



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA
AMAZÔNIA**

RARDILES BRANCHES FERREIRA

**EFEITO DA ESTRUTURA DE TORRES MICROMETEOROLÓGICAS
NAS MEDIDAS DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA: PROJETO ATTO**

SANTARÉM

2021

RARDILES BRANCHES FERREIRA

**EFEITO DA ESTRUTURA DE TORRES MICROMETEOROLÓGICAS NAS
MEDIDAS DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA: PROJETO ATTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais; Ufopa; Área de concentração: Ciências Ambientais
Orientador Dr. Júlio Tota da Silva
Co-orientador Dr. Raoni Aquino
Silva de Santana

SANTARÉM

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- F383e Ferreira, Rardiles Branches
Efeito de estrutura de torres micrometeorológicas nas medidas de turbulência atmosférica: Projeto ATTO. / Rardiles Branches Ferreira. – Santarém, 2021.
48 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientador: Julio Tota da Silva
Coorientador: Raoni Aquino Silva de Santana
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia.
- I. Torres. 2. Sombreamento. 3. Análise espectral. I. Silva, Julio Tota da, *orient.*
II. Santana, Raoni Aquino Silva de, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 533.62098115

RARDILES BRANCHES FERREIRA

**EFEITO DA ESTRUTURA DE TORRES MICROMETEOROLÓGICAS NAS
MEDIDAS DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA: PROJETO ATTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais; Ufopa; Área de concentração: Ciências Ambientais

Conceito:

Data de Aprovação ___/___/___

Dr. Júlio Tota da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dr. Raoni Aquino Silva de Santana (Co-orientador)
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dr. Rodrigo da Silva
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dr. Antônio Marcos Delfino de Andrade
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dr. Raphael Pablo Tapajós
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dr. Troy Patrick Beldini
Universidade Federal do Oeste do Pará

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais: Francisco Ferreira e Rosalina Branches,
por todo amor incondicional e educação
dispensada.*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES)- Código de Financiamento 001.

Gostaria de agradecer:

Ao programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia-PPGRNA;

Ao meu orientador Júlio Tota pela amizade, conhecimento adquirido desde a graduação até o presente momento, paciência e às doses de sabedoria disponibilizadas ao lado do laboratório e no Bar da Su;

Ao professor Rodrigo da Silva por me ensinar de forma lúdica e paciente a definição de fluxo;

Ao professor José Mauro por ter me dado a oportunidade de ingressar na pesquisa;

Aos colegas e amigos do laboratório de Física e Química da Atmosfera e do mestrado por todos os momentos de descontração e aprendizado;

Ao professor Raphael Tapajós por me ajudar com os *scripts* em R mesmo que isso tivesse que ser feito de madrugada e pela amizade desde a graduação;

Ao professor Antônio Marcos pela disponibilidade em ler e corrigir esse manuscrito;

Ao professor Raoni Santana por sanar as minhas dúvidas;

A Deliane Penha por sempre compartilhar as suas reflexões sobre a ciência e instigar em mim o pensamento crítico e pela amizade;

Aos irmãos que a vida me deu: Jorge Eder, Natália Wanzeler, Matheus Silva e Cláudio Junior por evitarem de me chamar para beber nesse período;

A minha segunda Mãe, Elana Wanzeler por me acolher no período mais difícil da minha vida e me suportar até hoje;

A minha namorada, Vanessa Bentes por entender a ausência, as elocubrações da minha cabeça, as crises de ansiedade e principalmente por me apoiar;

A Vicente Carneiro, por me ensinar a valorizar o trabalho desde cedo, a José Bandeira Carvalho pelas maravilhosas aulas de ‘paleontologia’ e por ser o tio postiço mais perfeito que alguém poderia ter. A Nilza Siqueira por me incentivar desde cedo a não se conformar com respostas óbvias. E por fim, aos meus queridos pais que não polparam esforços para que eu pudesse escolher ser o que eu quisesse ser. Eu amo vocês.

EPÍGRAFE

*“Livre, reto e são é teu arbítrio agora,
e não o seguir seria um erro: assim te declaro guia, senhor e
mestre de ti mesmo.”*

*Virgílio a Dante às portas do paraíso,
A Divina Comédia.*

RESUMO

O efeito de sombreamento é citado nos estudos de camada limite como uma fonte de incertezas devido a deformação do vento médio pela torre e a atenuação da velocidade na região de esteiras. Para evitar esses efeitos físicos, alguns pesquisadores de camada limite descartam os dados da região de esteiras. O presente estudo analisou a dissipação de energia cinética turbulenta (ϵ) e o comportamento da subcamada inercial do espectro da turbulência de dois anemômetros sônicos, na região de esteiras de duas torres de 80 metros de secção transversal distintas entre si (Retangular e triangular) em uma floresta ombrófila densa na região Amazônica. Os resultados da análise espectral mostraram perturbações nas componentes v e w e um decaimento de energia diferente do previsto no efeito cascata de energia de Kolmogorov na região de alta frequência da subcamada inercial do espectro da turbulência da torre Retangular, ambos atribuído à produção de turbulência por esteiras. Grandes picos de ϵ na região de esteiras da ordem de $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ atestam que a torre Retangular deforma muito mais o escoamento do vento médio. Todavia a distribuição de velocidades do vento médio não apresenta diferenças significativas entre as duas torres, indicando que os ventos fracos estão associados a topografia e a rugosidade no ATTO. A quantidade de dados a serem descartados alcança 18% se levarmos em considerações todas as contribuições da região de esteiras, mas a diferença entre as duas torres não foi significativa para o mês estudado.

