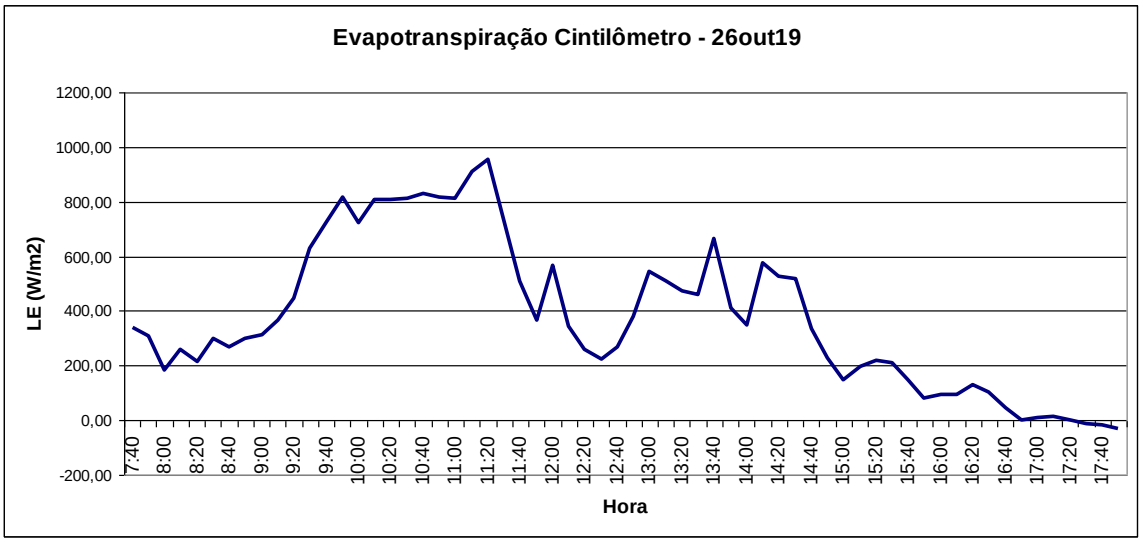


Figura 12 - Evapotranspiração estimada pelo cintilômetro em 26 de outubro de 2019

Por fim, no dia 27 de outubro, realizou-se nova medida, quando foi verificado um valor mínimo de fluxo de calor latente de 521,23 W/m^2, correspondendo ao horário de 08:30 e máximo de 1053,71 W/m^2, correspondendo ao horário de 11:50. A Figura 13 apresenta o gráfico de calor latente deste dia.

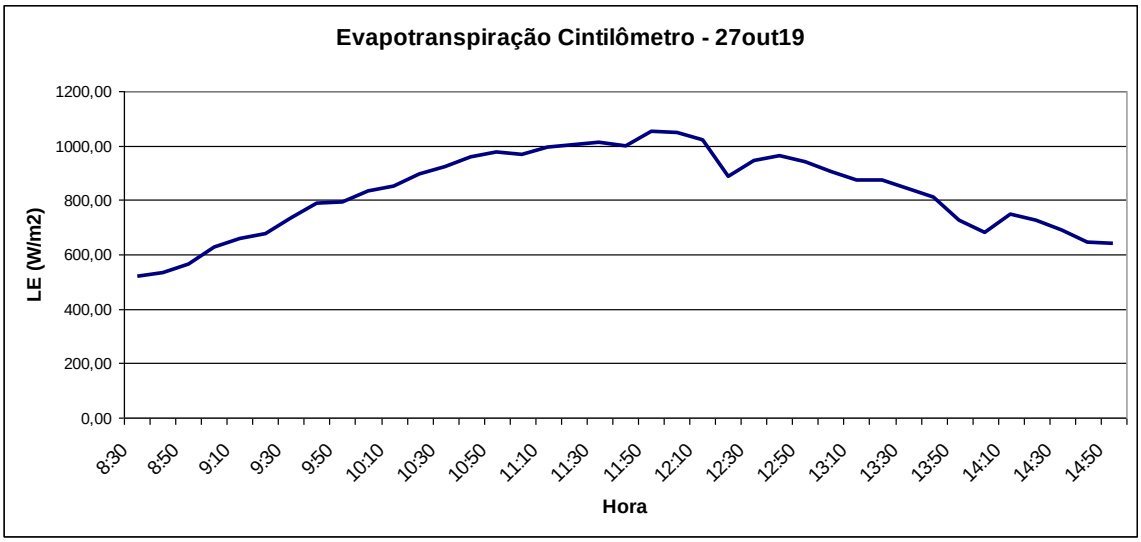


Figura 13 - Evapotranspiração estimada pelo cintilômetro em 27 de outubro de 2019

Percebe-se que os maiores valores de fluxo de calor latente ocorreram perto do período de maior insolação, assim como os menores valores ocorreram quando a radiação solar incidente era menor. Este comportamento é esperado, de acordo com a literatura, tendo em vista a variação de energia disponível para os processos de transporte de vapor d'água para a atmosfera.

Verificou-se então a variação de Cn2 com o horário, a exemplo do que foi feito com o fluxo de calor latente. O menor valor de turbulência foi percebido no dia às 16:20, no dia 26 de outubro, com valor de 5,45 x10^{-15} e o maior valor de turbulência foi notado às 09:40, correspondendo à 6,18x10^{-13}, no mesmo dia. A Figura 14 a 16 apresenta os perfis de turbulência levantados no período de medida.

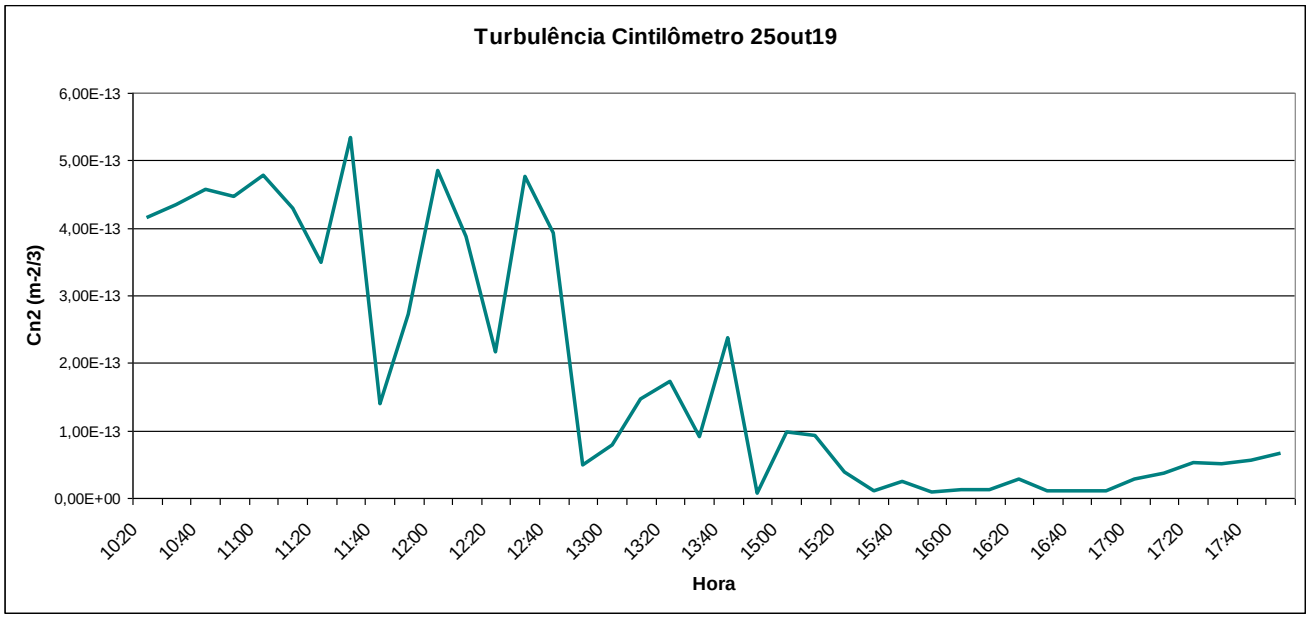


Figura 14 - Perfil de turbulência medida pelo cintilômetro em 25 de outubro de 2019

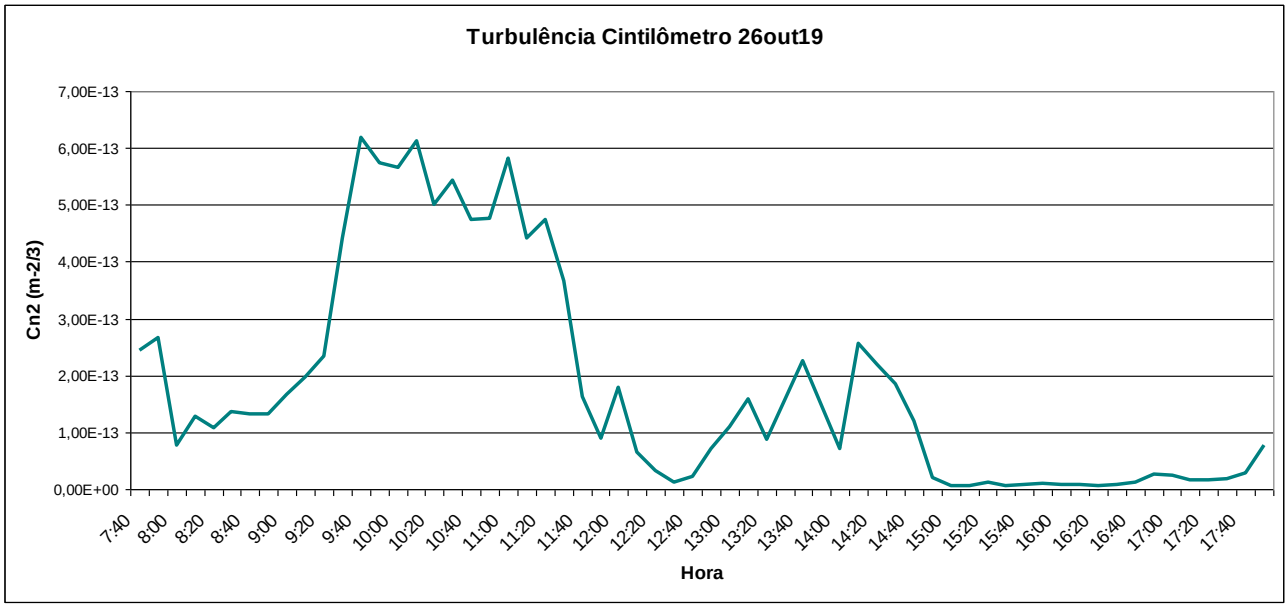


Figura 15 - Perfil de turbulência medida pelo cintilômetro em 26 de outubro de 2019

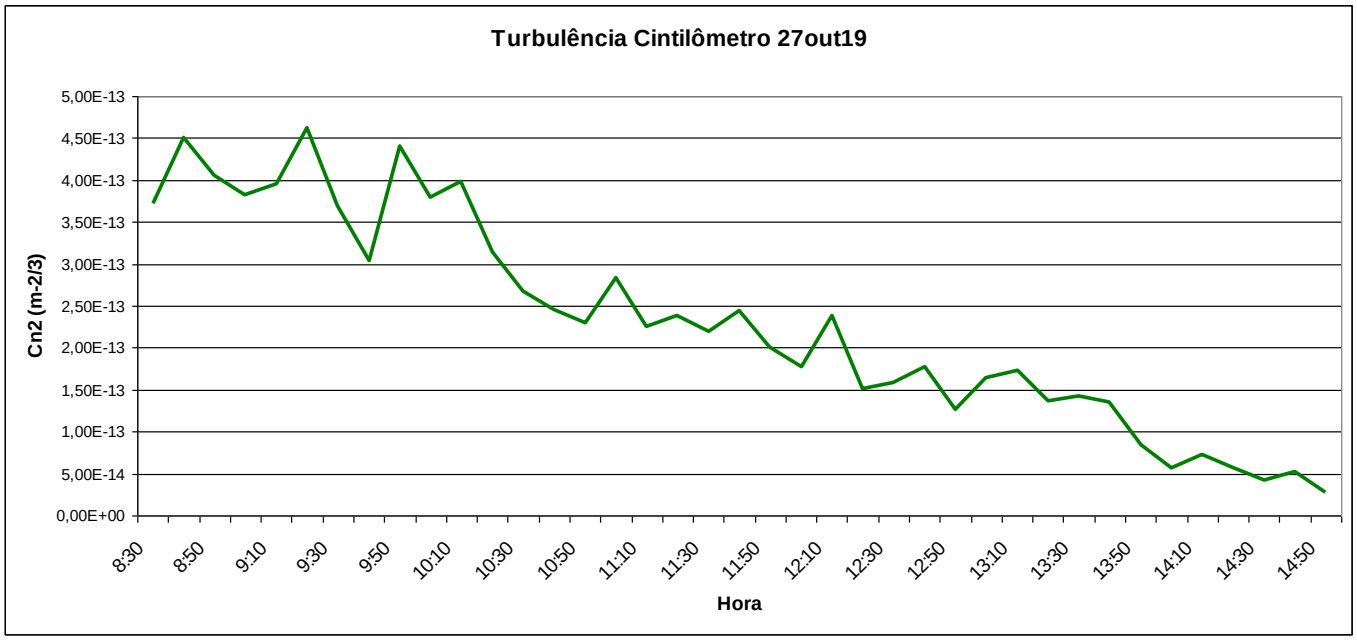


Figura 16 - Perfil de turbulência medida pelo cintilômetro em 27 de outubro de 2019

Realizou-se a análise da correlação entre a turbulência expressa pelo Cn2 e fluxo de calor latente, no valor de 0,7436 W/m^2, para o dia 25 de outubro, como se verifica no gráfico de dispersão da Figura 17.