Palavras-chave: Torres. Sombreamento. Análise espectral.

ABSTRACT

Shadow effect have been cited as a source of uncertainty in atmospheric boundary layer studies due to mean wind deformation by the tower and its velocity attenuation in the wake region. To avoid this physical effect, most researchers discard data from the wake region. The presenting study analyzed the turbulent kinetic energy dissipation (ϵ) and the inertial subrange behavior of turbulence spectra from two sonic anemometers at wake region of two 80 meters towers of distinct cross-section (square and triangular) in a dense rainforest (*floresta ombrófila densa*) in the Amazonian region. Spectral analysis results attempt to v and w components disturbance and an energy decay different from preview in Kolmogorov's law at high frequency of inertial sub-range, both due wake turbulence production. Large peaks of ϵ in the wake region of the order of $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ attest that the rectangular tower deforms the mean wind flow much more, but the velocity distribution does not show differences between the two towers, indicating that weak winds are associated with topography and roughness in the ATTO. The amount of data to be discarded reaches 18%, if is consider all the contributions from the wake region, but the difference between the two towers in the amount of data discarded was not significant for the month studied.

Keywords: Towers. Shadowing. Spectral analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista do plateu onde está localizado o sítio experimental ATTO-CLAIRE (Cooperative LBA Airborne Regional Experiment) /IOP-1-2012.	20
Figura 2 - Desenho esquemático das torres do projeto ATTO e arranjo dos anemômetros sônicos.	21
Figura 3 - Vista aérea da torre triangular.....	22
Figura 4 - Vista aérea da torre Retangular de 80 m.....	22
Figura 5 - Correlação significativa entre os conjuntos de dados das duas torres.	27
Figura 6 - Distribuição mensal da velocidade do vento médio na torre retangular.....	30
Figura 7 - Distribuição mensal de velocidade do vento na torre triangular.	30
Figura 8 - Média de 10 minutos da ECT agrupada em 10° a cada 07dias.	32
Figura 9 - Critério de estabilidade de Monin-Obukhov. A linha horizontal representa a região neutra ($-0.02 > \xi < 0.02$).....	33
Figura 10 - Desvio padrão da componente w. Os valores abaixo de 0.45 (linha tracejada horizontal) são predominantes na região de esteiras (a partir da linha tracejada vertical) nas duas torres.	34
Figura 11 - Dia 1° de março. região inercial do espectro turbulento no quadrante 180-225° e surgimento de um pico na alta frequência nos resultados da torre Retangular...	35
Figura 12 - Perturbação na região de alta-frequência na subcamada inercial, no intervalo de 180° a 225°, período diurno do dia 12 de março de 2012.	36
Figura 13 - Média de 30 minutos de ϵ desde o Meio-dia até as 17horas (UTC-4).	37
Figura 14 - Dia 25. Decaimento de energia na torre triangular e formação acentuada de um platô nas 3 componentes da torre Retangular.....	38
Figura 15 - Dia 16 de março de 2012. Formação de platô nas 3 componentes ao longo de 2 horas.	39

Figura 16 - Formação de platô na torre triangular no dia 16 de 15:30 a 1730 40

Figura 17 - Distribuição de velocidades no periodo entre 15-21 de março..... 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos equipamentos e distribuição ao longo das torres. 23

Tabela 2 - Predominância do vento (%) na torre Retangular durante o mês de março de 2012. A predominância do vento é na direção nordeste e leste..... 28

Tabela 3 - Predominância do vento (%) na Torre Triangular durante o mês de março de 2012. 29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	O princípio da conservação de massa e o balanço de energia cinética na camada limite atmosférica	14
1.2	Cascata de energia de kolmogorov-obukhov	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Geral	19
2.2	Específicos	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Sítio de pesquisa	19
3.2	Análise estatística	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Distribuição da velocidade do vento	27
4.2	Energia cinética turbulenta	31
4.3	Análise espectral da região sub-inercial	34
4.4	Região de sombreamento	40
5	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O uso de torres instrumentadas com anemômetros sônicos e outros instrumentos de medidas tem se intensificado no mundo todo para a medição de variáveis, tais como, velocidade do vento, temperatura, umidade (BALDOCCHI et al., 2001). Normalmente os anemômetros são montados no topo ou perpendicular à torre em uma extensão metálica chamada “boom”. A estrutura das torres é do tipo treliçada (triangular), plataforma (Retangular) e mastro (cilíndrica) (MUNGER et al, 2012). Diversos efeitos físicos estão relacionados a alocação de uma torre em um campo de vento. A torre é um obstáculo ao escoamento do ar e da mesma forma que em ensaios de túnel de vento, o escoamento do ar é acelerado nas laterais e atenuado na região de esteiras da torre (MOSES & DAUBEK, 1961). Essas deformações no escoamento do ar afetam as medidas realizadas por anemômetros situados na região de esteira, também denominada de região de sombreamento.

Estudos sobre os efeitos físicos associados ao sombreamento se concentram em identificar a região de sombreamento e quantificar a redução de velocidades do vento médio nessa região (CEMAK & HORN, 1968; BARTHLOTT & FIEDLER, 2003; McCAFFREY et al., 2020) outros autores se limitam a abordar o sombreamento como uma incontinência do experimento e a indicar procedimentos para evitá-lo (KAIMAL & FINNIGAN, 1994; MUNGER et al., 2012). O desenho experimental para identificar essa região é similar na maioria dos estudos, anemômetros em sentidos opostos e na mesma altura, (KLINE, 2004; BRUGREMAN, 2016; KONOW, 2015) com algumas exceções, como o trabalho de Barthlott & Fiedler (2003) que usaram análise espectral da subcamada inercial e o de McCaffrey et al. (2017) que usou um LiDAR apontado para a região de esteiras da torre.

A teoria na qual se baseiam todos os estudos na região de sombreamento da torre, é calcada na dinâmica dos fluídos, teoria da turbulência homogênea e na teoria estatística da turbulência (TAYLOR, 1938; KOLMOGOROV, 1941 a, b; BATCHELLOR, 1953; KOLMOGOROV, 1962; TENNEKES & LUMLEY, 1972). Os resultados apontam anisotropia na região inercial do espectro turbulento (SEIGNER et al., 1976), aumento da energia cinética turbulenta (McCAFFREY et al., 2017) além da redução de velocidades devido a conversão da energia cinética do vento médio em energia cinética turbulenta (KAIMAL & FINNIGAN, 1994). Quando a direção predominante do

vento é oposta a direção do anemômetro, a torre sombreia o anemômetro através da geração de turbulência mecânica pela estrutura treliçada. Uma torre meteorológica modifica significativamente o escoamento de ar, a média da velocidade do vento e a direção do vento, assim como a estrutura turbulenta do ar (BARTHLOTT & FIEDLER, 2003).

No projeto Amazonian Tall Tower Observatory (ATTO) existem atualmente três torres de medidas equipadas com anemômetros sônicos. A maior delas mede 325 metros e é considerada a maior torre de pesquisa do mundo. As outras duas torres medem 80 metros e tem secção transversal triangular e retangular respectivamente (ANDREAE et al, 2015). Geralmente, as torres de secção transversal triangular, são utilizadas em estudos de fluxo de escalares, balanço de energia e aportam sistemas de Eddy covariance (BALDOCHI, 1999; TOTA et al., 2008; FITZJARRALD & MOORE, 1990; SALESKA et al., 2004; DIAS-JÚNIOR et al., 2017). As torres com secção transversal quadrada ou retangular estão associadas a estudos sobre a química da atmosfera (RINNE et al., 2002; NÖLSCHER et al., 2016; PFANNERSTILL et al, 2018). A configuração das torres no ATTO no ano de 2012 era semelhante a outros sítios de pesquisa precursores na região amazônica, e.g. sítio de pesquisa do projeto LBA no km 67 na Floresta nacional do tapajós (FNT) e na Reserva Nacional de Cuieiras (ZF2).

Para dirimir as distorções introduzidas pela deformação do escoamento devido ao efeito de sombreamento no anemômetro, Bruggeman (2016) ressalta que o anemômetro sônico deve ser colocado a uma distância de pelo menos 3 vezes o diâmetro da secção transversal da torre. Outros estudos recomendam um distância de 7 vezes o diâmetro da secção transversal da torre (LUBITZ & MICHALAK, 2018). Todavia, a distância do anemômetro para a torre por si só, não garante que as medidas não tenham influência do sombreamento (KONOW, 2015).

De posse dessas informações, pesquisadores de camada limite sobre florestas amazônicas (KRUIJT et al, 2000; DIAS-JUNIOR et al, 2019) e em outras regiões do mundo (FORTUNIAK et al, 2015; ORTIZ et al, 2020), normalmente descartam os dados oriundos da região de sombreamento. No entanto para Barthlott & Fiedler (2003), entender os efeitos físicos na região de sombreamento é importante, visto que em alguns casos apenas dados da região de sombreamento estão disponíveis. Por exemplo, no

ATTO, onde os dados foram medidos, a direção predominante do vento muda ao longo do ano e a topografia é complexa (ANDREAE et al., 2015). A topografia e a rugosidade são fatores que influenciam diretamente no escoamento do ar acima e abaixo do dossel (KATUL et al., 2006; SANTANA et al., 2018; SOUZA, 2019; CHAMECKI et al., 2020).

Nesse trabalho, o desenho experimental não apresenta anemômetros montados em sentidos opostos em nenhuma altura das torres do Projeto ATTO e a identificação da região de sombreamento se dará através de análise espectral. Nas próximas sessões serão abordadas as principais teorias que norteiam os estudos na camada limite e que são a base teórica desse estudo. Lembrando que os efeitos relativos à produção de esteiras são de microescala e não estão relacionados ao efeito do vento na estrutura e sim a como a estrutura deforma o escoamento do ar, e como a região de esteiras pode ser identificada em terrenos complexos.

1.1 O PRÍNCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE MASSA E O BALANÇO DE ENERGIA CINÉTICA NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A camada limite desempenha um papel crucial na transferência de energia na forma de vapor d'água, calor e momento (BUSINGER, 1968). Na camada limite atmosférica, o escoamento do ar pode ser dividido em 3 categorias principais: vento principal, turbulência e ondas. A separação da velocidade por decomposição de Reynolds é apresentada na equação 1. Seja U o vetor velocidade do vento:

$$U = \bar{U} + u' \quad (1)$$

Onde \bar{U} , é o vento principal, e u' , é a turbulência ou ondas. O vento principal, é responsável pela advecção, enquanto a turbulência é responsável pelo transporte vertical de escalares e tem dimensão de velocidade ($m.s^{-1}$). As ondas são eficientes em transporte de momento e energia e estão associadas ao cisalhamento do vento principal e ao escoamento principal sobre obstáculos. Para dados medidos por anemômetros, a decomposição de Reynolds da velocidade do vento é fundamental para o cálculo das equações do movimento de fluidos através de descritores estatísticos (STULL, 1988). O conjunto de equações que formam a fundação da teoria da camada limite são as equações do movimento de um fluido newtoniano viscoso, compressível, em um sistema de

rotação. O escoamento turbulento por definição tem propriedades viscoelástica e não linear (BUSINGER, 1968).