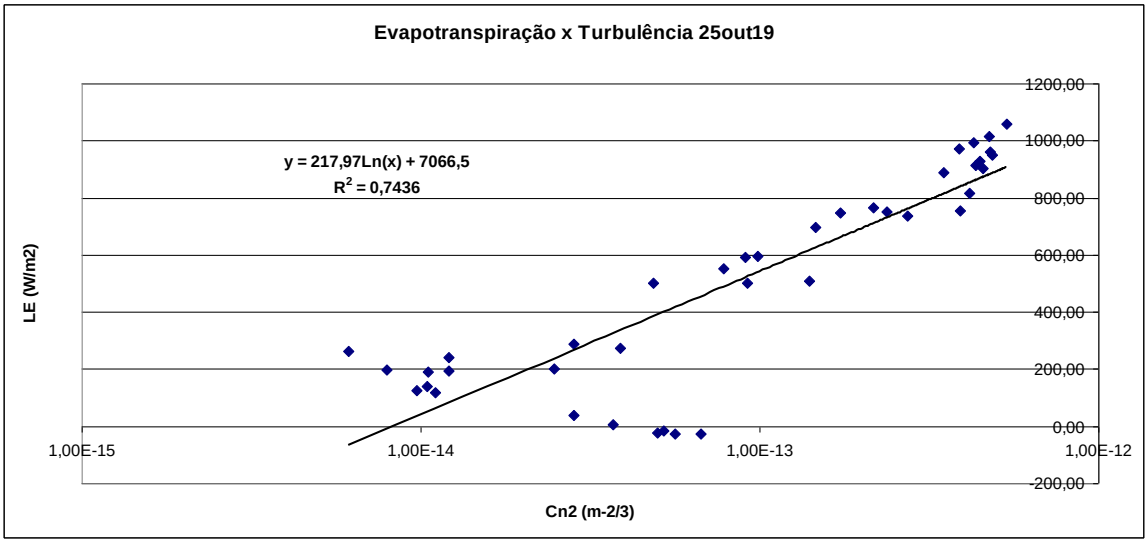


Figura 17 - Gráfico de dispersão do fluxo de calor latente e da turbulência atmosférica no dia 25 de outubro de 2019.

O mesmo tratamento foi realizado para o dia 26 de outubro, encontrando-se o valor de correlação de 0,70. O gráfico da Figura 18 apresenta o resultado

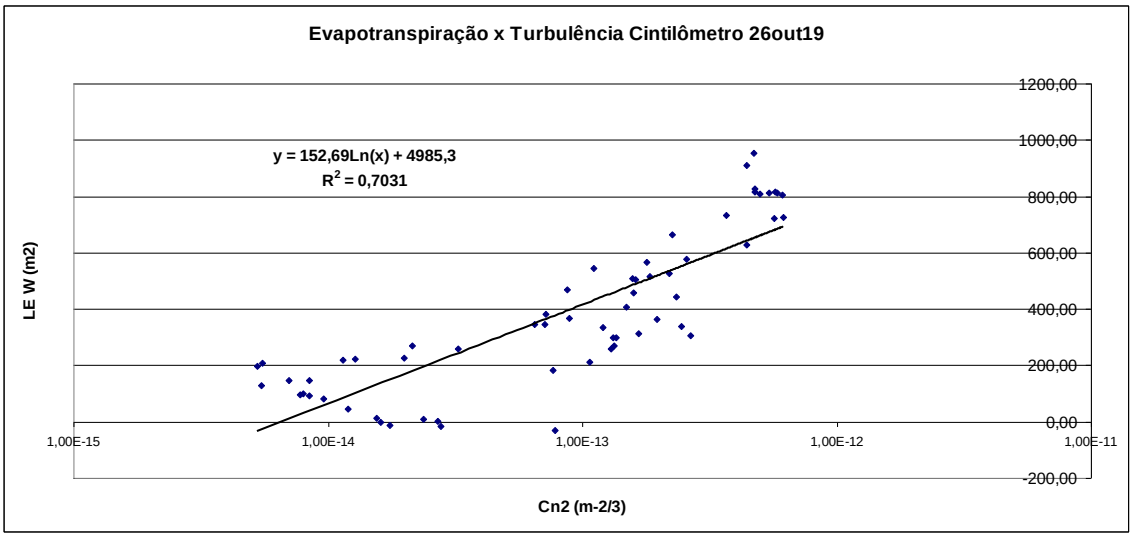


Figura 18 - Gráfico de dispersão do fluxo de calor latente e da turbulência atmosférica no dia 26 de outubro de 2019.

Da mesma forma se procedeu para os dados coletados dia 27 de outubro, quando obteve-se uma relação de 0,71 para um polinômio de terceira ordem

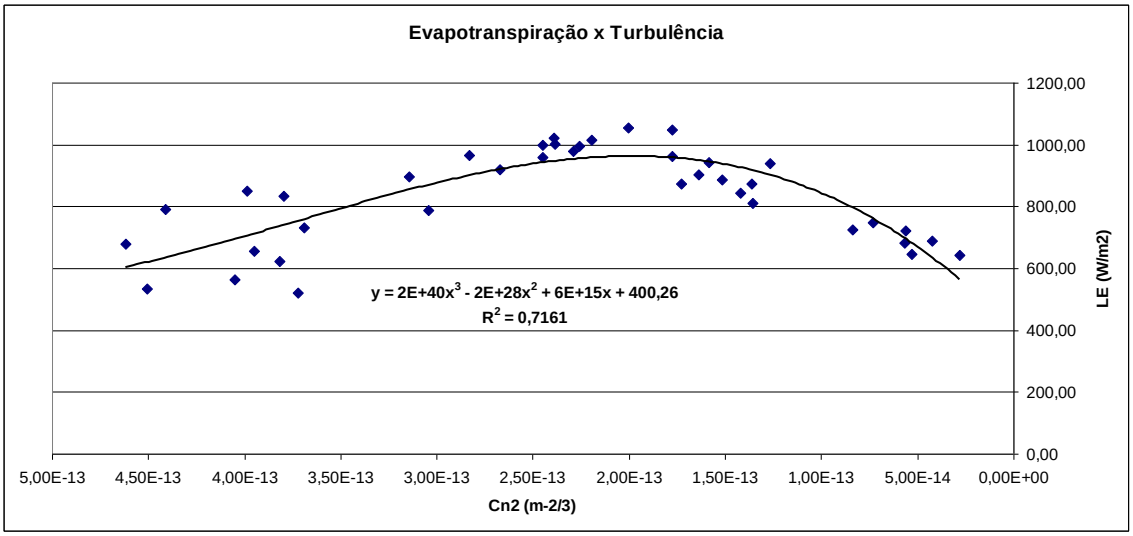


Figura 19 - Figura 5-9: Gráfico de dispersão do fluxo de calor latente e da turbulência atmosférica no dia 27 de outubro de 2019.

Verifica-se que nos dias 26 e 27 a relação entre a turbulência e a evapotranspiração mantiveram um padrão de previsibilidade corroborado pela linha de tendência logarítmica. Porém, no dia 27, os dados não guardam grande correlação, possível problema de calibragem dos equipamentos.

4.1.2. Método da Razão de Bowen

Para a aplicação do método da Razão de Bowen foi necessário o uso de uma estação micrometeorológica composta de um mastro micrometeorológico de 4,0 m de altura para servir de base para a fixação dos instrumentos. (Figura 20). Para as medidas de radiação, foi utilizado um saldo radiômetro Modelo LP-NET-14, Delta Ohm instalado a 1,80 m acima do solo. Para a coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do ar foram utilizados três termo higrômetros DB-TH1-SDI, dual BASE que foram instalados a 1,15m, 1,58 m e 2,33 m acima da superfície do solo. Adicionalmente, a velocidade do vento foi

medida por meio de quatro anemômetros sônicos GILL-1405, Gill Instruments, posicionados a 1,23 m, 1,68 m, 2,34 m e 3,00 m do solo. Para as medidas de calor do solo foram utilizadas duas placas HFP01, Hulkseflux Termal Sensors, instaladas a aproximadamente 0,05 m de profundidade. As médias dos valores de vento, temperatura, umidade e radiação foram armazenadas a cada 10 minutos, com auxílio de um datalogger CR3000, Campbell Scientific Inc. Este arranjo permitiu o levantamento de dados em três níveis e a aplicação do método da razão de Bowen e balanço de energia.

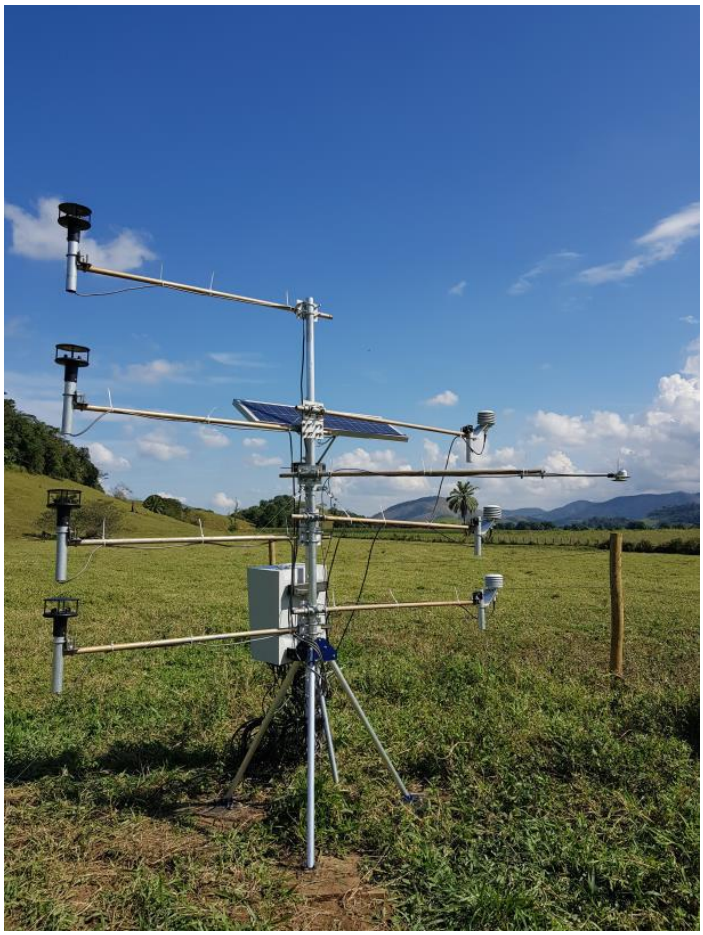


Figura 20 - Foto da estação micrometeorológica instalada na área de medidas, evidenciando os quatro anemômetros e três termo higrômetros.

Como esperado, o maior valor de evapotranspiração foi percebido às 12:00 com 536,96 W/m^2, e o menor valor

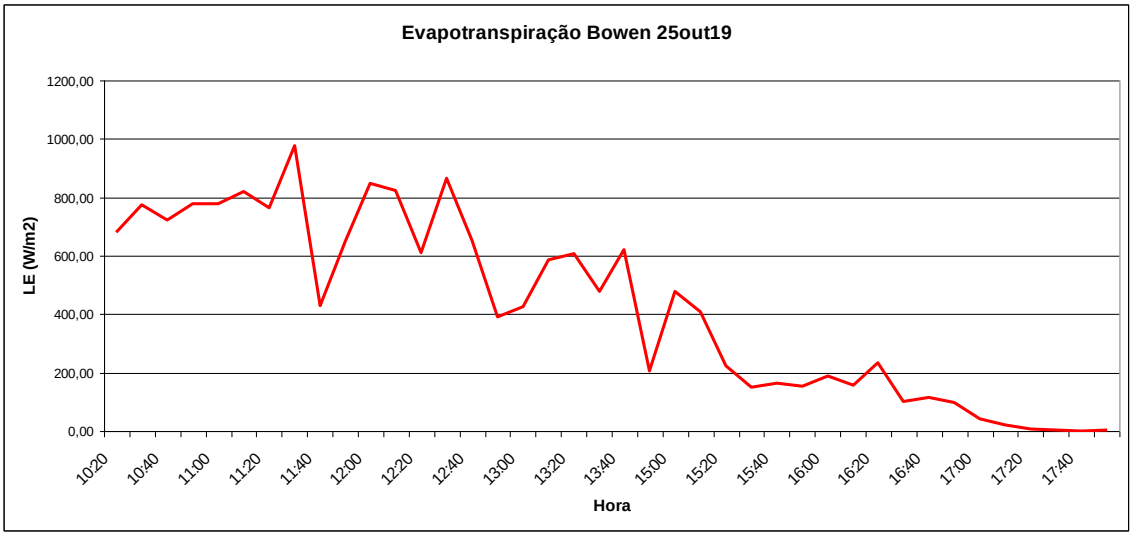


Figura 21 - Perfil de evapotranspiração levantado com o uso da razão de Bowen em 25 de outubro de 2019

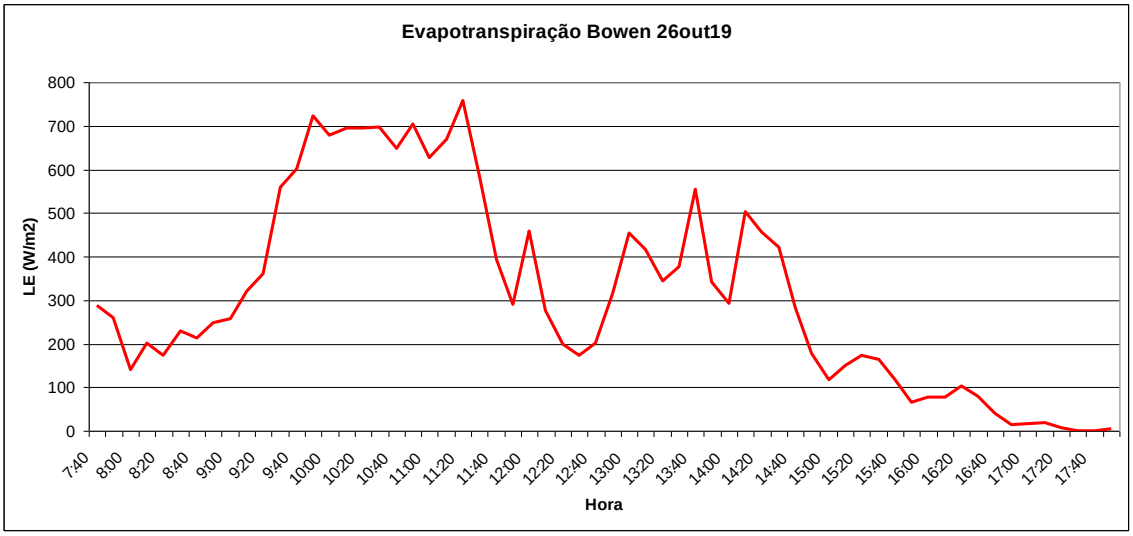


Figura 22 - Perfil de evapotranspiração levantado com o uso da razão de Bowen em 26 de outubro de 2019

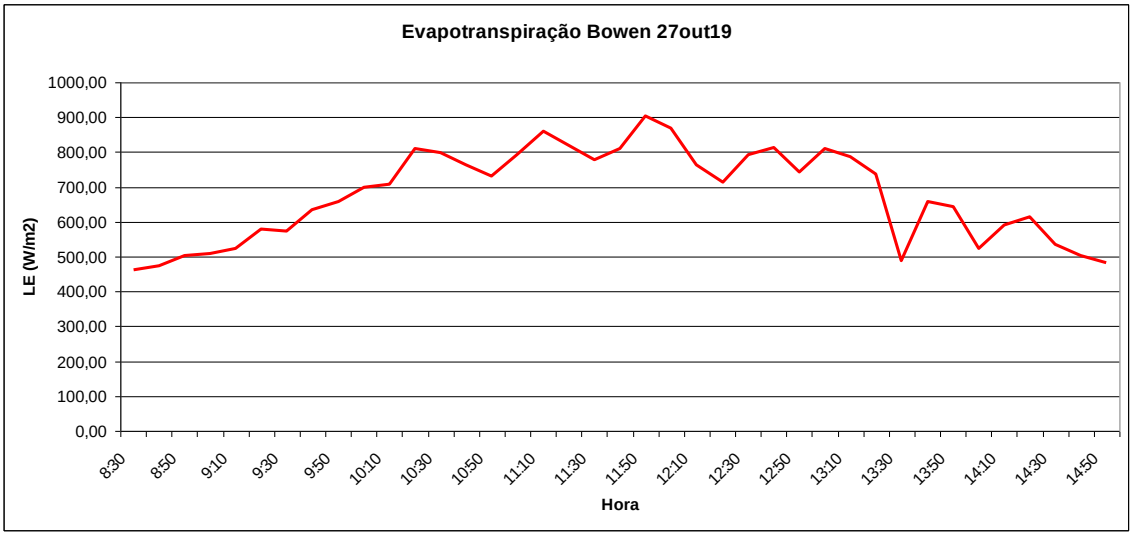


Figura 23 - Perfil de evapotranspiração levantado com o uso da razão de Bowen em 25 de outubro

4.1.3 Comparação dos dados do cintilômetro e da estação micrometeorológica

As estimativas de fluxo de calor latente levantadas com o cintilômetro e com a estação micrometeorológica foram comparados e os dados apresentados na Figura 24.

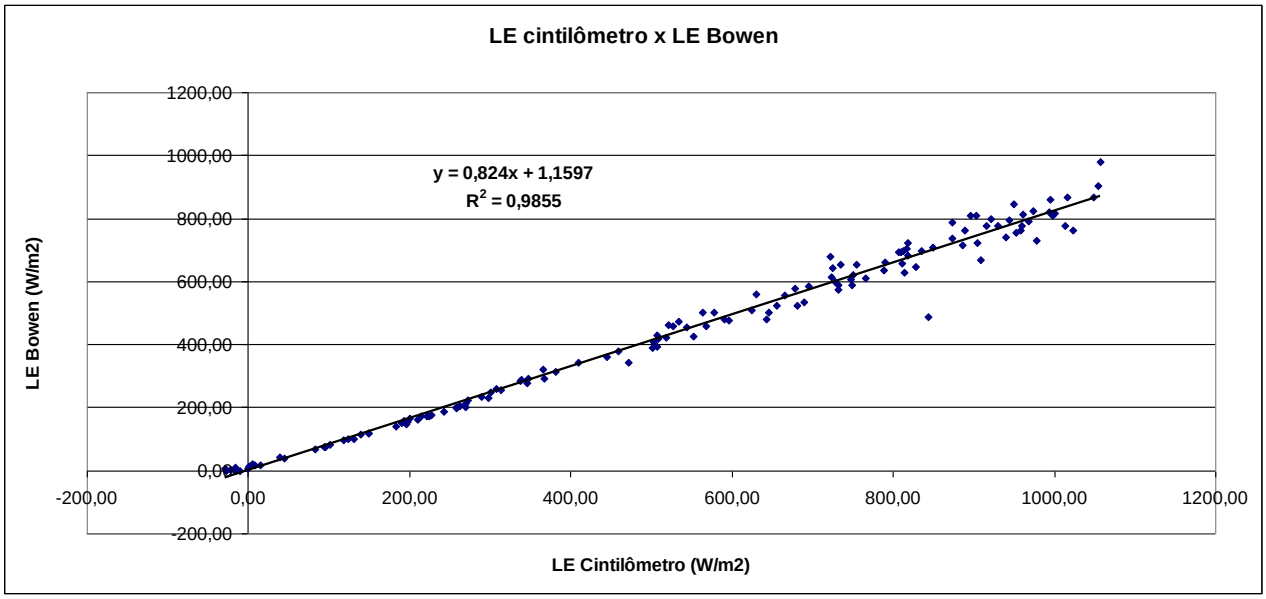


Figura 24 - Gráfico de dispersão dos dados de fluxo de calor latente entre o cintilômetro e a razão de Bowen.

Pode-se verificar que ambos os métodos, razão de Bowen e constante do índice de refração (cintilômetro) possuem correlação elevada de 0,98, demonstrando a confiabilidade dos dados levantados.

Por fim, percebe-se grande correlação dos valores encontrados para os fluxos de calor sensível e calor latente com a turbulência atmosférica. Esta informação comprova a possibilidade da utilização da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas para a estimativa da evapotranspiração.

4.2. Técnica de Triangulação de Potências Ópticas

Nesta seção será apresentada a técnica de triangulação de potências ópticas, propriamente dita, sua 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.

Verificou-se no estudo dos capítulos anteriores que a luz ao se propagar pela atmosfera pode sofrer a influência de vários fenômenos, entre eles a turbulência

atmosférica. Os efeitos da turbulência são: a cintilação, o alargamento do feixe e a divagação do feixe (*beam wander*). Neste trabalho, o *beam wander* estará em foco e os demais efeitos serão negligenciados por não apresentarem elementos que auxiliem na técnica aqui agora aplicada.

Considerando-se que a projeção do feixe óptico Gaussiano apresenta formato circular ao incidir no plano do receptor. Esta projeção tem sua posição modificada à medida que o feixe de luz é influenciado pela turbulência atmosférica. Esta movimentação da projeção do feixe é o efeito do *beam wander* percebido pelo receptor do sinal óptico. A Figura 25 ilustra a ocorrência acima.

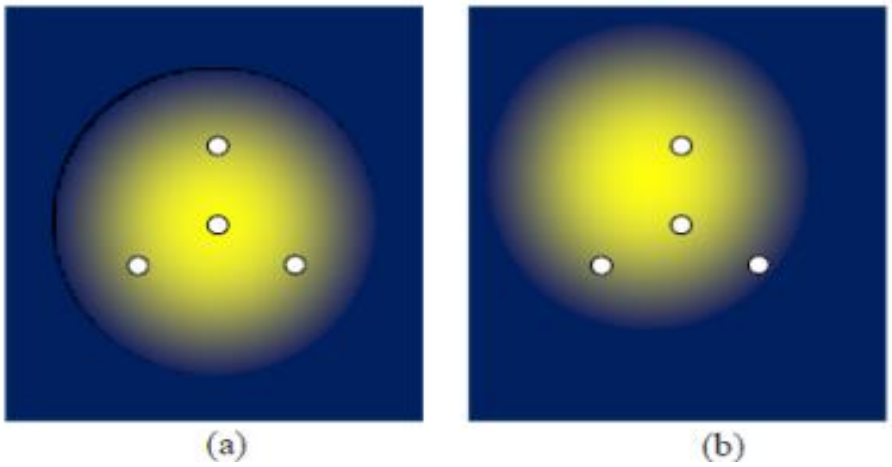


Figura 25 - Posição da Gaussiana no momento t (a); Posição da Gaussiana no momento $t+\Delta t$.

Tomando-se por base o efeito do *beam wander* sobre a projeção circular do feixe óptico no plano do receptor, concluiu-se que com a quantidade adequada de fotodetectores pode-se calcular a posição instantânea do centro deste feixe. Neste experimento, foram utilizados quatro fotodetectores. Três destes fotodetectores são posicionados de forma a constituírem os vértices de um triângulo equilátero e o quarto fotodetector foi posicionado no centro do triângulo. Estes fotodetectores são fixados a um anteparo onde o feixe LASER

incide e são assim impressionados pela potência óptica. Para o tratamento das informações dos fotodetectores é utilizado um circuito de recepção. A Figura 26 exemplifica o arranjo [2].

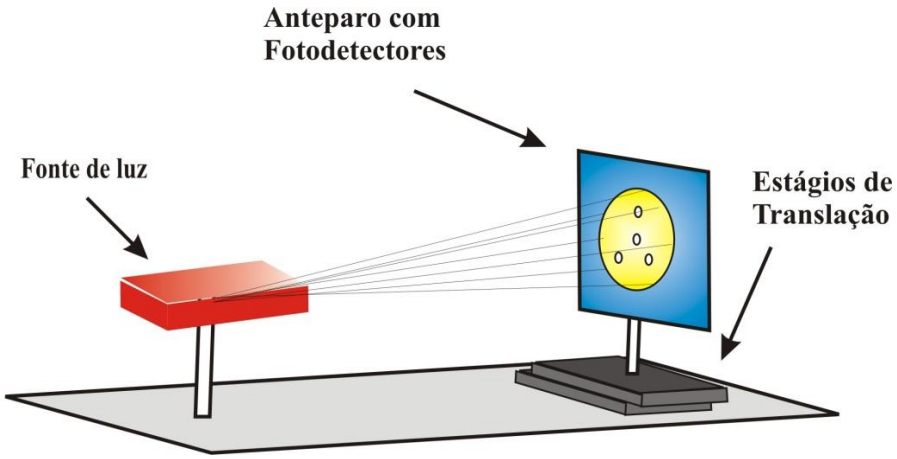


Figura 26 - Arranjo contendo 4 fotodetectores em um anteparo

Sabendo-se, então, as características da distribuição Gaussiana da projeção da 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*. Com estes dados chega-se à constante de estrutura do índice de refração que é uma medida da turbulência atmosférica.

Análise quantitativa

Tendo em vista o exposto na seção anterior, pode-se, neste momento, descrever matematicamente a técnica de medida de turbulência por triangulação de potências ópticas. Partindo-se da condição inicial onde 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 [23]:

$$P(x,y) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} \tag{4-3}$$

onde W é a largura do feixe óptico, P_0 é a potência central da distribuição Gaussiana e $P(x,y)$ a potência no fotodetector em questão. Utilizando-se então três fotodetectores D_i, em que i=1,2,3 em posições conhecidas ($\boldsymbol{x_i}$, $\boldsymbol{y_i}$) em relação à origem do plano Cartesiano, como mostrado na Figura 27, pode-se determinar a potência P_i incidente em cada um deles.

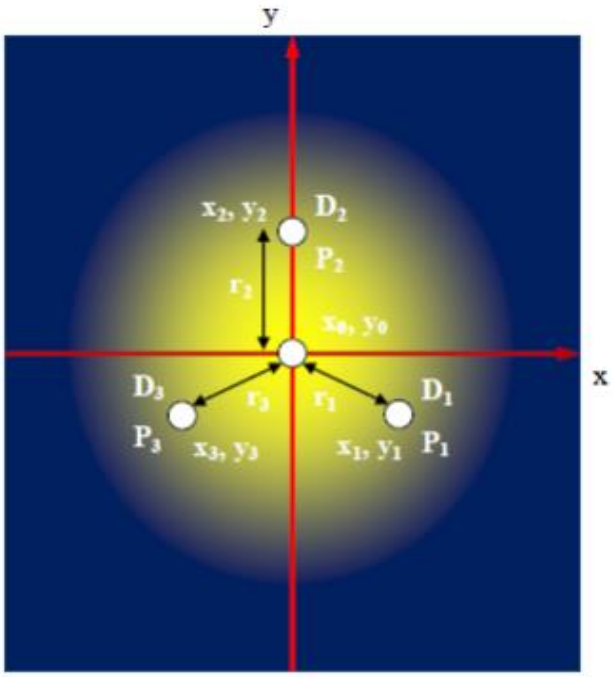


Figura 27 - Posição dos fotodetectores no anteparo.

De posse desta última informação são calculadas as distancias radiais r_i de cada fotodetector ao centro do feixe como segue:

$$\boldsymbol{P_i(x,y) = P_0 e^{-\left(\frac{r_i}{w}\right)^2}} \tag{4-4}$$

$$e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} = \frac{P_i}{P_0} \tag{4-5}$$

Fazendo $\frac{P_i}{P_0} = \overline{P_i}$ potência normalizada em cada fotodetector:

$$e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} = \overline{P_i} \tag{4-6}$$

$$ln\left(e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2}\right) = ln\,\overline{P_i} \tag{4-7}$$

$$\left(\frac{r_i}{W}\right)^2 = -ln\,\overline{P_i} \tag{4-8}$$

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

$$r_i^2 = W^2(-ln\,\overline{P_i}) \tag{4-9}$$

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

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \tag{4-10}$$

E substituindo em 4-9 monta-se um sistema de equações que definirá a posição do centro do feixe óptico pelo par ordenado (x_0, y_0):

.

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - W^2(-ln\,\overline{P_l}) = 0 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - W^2(-ln\,\overline{P_l}) = 0 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - W^2(-ln\,\overline{P_l}) = 0 \end{cases} \tag{4-11}$$

Sabendo-se então a posição do centro do feixe $[(x]_0, y_0)[(x]_0, y_0)$pode-se calcular a sua distância $r_c\, r_c$ do centro Cartesiano:

$$r_c = \sqrt{x_0{}^2 + y_0{}^2} \tag{4-12}$$

Como visto no capítulo 3 quando foi estudada a turbulência atmosférica, a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 se relaciona com a variância da distância do centro do centro do feixe ao centro de referência (r_c^2) pela equação

$$[\mathbf{r_c^2}] = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{1/3} \tag{4-13}$$

considerando-se o feixe colimado.

Como citado anteriormente, a variação da posição do centro no plano do receptor é devida ao *beam wander* e agora de posse da variância deste centro pode-se então mensurar a turbulência atmosférica através do cálculo do C_n^2 diretamente da equação 3-13.

Resolução do dispositivo baseado na Técnica de Triangulação de Potências

A distância entre os fotodetectores, o tamanho da Gaussiana W e a relação sinal ruído SNR são fatores muito importantes para a performance da técnica. Analisando a posição dos fotodetectores percebem-se duas possibilidades extremas [23].

Possibilidade 1.- Distância entre os fotodetectores >> W.

Nesta condição os valores de intensidade de potência óptica percebidos pelos

fotodetectores se tornam muito baixos. Os fotodetectores se encontram, então, fora ou quase fora da projeção circular da Gaussiana. Quando isto ocorre, os valores de potência se tornam menores que os valores do próprio ruído (. Sendo assim, o sistema de equações converge para $(x_1c, y_1c) = (0,0)$ mesmo havendo movimento do feixe.