O fluido é considerado um meio contínuo, ou seja, um elemento de volume infinitesimal, contém uma grande quantidade de moléculas. Matematicamente, o estado do fluido é descrito por funções que nos dão a distribuição da velocidade $\mathbf{v}=\mathbf{v}(x, y, z, t)$ do elemento de fluido e de duas quantidades termodinâmicas, a saber, densidade $\rho=\rho(x, y, z, t)$ e pressão $p=p(x, y, z, t)$.

Considerando um volume qualquer V_0 e um fluido de densidade ρ , a massa desse fluido é denotada pela integral

$$\int \rho dV \quad (2)$$

Tomando o escoamento desse fluido em um elemento de superfície $d\mathbf{f}$ de V_0 , em que $d\mathbf{f}$ é um vetor com direção ao longo da normal e a magnitude igual a área do elemento de superfície, o produto escalar de $\rho\mathbf{v}$ com o vetor $d\mathbf{f}$ é a massa desse fluido escoando pela área do elemento de superfície por unidade de tempo. A massa total que sai de V_0 é a integral de superfície ao longo do volume de controle

$$\oint \rho\mathbf{v}d\mathbf{f} \quad (3)$$

O decréscimo por unidade de tempo da massa do fluido no volume V_0 pode ser escrita como

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV \quad (4)$$

Dessa forma

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = - \oint \rho\mathbf{v}d\mathbf{f} \quad (5)$$

Colocando o termo da direita na forma de uma integral de volume pelo teorema do divergente, temos

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) dV = 0$$

$$\int \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \right] dV = 0$$

como essa equação é válida para qualquer volume de controle, ela pode ser reescrita como

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (6)$$

Que é a forma diferencial da lei de conservação de massa ou equação da continuidade (LANDAU & LIFSCHITZ, 1987). A lei da conservação de massa expressa que a quantidade de massa contida em um volume deve ser igual ao balanço das massas que entram e saem deste volume.

Uma consequência da lei da conservação de massa, é o aumento de velocidade do escoamento de um fluido nas laterais de um obstáculo alocado na direção do escoamento desse fluido (LESIUER, 2008). Por outro lado, a diminuição da velocidade na região de formação de esteira, está associada a dissipação de energia cinética pela viscosidade. O escoamento turbulento atmosférico pode ser pensado como uma superposição de vórtices. Esses vórtices variam de tamanho e energia, e a sua interação uns com os outros e com o vento principal transforma a energia cinética do vento principal em energia cinética turbulenta. A energia cinética turbulenta pode ser produzida ou dissipada em vórtices menores por cisalhamento, flutuabilidade e pela produção de esteiras. À medida que os vórtices vão se decompondo em vórtices menores, a viscosidade se encarrega de dissipar a energia cinética turbulenta em energia interna (calor) (KAIMAL & FINNIGAN, 1994).

O ar atmosférico na camada limite pode ser considerado um fluido incompressível e newtoniano. Para um fluido ideal, a energia cinética das moléculas é diretamente proporcional a sua temperatura. Em altas temperaturas, as colisões se tornam mais frequentes e a transferência de energia cinética de uma molécula com maior energia ao colidir com uma molécula de menor energia aumenta (CENGEL, 2002). Em um fluido, é conveniente expressar a energia cinética por unidade de massa. A equação $k = \frac{1}{2} m \mathbf{v}^2$, sendo k a energia cinética e \mathbf{v} o vetor velocidade, assume a forma

$$\frac{k}{m} = \frac{1}{2} \mathbf{v}^2$$

Em um escoamento de ar na atmosfera \mathbf{v} é o vetor velocidade do vento nas direções horizontal ou zonal (u), meridional (v), e vertical (w). Usando a equação 1, vemos que a energia cinética por unidade de massa pode ser escrita da seguinte forma $\frac{EC}{m} = \frac{1}{2} U^2$, sendo $U = u, v, w$, e usando a decomposição de Reynolds para cada componente de U , é nos permitido separar a energia cinética média (ECM) da energia cinética turbulenta (ECT) e calculando a média da ECT/m (STULL, 2015) temos:

$$\frac{ECT}{m} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \bar{e} \quad (7)$$

Desse arranjo em termos das componentes do vento, a taxa de variação da ECT é dada pela derivada material de \bar{e}

$$\frac{D\bar{e}}{Dt} = \frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = -(\overline{u'w'}) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{g}{\theta} (\overline{w'\theta'}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'p'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{ew'}) - \epsilon \quad (8)$$

O primeiro termo da direita é a produção por cisalhamento, seguido pela produção por flutuabilidade ou empuxo, transporte de pressão, transporte turbulento e por último a dissipação de energia pela viscosidade (KAIMAL & FINNIGAN, 1994).

Devido as características dos fluidos newtonianos é intuitivo que o regime dos escoamentos na atmosfera também sejam dependentes da temperatura do ar e da superfície e que a ECT seja afetada por esse gradiente ao longo da camada limite superficial. Em outras palavras, estabilidade atmosférica caracteriza a propensão de um escoamento a permanecer ou torna-se turbulento ou laminar, seja de forma mecânica (cisalhamento ou *shear*) ou por convecção (flutuabilidade ou *buoyancy*) (STULL, 1988). Notadamente, a estabilidade atmosférica pode explicar as variações da ECT e em escoamentos na região de esteiras de torres ou mastros, contribui para distinguir entre os efeitos próprios da topografia local, daqueles provocados por sombreamento (CANTERO et al., 2021).