Verifica-se que a relação entre o sinal recebido (P_i) e a potência do ruído (P_{ruido}) é imperativa para a determinação da posição do centro do feixe óptico. A relação sinal ruído, SNR é dada pela equação

$$\boldsymbol{SNR = 10\log\left(\frac{P_i}{P_{ruído}}\right) \quad (dB)} \tag{4-14}$$

A determinação da posição do centro do feixe no caso da possibilidade 1 ocorre apenas se pelo menos um fotodetector apresentar SNR >0 dB, porém o erro neste cálculo se torna muito alto. Para otimizar a medida, obtendo-se erro menor que 1%, é interessante que pelo menos um fotodetector apresente SNR> 20 dB. Porém, como o modelo utiliza um esquema de cálculo interativo onde três equações precisam ser satisfeitas o SNR pode ser menor ($SNR = 18{,}5\ dB$) .

Possibilidade 2 – Distância entre fotodetectores << W.

Nesta condição os fotodetectores encontram-se tão próximos uns aos outros em comparação com a projeção do feixe que se comportam como um ponto, aparentando ser um fotodetector. Sendo assim as variações de potência $\boldsymbol{\Delta P}$ nos fotodetectores se tornam menores que $P_{ruído}$, resultando em convergência do sistema de equações para $(x_c, y_c) = (0,0)$.

Assim, cálculo da distância ótima entre os fotodetectores com relação ao W se torna imperativa. O $r_{crítico}$ representa o valor da distância entre os fotodetectores de maior sensibilidade aos movimentos do feixe óptico e poder calculado como sendo [2]

$$\boldsymbol{r_{crítico} = \frac{\sqrt{2}}{2} W} \tag{4-15}$$

Após a análise das duas possibilidades de posicionamento dos fotodetectores com relação ao tamanho da Gaussiana W, pode-se, então, proceder ao cálculo da resolução do dispositivo utilizado nos experimentos.

Derivando-se a equação 4-1 chega-se à expressão da resolução $\boldsymbol{\Delta r}$ do dispositivo

$$\boldsymbol{\Delta r = \frac{W^2 exp\left[\left(\frac{r}{W}\right)^2\right]}{2rP_0} \Delta P} \tag{4-16}$$

Porém, quando o feixe se move a potência de um dos fotodetectores aumenta enquanto de outro diminui do mesmo valor. Sendo assim, ao invés de ter a diferença de potência mínima igual à potência do ruído, pode-se admitir que seja a metade, então $\boldsymbol{\Delta} P = \frac{P_{ruido}}{\boldsymbol{2}}$.

Substituindo o $r_{crítico}$ e o $\boldsymbol{\Delta} P$ na equação 4-14 pode-se agora de terminar a resolução limite R_L, ou seja, a melhor resolução que o sistema pode empreender.

$$\boldsymbol{R_L(W) = \frac{W exp\left[\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2\right]}{\sqrt{2}P_0} \frac{P_{ruído}}{2}} \tag{4-17}$$

4.2.1. Análise das condições micrometeorológicas da REGUA para utilização da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas

Após verificar a correlação existente entre as medidas de calos sensível e calor latente com a turbulência atmosférica no item 5.1, comprovando a viabilidade da Técnica de

Triangulação de Potências Ópticas, passou-se a análise dos requisitos para a utilização do instrumento proposto em campo. Para que o funcionamento do instrumento baseado na Técnica de Triangulação de Potências Ópticas fosse satisfatório, seriam necessários os seguintes requisitos mínimos, que foram analisados e apresentados. Estes requisitos são:

1. Verificação do diâmetro do feixe (W) no plano do receptor;
2. Verificação da potência óptica no plano do receptor;
3. Verificação da distância dos fotodetectores que favoreceria a maior sensibilidade;
4. Cálculo da resolução do instrumento;
5. Estimativa do tamanho do vórtice turbulento e verificação da ocorrência de *beam wander*;
6. Cálculo da variância da posição do feixe com o apoio do Cn^2 medido pelo cintilômetro;

1. Verificação do diâmetro do feixe (W) no plano do receptor: para esta tarefa foi considerado que o feixe óptico após atravessar o colimador passou a apresentar o diâmetro de 4 mm. Esta luz, colimada e com distribuição Gaussiana teve seu raio aumentado de duas até cinco vezes ao passar pelo expansor de feixe. Assim, considerando que a abertura numérica na saída do colimador é de 0,01º, o feixe, no plano do receptor, a 100m de distância apresentou o diâmetro mínimo de 42,9 mm e máximo de 54,9 mm.

Assim, foi realizada a análise da abertura do feixe no plano do receptor, considerando-se a variação da distância de 0 m a 300 m, visando determinar os valores para W que favorecessem a melhor sensibilidade do instrumento de acordo com o apresentado anteriormente. O gráfico da Figura 28 - Gráfico do aumento do diâmetro do feixe óptico com a distância. apresenta os resultados obtidos.

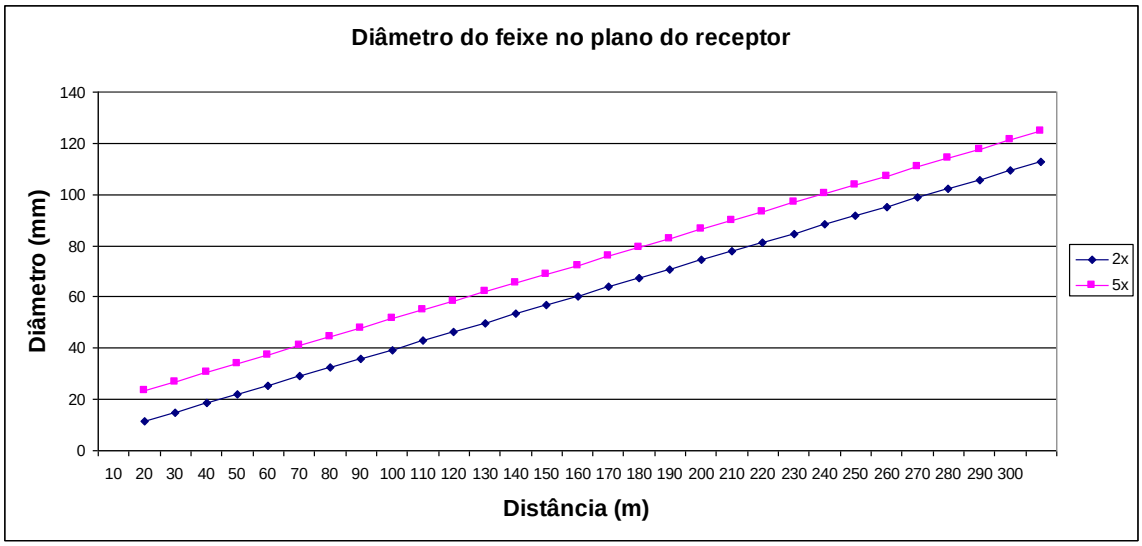


Figura 28 - Gráfico do aumento do diâmetro do feixe óptico com a distância.

2. Verificação da potência óptica no plano do receptor: para verificar a intensidade da potência óptica no plano do receptor, a respeito dos efeitos atmosféricos e a potência óptica de saída do laser constante em suas especificações técnicas. Foram realizadas duas análises: na primeira, a distância entre o transmissor e o receptor foi considerada constante em 100 m e variou-se a potência de saída do laser e na segunda análise, a distância foi variada entre 10 m e 300 m, com a potência óptica constante em 250 mW (23,91 dBm). Em ambas as análises, a atenuação considerada foi de 0,7 dB/Km. Os resultados foram apresentados a seguir.

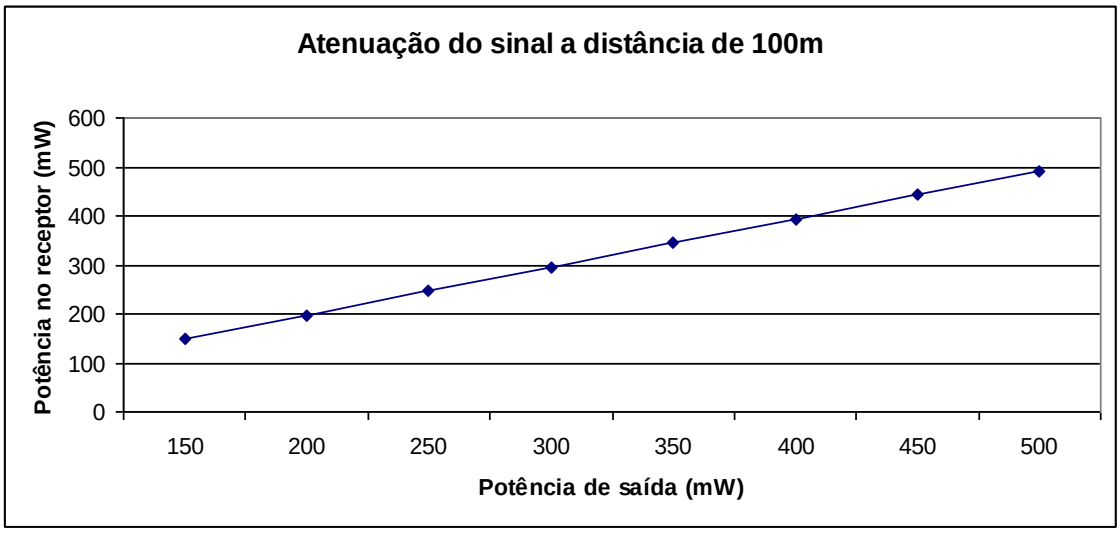


Figura 29 - Atenuação sofrida pelo sinal óptico ao se propagar por uma distância de 100 m.

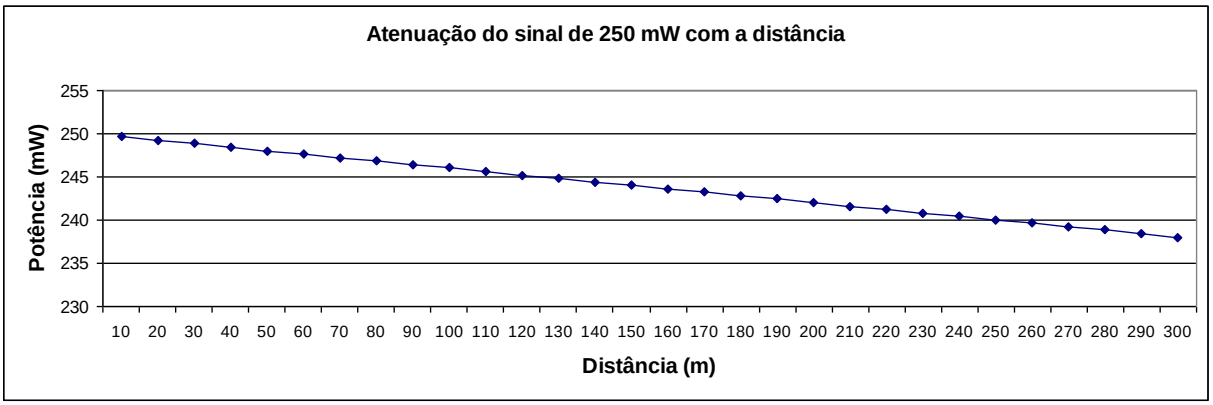


Figura 30 - Atenuação do sinal de 250mW ao se propagar por 300m.

Verificou-se um decréscimo no valor da potência a medida em aumenta-se a distância entre o transmissor e o receptor. No caso da distância fixa de 100 m, a atenuação foi de 8 W para a potência de 500 W. No caso da potência de saída fixa e a distância variando, verifica-se que para 300 m, foi observada uma atenuação de 13 W Apesar de existir o decréscimo, esta diferença não se torna significativa para as distâncias

compreendidas neste trabalho.

3. Verificação da distância dos fotodetectores que favoreceria a maior sensibilidade: tendo que vista que a maior sensibilidade do instrumento seria alcançada quando a condição elencada na equação 3-15 for alcançada, verificou-se a melhor distância entre fotodetectores para cada um dos diâmetros (W) do feixe calculados no item 1 desta seção, levando-se em consideração os aumentos de 2x e 5x do diâmetro pelo expansor de feixe.. Como resultamos temos o gráfico da Figura 31.

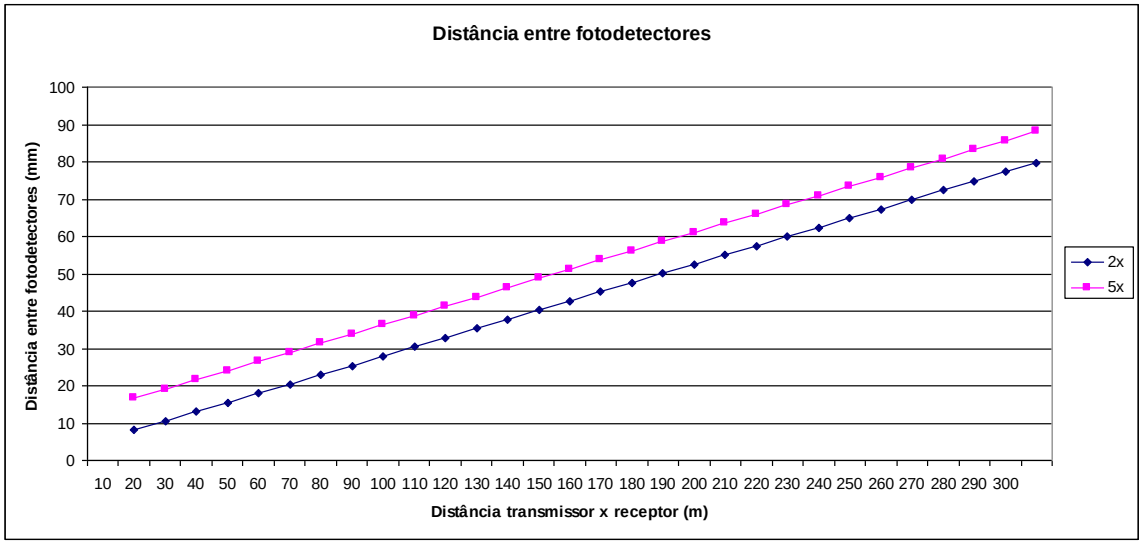


Figura 31 - Alteração da distância dos fotodetectores com o aumento da distância entre o receptor e o transmissor.

Verifica-se que a medida em que o transmissor e o receptor são afastados, e como consequência, o diâmetro do feixe aumenta, existe a necessidade de aumentar a distância entre os fotodetectores. Tendo em vista que o instrumento tem a capacidade de suportar distâncias entre fotodetectores de até 125 mm, e a distância encontrada para 300 m foi de 90 mm, pode-se considerar que este instrumento poderia realizar as medidas propostas neste trabalho mantendo sua maior sensibilidade.