1.2 CASCATA DE ENERGIA DE KOLMOGOROV-OBUKHOV

A hipótese de Taylor sugere que para alguns casos especiais, a turbulência deve ser considerada congelada ao ser advectada pelo sensor. Então a velocidade do vento pode ser usada para traduzir as medidas de turbulência como uma função do tempo para o seu correspondente no espaço (STULL, 1988). Taylor demonstrou que a transformada de Fourier da correlação entre duas velocidades é a uma função do espectro de energia e exprime a distribuição de energia cinética do escoamento (BATCHELOR, 1953).

Esses resultados, lançam a base para a teoria estatística da turbulência de Kolmogorov-Obukhov e nos permitem a análise da turbulência como um espectro de energia onde para cada escala, está associada uma quantidade de energia cinética. O espectro turbulento é dividido em 3 regiões principais, a saber: região de produção de turbulência, região inercial e a região de dissipação de energia (KAIMAL & FINNIGAN, 1994).

A teoria estatística da turbulência formulada por Obukhov e Kolmogorov em 1941, propunha a existência de uma região inercial onde a energia seria função unicamente da viscosidade, do número de onda e da dissipação de energia cinética. O efeito cascata de energia, onde a energia de um grande vórtice é transferida para outro menor e assim sucessivamente até ser totalmente dissipado pela viscosidade, ocorre nessa região do espectro da turbulência (BIRNIR, 2013). A equação de balanço de energia cinética turbulenta brevemente considerada na seção anterior, é importante para o método de análise espectral da subcamada inercial na região de sombreamento porque na subcamada inercial, a energia não é produzida e nem dissipada e a transferência de energia é totalmente controlada pelo termo dissipativo do balanço de energia cinética (FOKEN, 2008).

A adoção da hipótese de Taylor, implica em uma relação natural entre o número de onda e a frequência. O espectro turbulento é a representação do vento e de suas componentes no domínio da frequência. A transposição da turbulência entre esses domínios é outro resultado dessa hipótese. A análise do espectro turbulento envolve o tratamento do sinal obtido através do anemômetro sônico e a aplicação de métodos matemáticos, dentre os quais está o método desenvolvido por Jean Baptiste Fourier, chamado transformada de Fourier. Esse método permite a decomposição de sinais que

podem ser modelados por somas de funções seno e cosseno, em suas componentes harmônicas (LESIUER, 2008).

A integral da função autocorrelação de uma componente qualquer do vento vezes a média desta componente é a escala integral de comprimento que denota a escala de tempo na qual a turbulência permanece correlata (KAIMAL & FINNIGAN, 1994) e a densidade espectral é a transformada de Fourier da função autocorrelação de uma série temporal. Os picos de energia estão associados a produção de turbulência, as frequências médias à subfaixa inercial e a alta frequência à dissipação de energia cinética turbulenta em calor pelo estresse viscoso (STULL, 1988).

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Estudar o efeito de sombreamento em duas torres com geometrias diferentes (uma torre triangular e outra torre retangular plataforma) no escoamento turbulento sobre uma floresta densa da Amazônia, com a finalidade de determinar se há diferenças significativas no sombreamento entre as torres, dependendo da direção do vento que vem da torre para instrumento.

2.2 ESPECÍFICOS

Analisar o escoamento do vento nas torres retangular e triangular do projeto ATTO-CLAIRE na região de esteiras da torre;

Quantificar o descarte de dados nas duas torres em detrimento do efeito de sombreamento.

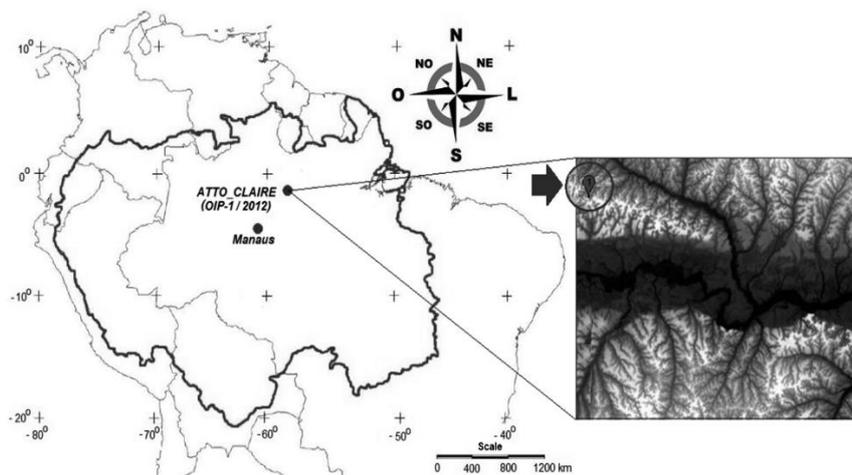
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SÍTIO DE PESQUISA

Esta pesquisa será conduzida a partir dos dados obtidos no sítio experimental do projeto ATTO (Amazon Tall Tower Observatory) ($2^{\circ}8'32.42''$ S, $59^{\circ}0'3.50''$ W). Esse projeto é desenvolvido na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Uatumã, pertencente ao município de São Sebastião do Uatumã, 150km a nordeste da cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. A região é caracterizada por solos Ferrasol argiloso, o clima é tropical

úmido (KÖPPEN), caracterizado por uma estação chuvosa que se estende de fevereiro a maio e uma estação seca, de junho a outubro. A direção predominante do vento durante o ano é de nordeste. O índice de área foliar (IAF) em torno no ATTO é de aproximadamente $5,57 \pm 0,37 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (SANTANA et al., 2017).

Figura 1 - Vista do platô onde está localizado o sítio experimental ATTO-CLAIRE (Cooperative LBA Airborne Regional Experiment) /IOP-1-2012.