4. Cálculo da resolução do instrumento: Esta etapa do trabalho exigiu a estimativa da potência do ruído a ser considerado para o cálculo da resolução, por meio da equação 4-17. Sendo assim, o ruído total considerado é composto pelo ruído térmico, pelo ruído shot e pelo ruído devido a radiação, como segue:

$$Ntotal = Nshot + Ntermico + Nradiação$$

$$Ntermico = k_B T \Delta f k_B \Delta f$$
$$Nshot = \sqrt{2qI\Delta f}$$

Para o cálculo do ruído térmico considerou-se a temperatura de 297 K e a largura de banda de 400 Hz, que satisfaz o Teorema da amostragem tendo em vista que a turbulência atmosférica é um fenômeno de até 200 Hz. O valor encontrado de ruído foi 1,64 x 10^{-15}mW.

Em seguida foi calculado o ruído shot, considerando-se a corrente média de 20 mA e a mesma banda do considerada no ruído térmico, ou seja 400 Hz, encontra-se o valor de 1,6 x 10^{-6}mW.

Por fim, realizou-se o cálculo do ruído devido à incidente de radiação solar nos fotodetectores. Levando-se em consideração o pior caso, no qual a radiação solar foi de 754,7 W/m^2, a distribuição espectral do saldo radiômetro de acordo com seu datasheet (ANEXO). O ruído encontrado para o pior caso de radiação solar foi de 55,9 x 10^{-3}mW.

Após realizar a estimativa do ruído no receptor, assim como o cálculo da potência óptica no plano receptor com uma potência inicial de 250 mW e variando-se a distância de 10 m a 300 m, pôde-se, então, calcular o valor da resolução por meio da equação 4-17. O gráfico da Figura 32 apresenta o resultado.

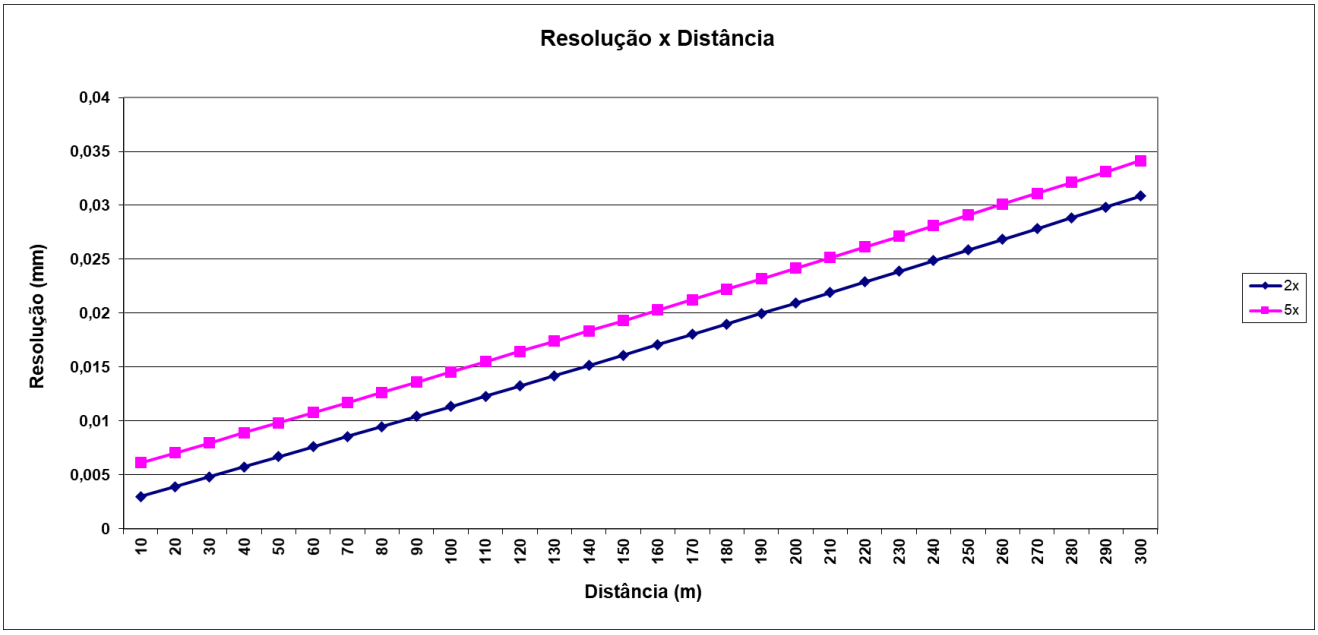


Figura 32 - Alteração da resolução calculada com o aumento da distância do transmissor para o receptor.

Verifica-se, pelo gráfico, que ocorre uma degradação da resolução da medida ao se aumentar a distância entre o receptor e o transmissor, isso porque o aumento de W diminui a densidade da potência óptica ao passo que o ruído predominante, que o devido à radiação solar, permanece constante. O aumento destes dois fatores, distância e W, concorrem diretamente para a degradação da resolução. Porém, considerando-se a distância máxima 300 m, aqui estudada, a resolução mínima é de 0,034 mm, favorecendo a utilização do instrumento, mesmo quando o movimento do feixe for mínimo.

5. Estimativa do tamanho do vórtice turbulento e verificação da ocorrência de *beam wander*: este passo é de suma importância, pois conjuntamente com o tamanho do feixe óptico incidente no plano do receptor, indicará a presença do efeito *beam wander*, imprescindível à aplicação da Técnica de Triangulação de potências ópticas. Para este cálculo foi utilizada a teoria constante no Capítulo 2.

O tamanho dos vórtices turbulentos tem relação com a altura considerada, aumentando à medida em que a altura aumenta, conforme verificado no Capítulo 2. Para o cálculo destes vórtices foram utilizados os dados levantados pela estação micrometeorológica considerando-se duas alturas, 1,89 e 2,38m. Verificou-se o valor médio dos vórtices a 1,89 m de altura é de 0,4 m e a 2,38 m de altura é de 0,61 m, um aumento de 52% para 0,5 m de diferença entre alturas. Foi analisada a influência da temperatura no tamanho dos vórtices e verificou-se que em dias mais quentes o tamanho médio do vórtice chega a ser 40% maior do que nos dias mais frios. A Figura 33 apresenta estes dados.

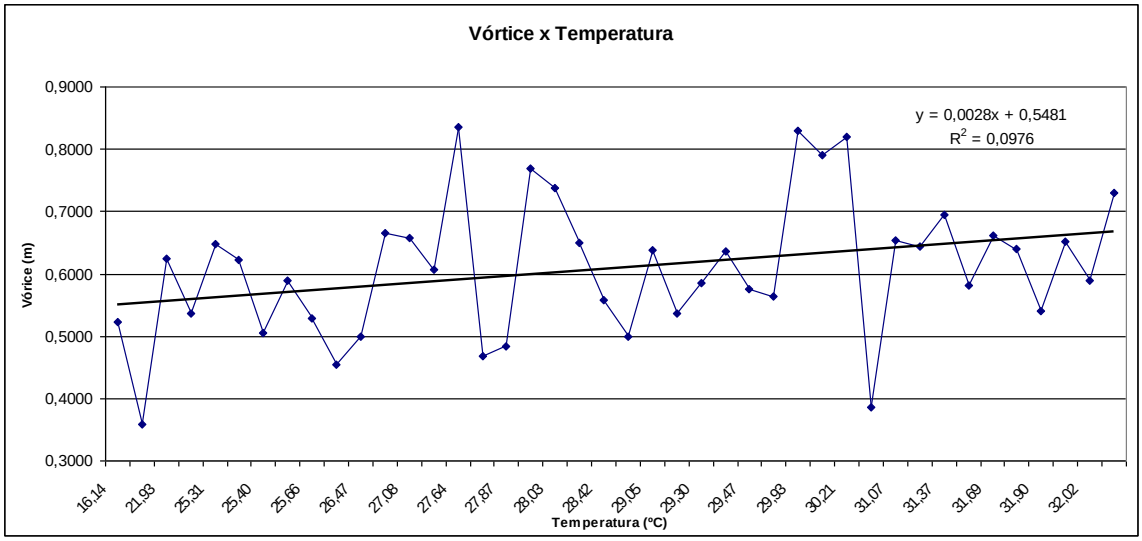


Figura 33 Alteração do tamanho médio dos vórtices turbulentos com a temperatura.

Verificou-se, como esperado, que a variação do tamanho do vórtice é intensificada com a variação da temperatura. A Figura 34 apresenta os dados levantados

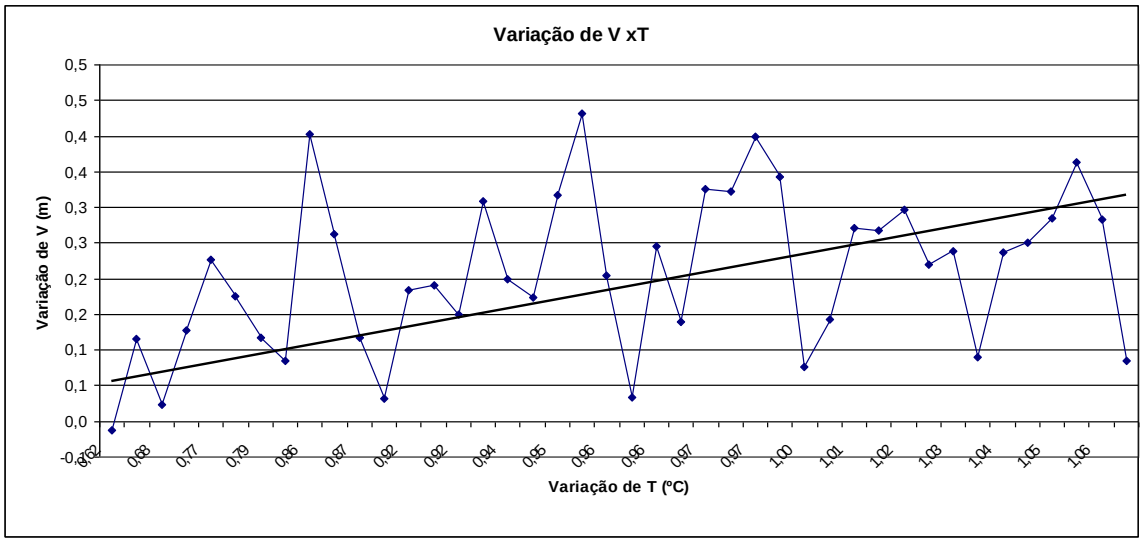


Figura 34 Alteração da variação do tamanho médio dos vórtices turbulentos com a temperatura.

Assim, se for considerado o valor médio dos vórtices turbulentos de 430 mm, a utilização do instrumento fica limitada a distância de 140m entre o transmissor e o receptor, tendo em vista que a esta distância, o W encontrado é de 42,8 mm.

6. Cálculo da variância da posição do feixe com o apoio do Cn^2 medido pelo cintilômetro: Para o cálculo da variância do feixe, utilizou-se a equação 4-13, que possui como variáveis o Cn^2, a distância entre o receptor e o transmissor e o diâmetro do feixe (W). A Figura 35 apresenta o gráfico decorrente.

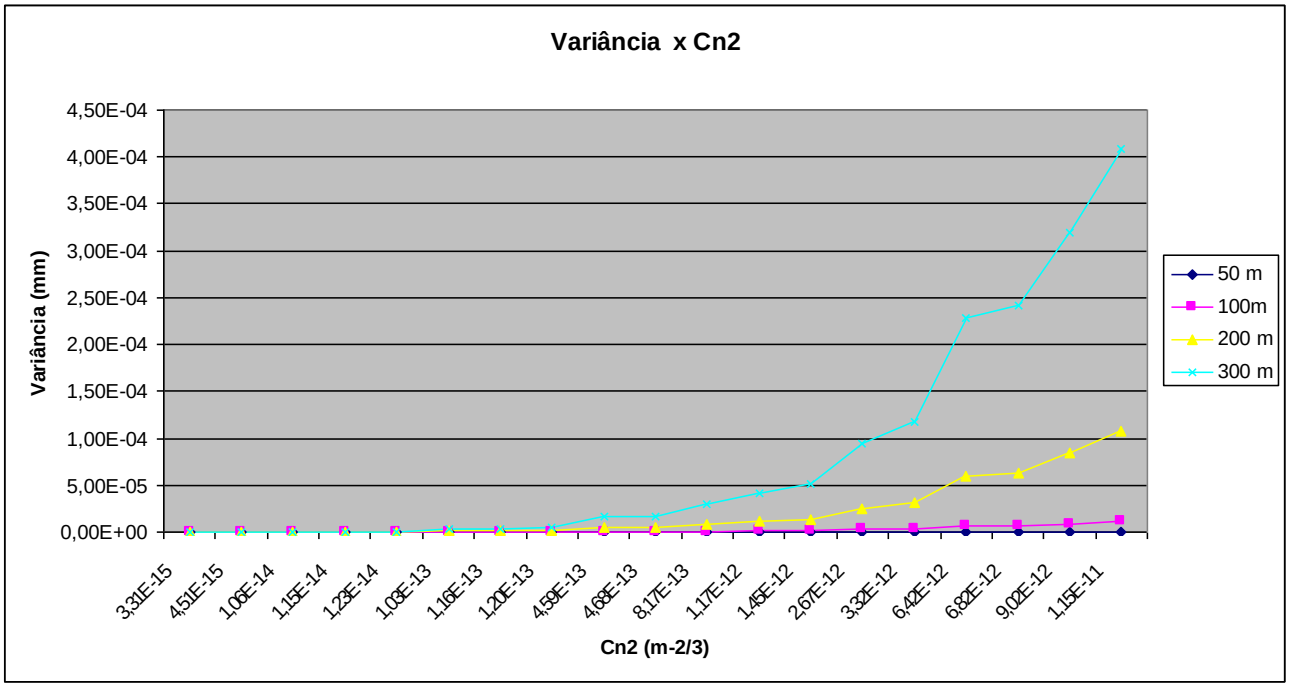


Figura 35 - Variância da posição do feixe óptico com a alteração da turbulência atmosférica;

Verificou-se que a variância encontrada tem a ordem de grandeza similar a encontrada nos experimentos conduzidos em 2013 e 2017. Interessante verificar que para um mesmo Cn^2 encontram-se valores de variância bem distintos dependendo da distância envolvida. Isto se dá pois quanto maior a distância, maior é a variância esperada para que se chegue a uma determinada turbulência. Observando-se o gráfico, percebe-se como esta grandeza é sensível à distância, pois ao se dobrar a distância, passando de 200 m para 300 m, o valor de variância quadruplicou.

Tendo em vista que as condições atmosféricas e de instalação do equipamento satisfazem os seis requisitos apresentados, pode-se afirmar que o instrumento proposto tem condições de realizar a medida da turbulência atmosférica em campo, possibilitando a estimativa do fluxo de calor sensível e por consequência a estimativa do fluxo de calor latente por meio da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas associada ao método da

constante do índice de refração.