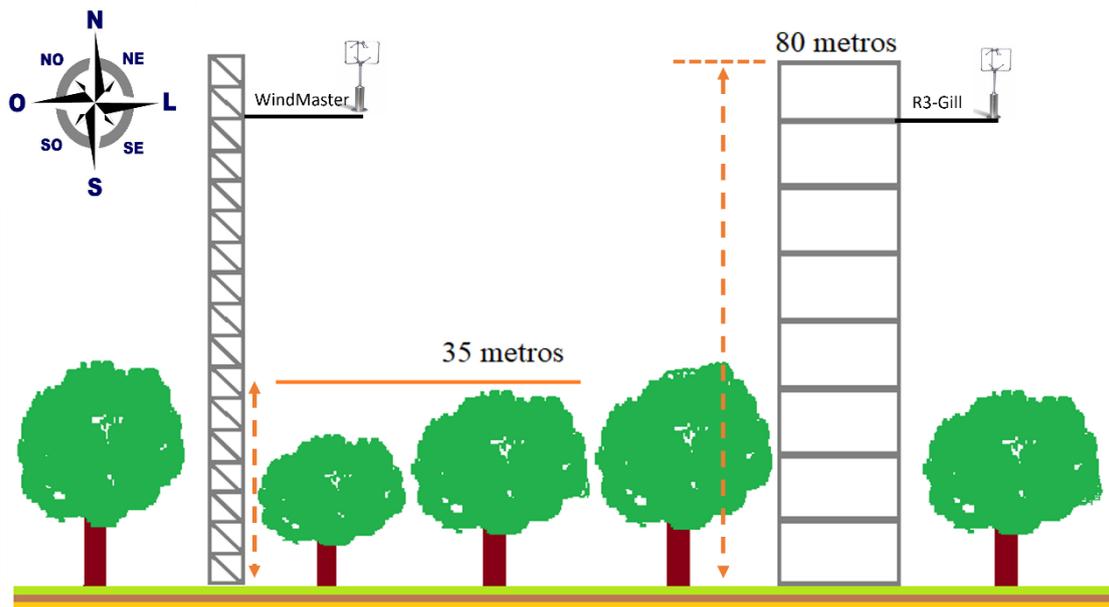


Fonte: LIMA et al., 2017.

No sítio do ATTO está presente a maior torre de medidas meteorológicas do mundo, com cerca de 325 metros de altura e outras duas torres auxiliares de 80 metros de altura. Estas duas últimas torres (figura 2), uma torre triangular e outra tipo plataforma, serão objetos desta pesquisa por apresentarem estruturas diferentes. A torre triangular foi instalada no sítio em 2010 e a tipo plataforma (Retangular) em 2011 (ANDREAE et al., 2015).

Os dados que serão utilizados na pesquisa foram medidos por anemômetros sônicos tridimensionais instalados ao longo de toda extensão da torre, durante o experimento ATTO-CLAIRE (Cooperative LBA Airborne Regional Experiment) /IOP-1-2012). Especificamente, serão utilizados os dados do mês de março de 2012, no qual os instrumentos estiveram medindo simultaneamente nas duas torres (SANTANA et al., 2017).

Figura 2 - Desenho esquemático das torres do projeto ATTO e arranjo dos anemômetros sônicos.



Fonte: Autor.

A torre triangular (figura 3) tem 81 metros de altura (ANDREAE et al, 2015) e área de secção transversal triangular de $0,156 \text{ m}^2$ (LIMA et al, 2017). Os dados desta torre foram amostrados com frequências de 1, 4, e 10 Hz, dependendo do instrumento de medida (Veja a tabela 1).

O período de observação intensiva – (IOP-1/2012), contou com três anemômetros ultrassônicos 3D (Solent, Gill Instruments, U.K), três anemômetros ultrassônicos 2D-windsonic, acoplado a um termo higrômetro e a um barômetro (chamado aqui de Metpack, Gill Instruments ltd., U.K) e quatro anemômetros ultrassônicos 2D-Wind Speed & Direction Sensor (Gill Instruments ltd., U.K), posicionados nas seguintes alturas: 78 ; 41 e 30 m (Wind Master 3D); 57; 70 e 62 m para o (Metpack,); 23; 36; 45 e 50 m (Wind Sonic 2D). A torre retangular tem 80 metros (Figura 4).

Figura 3 - Vista aérea da torre triangular.



Fonte: LIMA et al., 2017.

Figura 4 - Vista aérea da torre Retangular de 80 m.



Fonte: PFANNERSTILL et al., 2018.

Nesta torre os anemômetros utilizados e suas respectivas, taxas de amostragem e alturas são: anemômetros sônicos 3D, modelo R3 (Gill Instruments Ltd.), taxa de amostragem de 10Hz, instalados em 23, 40, e 80m de altura; anemômetros de copo, modelo 5103 R.M (Young Company), taxa de amostragem de 1Hz, instalados em 30, 42 e 55m (Veja a tabela 1) (SANTANA et al., 2017).

Devido à natureza equilátera da torre triangular, a área frontal da torre é igual a 2 vezes a secção transversal, ou seja $0,312 \text{ m}^2$ a cada 0.56m de altura. A outra torre possui secção retangular com largura e comprimento igual a 2.92m x 4.20m (Andreae et al, 2015) e conseqüentemente secção transversal de 12.2m^2 . A torre retangular ainda possui 5 andares além de escadas a cada 2 m. A área frontal da torre é de 5.84m^2 a cada 2m de altura.

Tabela 1 - Descrição dos equipamentos e distribuição ao longo das torres.

Estrutura	Anemômetro	Modelo	Freq. de amostragem	Altura (m)
Triangular Trelaçada	3D-sônico	WindMaster, Gill Instruments Ltd	10hz	78, 41, 30
	2D-sônico	WindSonic, Gill Instruments Ltd	4hz	23, 36, 45, 50
	Automatic station wheather	MetPack, Gill Instruments Ltd	1hz	57, 60 e 72
Retangular Plataforma	3D	R3, Gill Instruments Ltd	10hz	23 40 80
	1D	5103, R.M. Young Company	1hz	30, 42, 55

Fonte: SANTANA et al., 2017.

De acordo com a literatura a subcamada rugosa se estende por cerca de $2h$, em que h é altura do dossel (RAUPACH et al, 1996). Como o h do ATTO deve estar de 30 a 40 m, provavelmente as medições mais altas estejam no limite desta camada (SANTANA et al, 2018). No intuito de fugir das medidas realizadas na subcamada rugosa, foram utilizados os anemômetros mais altos (78, torre triangular, e 80 m, torre Retangular) e de mesma capacidade de medição (R3 e *WindMaster*, ambos sônicos 3D). Além disso, o período estudado foi de 7:00 da manhã à 17:30 (UTC-4) da tarde. Essa restrição se justifica na recorrência de regime estaticamente estável acima do dossel em

florestas tropicais durante o período noturno (FITZJARRALD & MOORE, 1990; MORAES et al., 2008).

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados dos anemômetros sônicos foram armazenados em arquivos binários. Cada arquivo contém 30 minutos de dados de 10Hz, perfazendo um total de 18000 linhas e 4 colunas com as variáveis u , v , w , t , nessa respectiva ordem, no qual u é a componente vetorial da velocidade do vento na direção u , v é componente vetorial da velocidade do vento na direção v , e w é a componente vetorial da velocidade do vento na direção w . Nesse estado os dados são considerados “brutos” (sem processamento) e consomem bastante tempo de máquina mesmo para um único dia.

Assim, ao invés de trabalhar com período de um mês, fora adotada a estratégia de analisar pacotes com 7 dias de dados ao longo do mês de março. O mês de março foi escolhido porque os dados de ambas as torres são simultâneos nesse período, embora haja alguns arquivos incompletos ou inexistentes. O horário dos dados obtidos na torre triangular estão em UTC enquanto os arquivos da torre retangular estão no horário local (UTC-4).

O pré-processamento da série temporal de cada torre fora desenvolvido no software R em conjunto com a IDE RStudio. Uma análise gráfica para cada semana foi realizada utilizando diagramas de tukey ou diagrama de caixas (*boxplots*) no intuito de observar as regiões da torre com a maior incidência de ventos fracos. A seguir, os intervalos que compreendem regiões com essa característica eram localizados no *dataframe* através de um *script*. Os intervalos de 30 minutos com incidência maior que 10000 linhas (± 16 minutos) foram utilizados para análise espectral.

As análises realizadas baseiam-se na separação dos dados por classe de ventos, classificados como: fracos, ventos abaixo de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, moderado, ventos entre $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ e 3 m.s^{-1} , e fortes, acima de 3 m.s^{-1} . A distribuição das velocidades do vento médio estão divididas em quadrantes de 30° , de acordo com a direção do vento. Esses intervalos estão associados aos resultados de estudos anteriores sobre o tamanho da região de sombreamento da torre, $\pm 30^\circ$ (MOSES & DAUBEK, 1968; KAIMAL & FINNIGAN, 1994).

O critério de estabilidade foi calculado a partir do quociente da diferença entre a altura do sônico (z) e a altura do dossel (h) pelo comprimento de Obukhov (L) e agrupado em quadrantes de 10° pela seguinte equação (STULL, 1988):

$$\xi = \frac{(z-h)}{L} \quad (9)$$

Um teste de regressão linear fora aplicado entre as médias de 30 minutos da magnitude do vento (\bar{U}) da torre Retangular e \bar{U} da torre triangular nas alturas 80 e 78 respectivamente. O objetivo foi verificar se as duas torres estão na mesma área de influência de sombreamento. O \bar{U} foi calculado a partir dos dados brutos utilizando a componente zonal (u) e meridional (v), pela seguinte equação:

$$\bar{U} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (10)$$

Para verificar a influência do efeito de sombreamento na intensidade da turbulência, serão calculados os desvios padrão σ das componentes u , v , w do vento de acordo com as seguintes equações:

$$\sigma_u = (u'^2)^{1/2} \quad (11)$$

$$\sigma_v = (v'^2)^{1/2} \quad (12)$$

$$\sigma_w = (w'^2)^{1/2} \quad (13)$$

u'^2 , v'^2 e w'^2 são as variâncias das componentes. O desvio padrão é uma medida de dispersão da variável original em relação a sua média. Por isso, o desvio padrão é também uma medida da intensidade da turbulência (I_T) e dado que a I_T é proporcional ao aumento do vento principal, então a I_T pode ser expressa pela seguinte expressão

$$I_T = \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \quad (14)$$

Importante ressaltar que a hipótese de Taylor é válida para $I_T < 0.5$, ou seja, a magnitude do vento deve ser maior que o desvio padrão. (STULL, 1988; SANTANA et al., 2018). Esta análise será feita partindo do princípio que na região de sombreamento a energia cinética do vento principal é convertida em energia cinética turbulenta (BARTHLOTT &