4.2.2. Medidas de vaporização em laboratório e comparação com dados levantados em campo

A equipe do Laboratório de Comunicações Ópticas da Universidade Federal Fluminense vem desenvolvendo um instrumento, baseado na Técnica de Triangulação de Potências Ópticas, para medir a turbulência atmosférica que auxilia na estimativa da ET. A Técnica foi proposta na Universidade Federal Fluminense em 2009 [2] para realizar a medida da turbulência atmosférica por meio do *beam wander*. Foram realizados vários experimentos que comprovaram que o instrumento proposto efetivamente mede a turbulência atmosférica [25, 26].

Sendo assim, este trabalho utilizou o instrumento supracitado para a medida de evapotranspiração, tendo em vista sua capacidade de calcular o fluxo ascendente de calor. Assim, foram realizados testes para verificação da resposta do equipamento, sendo atingido o objetivo almejado.

Para a realização do experimento que visou a verificação da influência do fluxo de calor úmido sobre um feixe óptico por meio do b*eam wander*, montou-se um arranjo experimental, no laboratório de Comunicações Ópticas da UFF [23,24], consistindo e uma fonte de luz (ThorLabs 980nm, SM) acoplada à uma fibra monomodo em 980nm. O laser foi controlado por um driver Newport 5030 e um controlador de temperatura Light Wave (LDT-5525). A luz então foi acoplada a um colimador (F280 FC-B da Thorlabs) e um expansor de feixe (Beam Expander 2X5 da Thorlabs) buscando a melhor projeção Gaussiana no receptor. Do lado do receptor foram posicionados 4 fotodetectores (SFH 213 FA da Osram) filtrados para receberem apenas a luz próxima a 980nm. Um ADC (Analogic digital converter da National Instruments) foi utilizado para converter o sinal analógico em digital, o que possibilitou seu tratamento em um computador. A fonte de turbulência consistiu de um reservatório metálico com capacidade volumétrica de 7,3 litros com água

aquecida por um ebulidor. O transmissor e receptor foram separados por 8,6 m e a fonte ficou 87cm abaixo do feixe óptico, rente ao transmissor para aumentar o efeito do *beam wander*. A Figura 36 apresenta o esquema do arranjo.

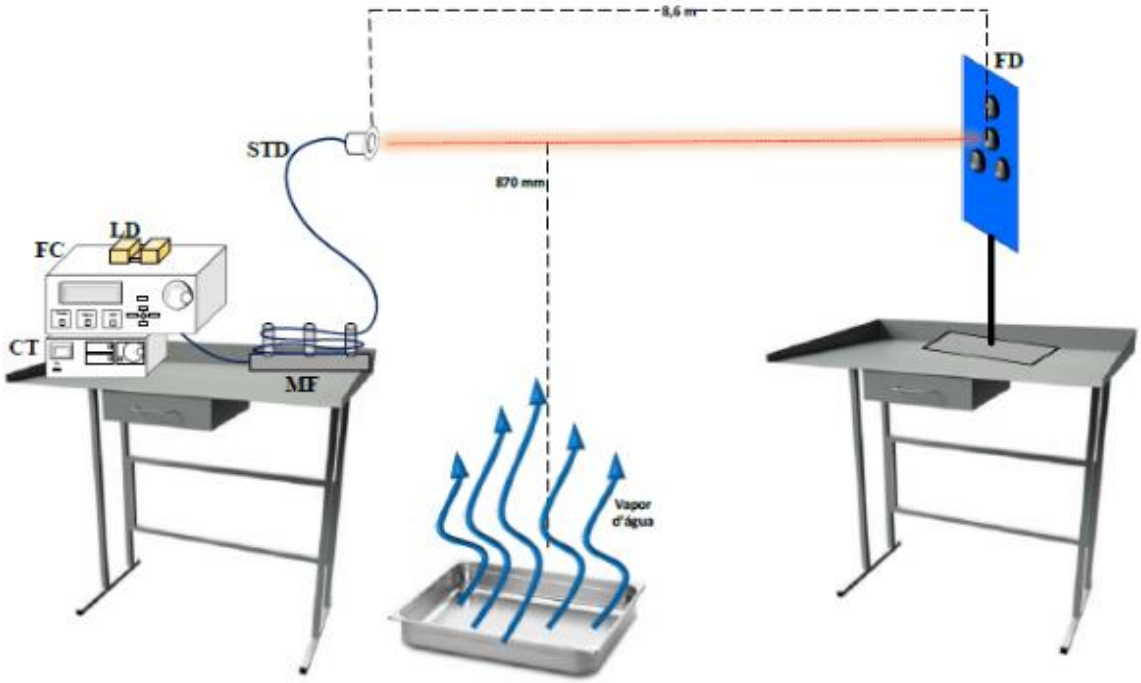


Figura 36 - Arranjo experimental apresentando o transmissor, o receptor e a fonte de turbulência.

Primeiramente, realizou-se a medida da projeção da Gaussiana e o cálculo do seu raio, encontrando-se o valor de 12,5 mm, por meio do deslocamento do centro do feixe pelo fotodetector central. Em seguida, os fotodetectores foram calibrados e todo o sistema alinhado. Procederam-se então as medidas de turbulência com vapor. Foram realizadas medidas nas seguintes temperaturas: 23, 30, 40, 50, 60 e 70 °C. Para cada temperatura foram verificadas duas grandezas: o fluxo de água a temperatura constante, correspondente à vaporização da água, e a variância do deslocamento do feixe, correspondente ao *beam*

wander.

A Tabela 1 apresenta os dados encontrados de taxa de vaporização nas diferentes temperaturas medidas. :

Tabela 1 – Resultados das variâncias de rc e das taxas de evaporação para as diversas temperaturas.

Temperatura (°C)	Taxa de evaporação (mg/h)	Variância (mm)
23	22,2	$1,697x10^{-5}$
30	43,9	$3,434x10^{-5}$
40	85,8	$1,936x10^{-4}$
50	193,6	$3,545x10^{-4}$
60	353,4	4,148x10-4
70	600,6	1,657x10-3

Podem-se traçar os gráficos de taxa de vaporização e variância em função da temperatura, como apresentado nas Figuras Figura 37 e Figura 38, respectivamente:

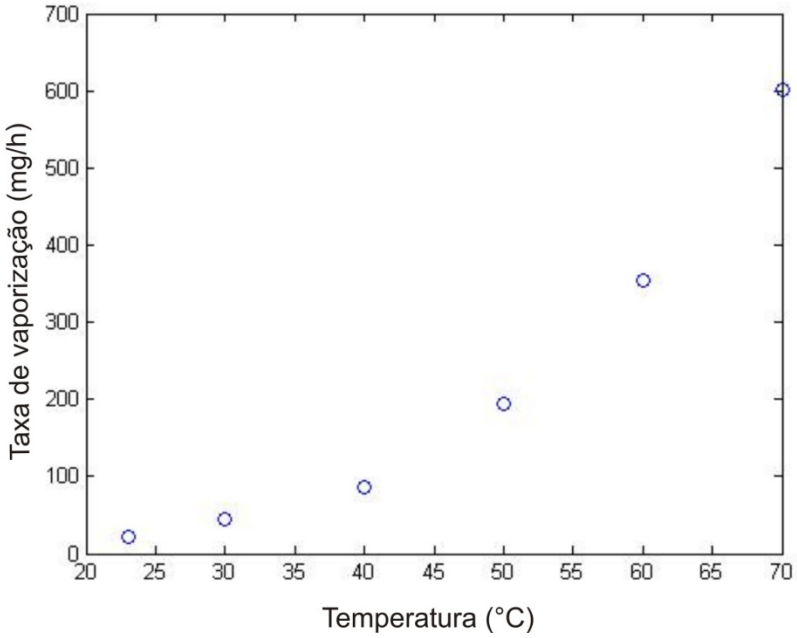


Figura 37 - Variação da taxa de vaporização em relação à temperatura.

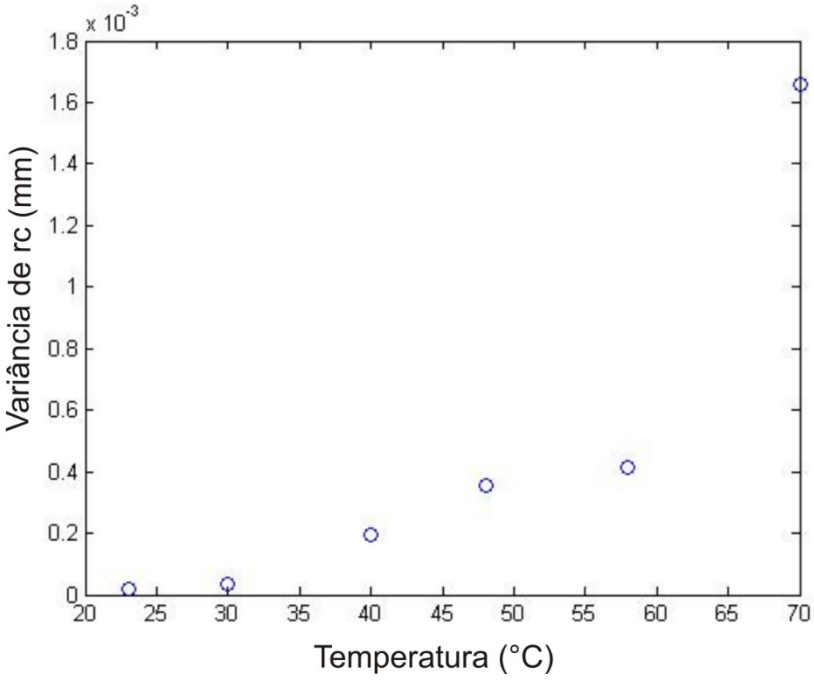


Figura 38 - Variância de rc em relação à temperatura.

Foram calculados os centros instantâneos do feixe óptico por meio das equações do Capítulo 4. A medida menos turbulenta, 23 °C, e a mais turbulenta 70 °C foram representadas graficamente como segue, nas Figura 39 e Figura 40, respectivamente:

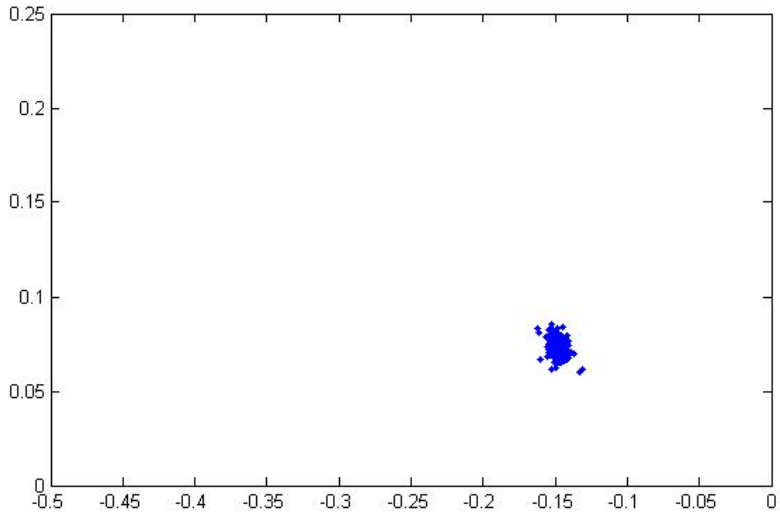


Figura 39 - Dispersão dos centros instantâneos do feixe na medida menos turbulenta (medidas em mm).

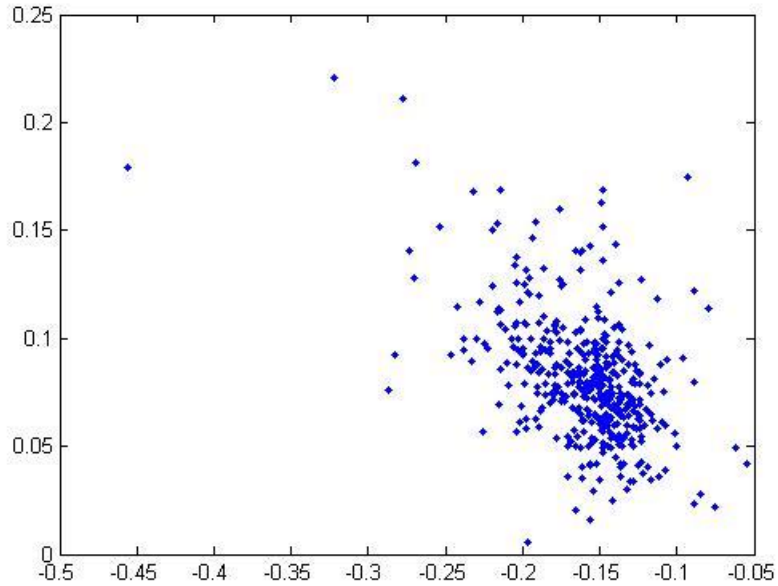


Figura 40 - Dispersão dos centros instantâneos do feixe na medida menos turbulenta (medidas em mm).

Percebe-se que há aumento dos valores de turbulência e também de vaporização da água à medida em que a temperatura aumenta. Quando realizada a correlação entre a vaporização da água e da variância de rc encontra-se um valor de 0,9427, significando grande correlação. O gráfico da Figura 41 apresenta ambas as grandezas, uma em função da outra. Fica clara a alta correlação entre a vaporização da água e a variância de rc, tendo em vista que esta relação é aproximadamente linear, como pode-se no gráfico.

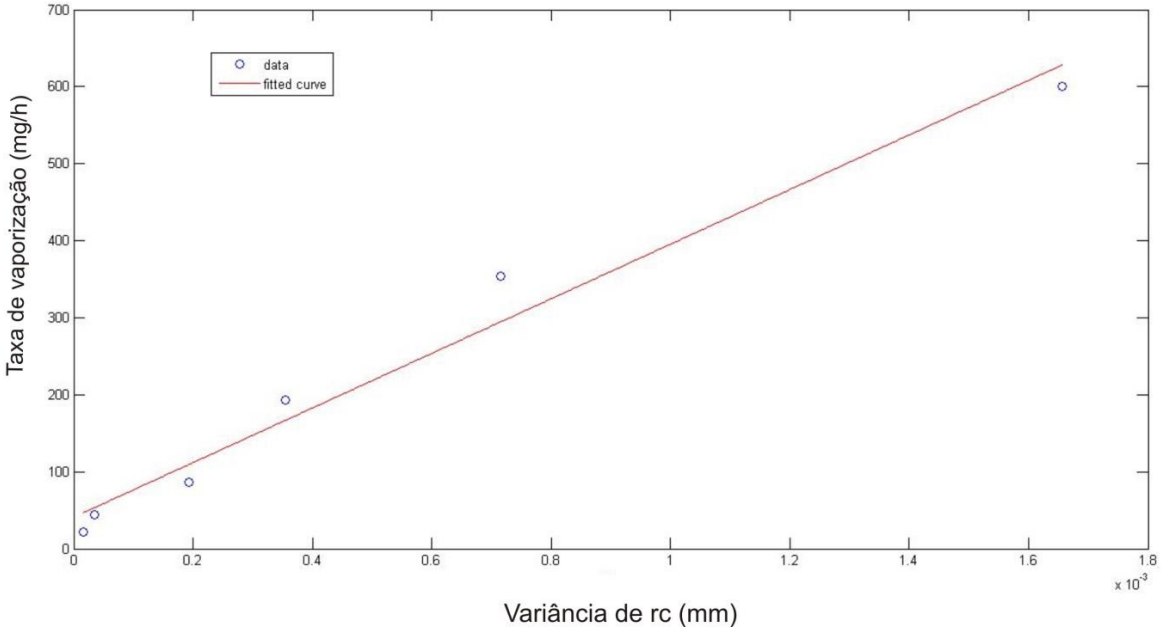


Figura 41 - Taxa de vaporização em função da variância de rc.

Sabendo-se então que existe relação entre a turbulência atmosférica e a umidade do ar, procederam-se duas medidas a 50°C, a primeira sem vapor e a segunda com vapor. A medida sem vapor apresentou valor de variância de rc de $2{,}201 \times 10^{-4}$ mm, enquanto a medida com vapor d'água apresentou valor de $3{,}145 \times 10^{-4}$ mm. Percebe-se então um valor 40% maior de turbulência para a mesma temperatura, conforme esperado. Conclui-se, então, que a técnica de triangulação de potências ópticas pode ser usada para as estimativas

de ET utilizando-se o Método da Constante do Índice de Refração e de balanço de energia.

Ao serem comparados os dados de vaporização e de calor latente levantados em campo com a estação micrometeorológica, verifica-se um comportamento similar entre ambas. A tendência das duas curvas obedece o mesmo formato. Apesar dos valores de fluxo de calor latente serem menores que os encontrados em laboratório, verifica-se coincidência em três dos cinco pontos da vaporização. Os outros dois pontos certamente seriam coincidentes no caso de uma extrapolação. A Figura 42 apresenta os dados.

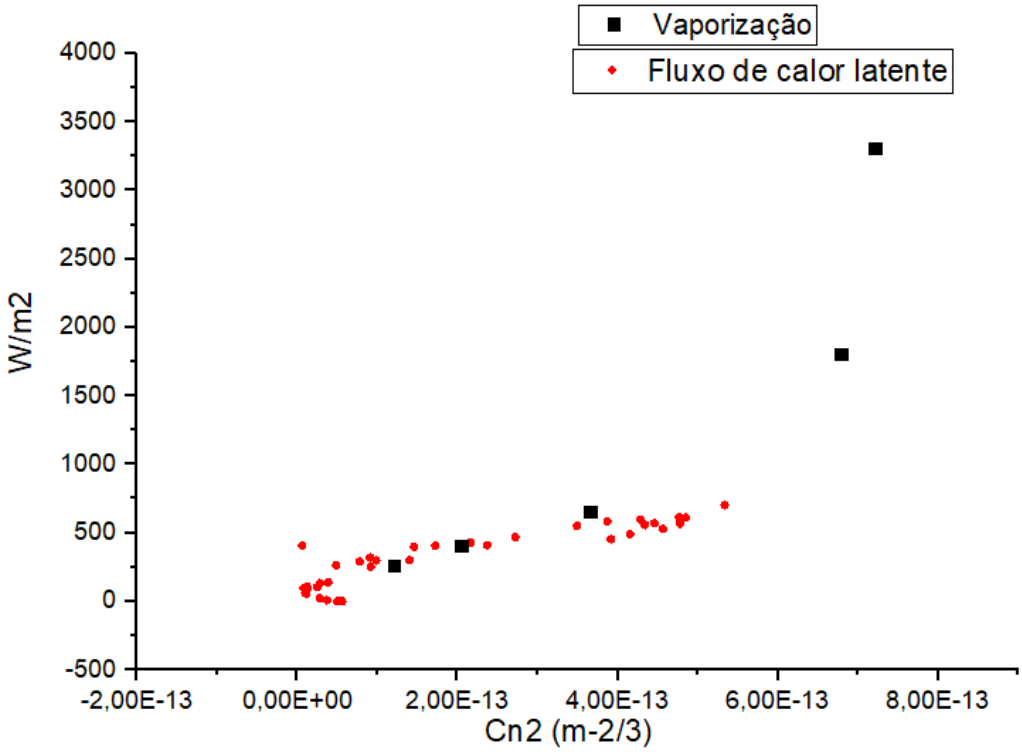


Figura 42 – Comparação entre os dados de vaporização e fluxo de calor latente

5- Conclusão

Este trabalho teve como objetivo demonstrar que a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas pode ser aplica para as estimativas de evapostranspiração. Como vantagem, esta Técnica possibilita a implementação de um equipamento que seja capaz de cobrir uma área de milhares de metros quadrados e que seja de baixo custo.

Inicialmente, foram realizadas medidas de turbulência sob influência de fluxo de vapor d'água para simular a evapotranspiração. Como resultados foi encontrada forte correlação (0,9427) entre o fluxo de vapor d'água e a variância de rc (*beam wander*). Estes resultados indicam que se pode modelar a medida direta da evapotranspiração por meio da técnica proposta, além da medida indireta por meio do balanço de energia, conduzida por meio do Cn_2. Os resultados encontrados corroboram com a teoria que elenca a influência dos fluxos de vapor d'água sobre a turbulência atmosférica, apresentando acréscimo de 40 % em seu valor.

Assim, este trabalho apresentou dados de fluxo de calor latente levantados por uma estação micrometeorológica e um cintilômetro que corroboraram para a prova do uso do instrumento proposto em campo. Os dados do cintilômetro foram tratados e comparados, encontrando-se uma correlação de 0,98 entre as duas medidas. Adicionalmente, foi verifica a correlação entre o fluxo de calor latente e a turbulência, encontrando-se 0,71. Tendo em vista os dados da estação meteorológica e do cintilômetro verificou-se que as medidas de turbulência são usadas com eficiência para a estimativa de fluxo de calor sensível,

Desta forma, realizou-se a análise de seis requisitos que poderiam impedir ou limitar as medidas com um instrumento baseado na Técnica de Triangulação de Potências Ópticas. Foram eles: diâmetro do feixe adequado, potência óptica suficiente no plano do receptor, distância adequada dos fotodetectores, resolução do instrumento para as condições de diâmetro do feixe e ruído encontrados, cálculo do tamanho dos vórtices turbulentos e verificação da existência de *beam wander*, resolução do instrumento adequada e por fim o a comparação da variância da posição do feixe óptico provocada pela

turbulência medida pelo cintilômetro com valores levantados nos experimentos anteriores a este. Todos os seis requisitos foram satisfeitos, comprovando a exequibilidade da estimativa de calor sensível e por conseguinte de calor latente com o instrumento proposto.

Por fim, verificou-se a relação existente entre os dados levantados no laboratório do fluxo de vapor de água e os dados levantados em campo pelo cintilômetro e a estação micrometeorológica. O resultado foi que a maioria dos valores coincidiu quando verificado o fluxo de calor latente com a turbulência atmosférica. Os valores que não foram coincidentes na verdade apresentaram valor de fluxo de calor latente maiores que os medidos em campo. Isso se deu devido ás temperaturas utilizadas no laboratório terem sido maiores que as encontradas em campo. Estes dados provam que a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas pode ser usada com sucesso para as medidas de calor latente.

Como próximos passos, sugere-se realizar medidas com o instrumento em campo, novamente comparando com dados levantados pela estação micrometeorológica e pelo cintilômetro. Adicionalmente, podem-se desenvolver novos modelos de estimativa de fluxo de calor latente e sensível. Ressalta-se, que a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas não foi empregada até o momento para as medidas aqui propostas.

Bibliografia

[1] PEREIRA, A. R., SEDIYAMA, G. C., VILLA NOVA, N.A., Evapotranspiração. Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola, Campinas SP, 2013.

[2] S. V. N. Henrique, B. A. P. Lopez e R. R. Marques., "A new triangularion-like technique for the evaluation of the refractive index structure constant (Cn2) in free-space optical links.," *IEEE Journal of Light Technology,* vol. 29, pp. 3603-3610, 2011.

[3] R. TANG e Z.-L. LI, "On the dicrepancy of spatial variability-based models for regional evapotranspiration estimation," em *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Québec, Canadá, 2014.

[4] J. LU, Z.-L. LI e G. YU, "Evaluation of SEBS-Estimated evapotranspiration using large apertire scintillometer data for complex underslying surface," em *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munique Alemanha, 2012.

[5] LEE, S.H., LEE, J.H., KIM, B.O, "Estimation of turbulent sensible heat and momentum fluzes over a heterogeneous urban area usinsg large aperture scintillometer", Advaances in Atmospheric Sciences, Vol 32, 2015.

[6] S. LIU, M. HUANG e Q. ZHU, "A study of surface sensible heat fluxes with large aperture scintillometers," em *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003.

[7] M. GALLEGUILLOS, F. JACOB e S. LIANG, "Mapping daily evapotranspiration over a mediterranean vineyard watershed," em *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, Hawaii, 2010.

[8] PRITCHARD, PHILIP J., *Introduction to fluid mechanics.* John Wiley & Sons, EUA, 2011.

[9] V. T. CHOW, D. R. MAIDMENT and L. W. MAYS, Applied Hydrology, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hil, 1988.

[10] MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. Principles of Environmental Physics. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier, Oxford. 1990.

[11] ANDREWS, L. C.; PHILLIPS, L.. *Laser Beam Propagation Through Random Media.* 2. ed. Estados Unidos da América: Spie Press, 2005.

[12] TATARSKII, Valerian Il'ich. *The Efffects of the Turbulente Atmosphere on Wave Propagation*. (Traduzido para NOAA por Israel Program for Scientific Translations, Jerusalém, 1941)

[13] R. G. ALLEN, L. S. PEREIRA, D. RAES e M. SMITH, "FAO Irrigation and Drainage Paper - Crop Evapotranspiration," 2006

[14] A. R. PEREIRA, L. ANGELOCCI e P. SENTELHAS, Agrometeorologia:

Fundamentos e Aplicações Práticas, Ed. Agropecuária Ltda, 2002

[15] S. M. H. e J. T. G., Agrometeorology Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture, New York: The Haworth Press, 2004.

[16] A. LENCASTRE e F. M. FRANCO, Lições de Hidrologia, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1992.

[17] G. C. SEDIYAMA, " Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica," *Revista Brasileira de Agrometeorologia,* vol. 4, n. 1, 1996

[18] N. T., Y. N. Rim e G. WESSOLEK, Technical note on measuring run-off dynamics from pavements using a new device: the weighable tipping bucket, Hydrology and Earth System Sciences, 2011.

[19] W. M. L. MEIJNINGER, O. K. HARTOGENSIS e W. KOHSIEK, "DETERMINATION OF AREA-AVERAGED SENSIBLE HEAT FLUXES," *Boundary-Layer Meteorology,* 2002.

[20] TATARSKI,V.,*Wave propagation in a turbulent medium.* MCGraw-Hill, Nova York, 1961

[21] ANDREWS. L., PHILLIPS, R. E HOPEN,C., *Laser Beam Scintillation with applications.* SPIE Press, Washington, 2001.

[23] OLIVEIRA, G., SILVA. V. N. H, BARBERO. A. P. L. , *Caracterização da constante de estrutura do índice de refração (Cn2) através de triangulação de potências ópticas,* MOMAG, Curitiba 2014

[24] OLIVEIRA, G. SILVA, V.N.H., BARBERO, A.P.L., RIBEIRO, R.M. COELHO, T.V.N., BESSA, A.S., *Measurements of indoor/outdoor atmospheric turbulence through optical triangulation method.* Measurement Science and Technology, IOP, 2017.

ANEXO A

KIPP & ZONEN
SINCE 1830

LAS MkII Scintillometer

For the Measurement of Heat Fluxes and Evaporation at Large Scales

Path averaged measurement of sensible heat fluxes
Range 100 m to 4.5 km
Stand-alone operation

Integrated data logger with GPS
Digital data processing
Real-time data display

Introduction

Heat fluxes and evaporation at the Earth's surface are of great importance to the fields of meteorology and hydrology.

Sensible heat flux is the transfer of heat between the Earth's surface and the air above, due to a temperature difference between them. The direction of this flux can be seen by measuring temperature at two heights. Latent heat flux is the result of the evaporation of water or transpiration by vegetation. For this reason, this flux is often referred to as evapo-transpiration (ET). Both fluxes are major components of the Earth's surface energy budget.

Accurate continuous measurements of these parameters is often required for research projects and monitoring applications. Where the measurements need to be done on a field or landscape scale, or for validating satellite data, the traditional in-situ point measurement techniques are not sufficient.

The Kipp & Zonen LAS MkII is a large aperture scintillometer designed to provide continuous measurements of sensible heat flux and turbulence statistics (C_n^2) over long distances, from 100 m up to 4.5 km, for energy balance studies and evaporation monitoring.

Thanks to the extended range, scintillometer measurements can be compared to the typical pixel sizes of satellite-based instruments for ground validation applications.

Applications

Within the field of hydrology the energy balance plays an important role. For example, accurate measurements of the sensible heat flux and evapotranspiration are of great importance as inputs for hydrological models.

Scintillometer systems are used to make local measurements of the surface energy balance components, including evapo-transpiration. These measurements can then be used to 'ground-truth' energy flux estimates derived from satellite data, at field and regional scales.

In the field of (micro) meteorology the structure parameter of the refractive index of air (C_n^2) is an important factor in determining the turbulent characteristics of the boundary layer.

LAS MkII Large Aperture Scintillometer

The LAS MkII Scintillometer is Kipp & Zonen's solution for long term unattended monitoring of C_n^2 and heat fluxes within the planetary boundary layer.

LAS MkII is easy to install and operate and requires virtually no maintenance. Data collection has never been more convenient thanks to analogue and digital outputs. Setup and data processing is made simple by the built-in key pad and display.

For the advanced monitoring of evapo-transpiration, sensible and soil heat fluxes as well as net radiation, we offer our LAS MkII ET system as a turn-key solution.

Choice of Configuration

The system configuration depends on the parameters of interest for your application. The table below provides an overview of the required components for several types of measurements.

Parameter to measure	Equipment to use
C_n^2 Sensible heat flux (H and H_{scint})*	**LAS MkII** • Transmitter & Receiver • 10-cm apertures for short paths
**Using fixed values for meteorological parameters*	
C_n^2 Sensible heat flux (H and H_{scint})*	**LAS MkII + optional meteorological sensor kit** • Transmitter & Receiver • 10-cm apertures for short paths • Wind speed • Temperature • Pressure
**Using measured data for meteorological parameters*	
C_n^2 Sensible heat flux (H and H_{scint})* Latent heat flux ($\lambda_v E$) Evapo-transpiration (ET)	**LAS MkII ET system (with extended meteorological sensor kit)** • Transmitter & Receiver • 10-cm apertures for short paths • Wind speed & direction • 2x Temperature • Pressure • Net radiometer • 2x Soil heat flux • Data acquisition system in IP65 enclosure
**Using measured data for meteorological parameters*	

For the data acquisition system of the LAS MkII ET system additional options are available regarding power supply, telemetry, etc.

LAS MkII large aperture scintillometer is designed to offer easy installation, configuration and operation, requiring only limited maintenance.

The LAS MkII can be installed and configured using its built-in display and key-pad without the need for any extra equipment. This prevents the inconvenience of carrying additional instruments to the site of installation.

The LAS MkII has a built-in data logger and digital outputs for direct PC connection. Real time measurements are shown on the display. The C_n^2 data is also available as an analogue output to be recorded using virtually any type of data acquisition system. The internal clock is automatically synchronised with the included GPS antenna.

The EVATION® software included with the LAS MkII scintillometer is a fully featured configuration, monitoring and data processing program. The scintillometer can be controlled using EVATION® and it offers many data processing options and real time data display. This way you have all your results at the push of a button.

The processing parameters are customizable for more advanced or application specific processing options.

Data files from virtually any data logger can be read to process data from LAS MkII analogue or serial outputs recorded on an external data logger.

- Easy configuration and operation
- Low maintenance
- Real-time data display
- Analogue and digital output
- Direct PC connection
- Accurate time from GPS

Building a System

An optional meteorological sensor kit is available which includes wind speed, air temperature and barometric pressure and is connected directly to the scintillometer receiver. This provides a complete measurement solution in a single, easy to use, system.

The LAS MkII ET system comes complete with scintillometer, meteorological sensors, and data acquisition. The EVATION® software package for easy processing and display of data is included as standard. Depending on the installation requirements several options are available for remote communication and power supply. The system is fully pre-configured for simple installation.

Specifications LAS MkII	
Path length / Aperture diameter	100 m to 1 km (10 cm Aperture) 250 m to 4.5 km (15 cm Aperture)
Wavelength	850 nm (10 mW IR LED)
Scintillation bandwidth	10^{-2} to 10^{+4}
Carrier frequency	6.5 to 7.5 kHz (50% duty cycle)
Features	
Interface options	Digital RS-232/422 Analog output 0 to 2.5 V
Instrument control and data display	Built-in display and key-pad or remote via digital interface
Pan and tilt adjustment	Integrated
Heating system	Programmable lens heater (receiver) Self-regulating lens heater (transmitter)
Data processing	Internal processing of C_n^2, free sensible heat flux and other parameters Built-in data logger with GPS antenna for time and location
External sensor connection	GPS + optional sensor kit: wind speed, temperature and pressure
Software included	EVATION® (instrument control and data analysis)
Operating requirements	
Power requirements	12VDC / 6W (heater off) / 54W (max. heater on)
Operating temperature	-20°C to +50°C
Humidity range	0 to 100% non-condensing
Environmental protection	IP65
Weight per transmitter/receiver	8.5 kg
Options	
Meteorological sensor kit	Includes wind speed, temperature and pressure sensor Fixed with 10 m cable and waterproof plug for direct connection to LAS MkII receiver

Note: The performance specifications quoted are worst-case and/or maximum values

KIPP & ZONEN
SINCE 1830

Go to www.kippzonen.com for your local distributor

HEAD OFFICE

Kipp & Zonen B.V.
Delftechpark 36, 2628XH Delft
P.O. Box 507, 2600 AM Delft
The Netherlands
+31 15 2755 210
info@kippzonen.com
www.kippzonen.com

A4.MAN - V1.10

Kipp & Zonen B.V. reserve the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice

Boundary Layer Scintillometers

BLS450

Doc71029091

Large Aperture Scintillometer

Photo courtesy of Cold and Arid Environmental and Engineering Research Institute, China

Features

- measures turbulence over large spatial scales
- maximum path length 6000 m
- LED array eases transmitter alignment
- LED array allows transmitter to be mounted on vibrating towers
- built-in Receiver Alignment Monitor
- Signal Processing Unit performs all calculations
- 6 GB built-in data storage
- remote access
- infrared window heating available

The Scintec BLS450 Large Aperture Scintillometer measures atmospheric turbulence and heat flux over path lengths between 250 m and 6000 m. As part of a meteorological station it can also be used to determine the evapotranspiration over extended areas.

A scintillometer senses turbulence between an optical transmitter and a receiver. The operation principle is based on the modulation of light by atmospheric refractive index fluctuations in the air. The phenomenon is called scintillation and is the reason why stars twinkle at night.

Compared to conventional turbulence measurements with point sensors, scintillometers gather spatially representative results with lower statistical scatter and shorter averaging times. As a double-ended remote sensing system, scintillometers also allow access to terrains like forest or water without need to install in-situ sensors.

Unlike other large aperture scintillometers, the Scintec BLS Series uses LED arrays which produce wide emission angles. The wide emission angle virtually eliminates the need for transmitter alignment and provides more accurate measurement results. In addition, it facilitates the use on towers which are often prone to vibration.

Applications

- surface energy balance
- satellite data ground truth
- plant evapotranspiration
- agrometeorology, forestry
- hydrology, water management
- turbulence studies
- atmospheric dispersion
- optical propagation conditions
- defence weather

Scintec

BLS450

Boundary Layer Scintillometers

Data output

Data output includes (but is not limited to):

- structure parameter of refractive index fluctuations (C_n^2)
- structure parameter of temperature fluctuations (C_T^2)
- sensible heat flux
- mean, standard deviation, minimum and maximum of intensity
- scintillation index (at user-defined wavelength and path length)
- Fried diameter (at user-defined wavelength and path length)
- raw intensity data
- data quality code

Description	Specifications	Remarks
No. of transmitting disks	1	horizontally spaced
No. of LEDs	444 / 18	infrared / visible
Optical output power	7.5 W peak	at 880 nm wavelength
Transmitter divergence	16°	full width at half maximum
Receiver field of view	8 mrad	receiver alignment automatically monitored
Corrections for absorption fluctuations and outer scale effect	no	automatic
Crosswind measurement capability	no	in continuous mode only
Path length	100 / 500 to 6000 m	with / without Path Reduction Aperture
Pulse repetition rates	1, 5, 25 Hz or continuous	
Integration time	1 sec to 60 min	
Output ports	Ethernet, RS-232, analogue	ASCII
Data Storage Capacity	6 GB	
Internal clock	date and time	
Operating voltage	10 to 15 VDC	AC power supply available
Power consumption: Transmitter "Long Path", "Boost"	30 W / 7 W / 4 W / 2 W	continuous mode / 25 Hz / 5 Hz / 1 Hz pulse repetition rate
Power consumption: Receiver and SPU	16 W	
Operating temperature	-35 to +50°C (-30 to +120°F)	
Dimensions and weight: Transmitter	18 x 18 x 14 cm / 4.5 kg	
Dimensions and weight: Receiver	61 x 32 x 16 cm / 7.6 kg	
Dimensions and weight: SPU	33 x 23 x 18 cm / 8 kg	

Scintec AG

Willhelm-Maybach-Str. 14
D-72108 Rottenburg
Germany

Tel. +49 74 72 9 86 43 0
Fax +49 74 72 9 80 87 14

info@scintec.com

Scintec Corporation

1730 38th Street, Boulder,
Colorado 80301
USA

Tel. +1 303 666-7000
Tel. +1 303-666-8803

ussales@scintec.com

www.scintec.com

Specifications are subject to change without notice.
Patent: DE 19751144

Scintec

Scintec is ISO 9001 quality certified

LP NET 14

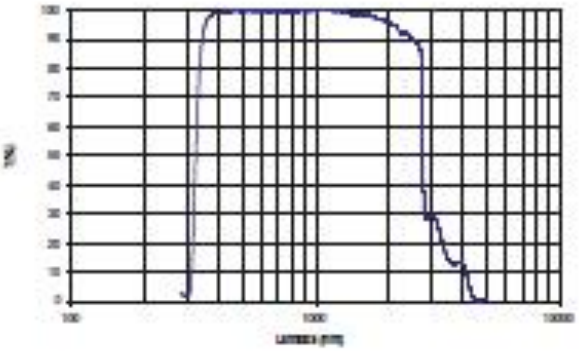
LP NET 14
NET IRRADIANCE METER

LP NET 14 is a 4-component net-radiometer for the measurement of the net radiation between 0.3µm and 45 µm.
The net-radiometer consists of two pyranometers (one for the measurement of the global radiation E_{sw}↓ and the other one for the measurement of the reflected solar radiation E_{sw}↑) and a pair of pyrgeometers (one for the measurement of the infrared radiation emitted by the sky E_{lw}↓ and the other one for the infrared emitted by the ground surface E_{lw}↑).
The LP NET 14 is equipped with a temperature sensor (NTC). The measurement of the temperature is needed for the measurement with the two pyrgeometers, in fact, the far infrared is derived by measuring the thermopile output and by the knowledge of the instrument's temperature.
The net radiometer is suitable for outdoor use in all weather conditions and requires little maintenance.

2 Working principle

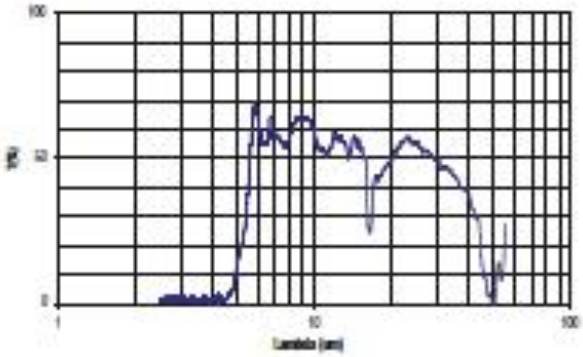
The pyranometers that make up the LP NET 14 measure the radiation for wave lengths between 0.3µm a 3.0µm, while the pyrgeometers measure the irradiance in the spectral range between 5µm and 45µm.

The pyranometers are based on a thermopile sensor which sensitive surface is covered by a matt black paint so to allow the instrument not to be selective at various wavelengths. The pyranometer spectral range is determined by the transmittance of the two glass domes type K. (See fig. 1).
Radiant energy is absorbed by the thermopile black surface, creating a difference of temperature between the centre of the thermopile (hot junction) and the pyranometer
body (cold junction). Thanks to the Seebeck effect, the difference of temperature between hot and cold junction is converted into a Difference of Potential.



Graphic 1: Relative spectral response of the Delta Ohm pyranometers.

Also the pyrgeometers are based on a thermopile. In this case, to protect the thermopile, silicon discs are used. Silicon is transparent to wavelengths longer than 1.1µm therefore on the inside of the window there is a filter to block radiation up to 4.5- 5 µm. The silicon external surface, which is exposed to weathering, is coated with a scratch-resistant coating (DLC) to ensure strength and durability in all weather conditions. The anti-scratch coating offers the advantage of cleaning the surface without risk of scratching the window. Graphic 2 reports the transmission of the silicon window according to the wavelength variation:



Graphic 2: Transmission of the silicon window.

Radiant energy is absorbed / radiated from the surface of the blackened thermopile, creating a temperature difference between the centre of the thermopile (hot junction) and the body of pyrgeometer (cold junction). The temperature difference between hot and cold junction is converted into Potential Difference thanks to the Seebeck effect.
If the pyrgeometer temperature is higher than the radiant temperature of the portion of sky framed by the pyrgeometer, the thermopile will irradiate energy and the output signal will be negative (typical situation of clear sky) vice versa if the pyrgeometer temperature is lower than that portion of sky framed, the signal will be positive (typical situation of cloudy sky).
Therefore, for the calculation of the ground infrared (E_{lw}↓), besides the thermopile output signal, is necessary to know the T temperature of the pyrgeometer, as reported under the formula 1:

$$E_{lw}\downarrow = E_{tpm} + \sigma T_g^4 \qquad 1$$

Where:

E_{tpm} = net radiation (positive or negative), measured by the thermopile [W m^{-2}], the value is calculated by the sensitivity of the instrument (C) [µV/ (W m^{-2})] and by the output signal (U_{out}) from formula 2:

$$E_{tpm} = \frac{U_{out}}{C} \qquad 2$$

σ = Stefan-Boltzmann constant (5.6704x10^{-8} W m^{-2} K^{-4});

Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit
Silicon PIN Photodiode with Very Short Switching Time
Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant

SFH 213
SFH 213 FA

SFH 213

SFH 213 FA

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 and reel

Anwendungen

- Industrieelektronik
- „Messen/Steuern/Regeln"
- Schnelle Lichtschranken für Gleich- und Wechsellichtbetrieb
- LWL

Applications

- Industrial electronics
- For control and drive circuits
- Photointerrupters
- Fiber optic transmission systems

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code
SFH 213	Q62702P0930
SFH 213 FA	Q62702P1671

Grenzwerte
Maximum Ratings

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	T_{op}; T_{stg}	– 40 … + 100	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	50	V
Verlustleistung Total power dissipation	P_{tot}	150	mW

Kennwerte (T_A = 25 °C)
Characteristics

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 213	SFH 213 FA	
Fotostrom Photocurrent V_R = 5 V, Normlicht/standard light A, T = 2856 K, E_V = 1000 lx	I_P	135 (≥ 100)	–	µA
V_R = 5 V, λ = 870 nm, E_e = 1 mW/cm²	I_P	–	90 (≥ 65)	µA
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\,max}$	850	900	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit S = 10% von S_{max} Spectral range of sensitivity S = 10% of S_{max}	λ	400 …1100	750 … 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	1	1	mm²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	1 × 1	1 × 1	mm × mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 10	± 10	Grad deg.
Dunkelstrom, V_R = 20 V Dark current	I_R	1 (≤ 5)	1 (≤ 5)	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, λ = 870 nm Spectral sensitivity	S_λ	0.62	0.59	A/W
Quantenausbeute, λ = 870 nm Quantum yield	η	0.89	0.86	Electrons / Photon