FIEDLER, 2003). A intensidade da turbulência é também uma medida de energia cinética turbulenta e os efeitos da velocidade nessa variável são importantes para explicar se está havendo sombreamento ou se os ventos na direção oposta ao sensor são apenas mais fracos devido ao terreno ou outra peculiaridade do sítio de pesquisa. A energia cinética turbulenta dada pela equação 07, pode ser escrita da seguinte forma

$$ECT = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (15)$$

Após esses procedimentos, foi utilizado análise do espectro turbulento (KAIMAL & FINNIGAN, 1994). O espectro turbulento é um gráfico de distribuição de energia dos vórtices turbulentos de acordo com o seu comprimento de onda ou frequência (FOKEN, 2008). Os picos no espectro mostram quais tamanhos de vórtices contribuem mais para a energia cinética turbulenta (ECT). Os espectros foram obtidos utilizando o pacote PSD (Power Spectra Density) desenvolvido por Harbour et al (2012) e disponibilizado de forma gratuita no R Project. A energia dissipada, termo importante do balanço de energia cinética, foi calculada a partir de análise da região de alta frequência do espectro da turbulência pela equação,

$$\epsilon = \frac{2\pi f^2 S_u^{\frac{5}{3}}}{U \alpha^{\frac{3}{2}}} \quad (16)$$

f é frequência, S_u é o espectro de potência ou densidade espectral da componente u e α é a constante de Kolmogorov, 0.55 (KAIMAL et al, 1972). Deformações no escoamento podem ser observadas na região de alta frequência, onde uma nova perturbação do espectro é gerada na sub-faixa inercial do espectro não perturbado. Nessa nova faixa, os vórtices começam a se decompor imediatamente. Pela superposição de ambos espectros, um configuração semelhante a um Joelho é gerado (BARTHLOTT & FIEDLER, 2003).

A ECT foi calculada em intervalos de 10 minutos e agrupada em intervalos de 10°. No cálculo de ϵ e dos espectros foram utilizados intervalos de 30 minutos onde há predominância de ventos vindos das direções sudoeste, oeste e noroeste. O ϵ foi estimado para um dia de cada semana com base na ocorrência de perturbações no espectro. O resultado esperado são picos no mesmo intervalo de tempo das perturbações no espectro. Com respeito a ETC, espera-se que na região de esteiras, esta seja independente do vento médio e que haja aumentos esporádicos.

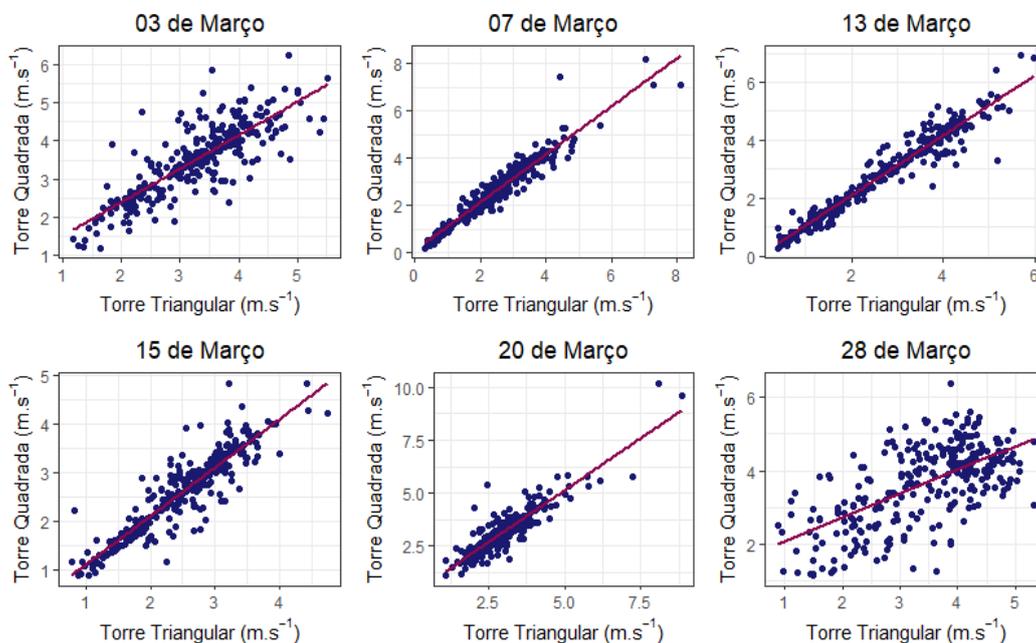
Determinada a região de sombreamento nas duas torres, foram quantificado o número de dados que seriam descartados em cada torre devido ao sombreamento em dois cenários: predominância de i) ventos fracos, e ii) ventos fracos e moderados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO

O conjunto de dados da torre triangular tem alguns arquivos incompletos ou inexistentes, dessa forma, tomou-se o cuidado de realizar a análise de regressão nos dias completos para ambas as torres. A análise de regressão linear na figura 5, mostra correlações positivas e significativas entre as duas séries, apesar da diferença de 2 metros de altura entre os sensores. Esse resultado é importante, pois as deformações do escoamento em virtude da estrutura da torre devem ser observadas de forma evidente no espectro da turbulência e a comparação entre as torres podem ser validadas.

Figura 5 - Correlação significativa entre os conjuntos de dados das duas torres.



Fonte: Autor.

A priori, a distribuição das velocidades em cada torre fora apresentada em diagramas de caixa ou de tukey (*boxplots*) com intervalos regulares de 45 graus. Todavia

observou-se uma dispersão muito grande dos dados, e por isso o intervalo entre cada quadrante foi diminuído de forma que as classes de vento (fraco, moderado, forte) ficassem mais evidentes. Os resultados do mês de março de 2012, na altura 78m da torre triangular e na altura 80m da torre Retangular, indicam predominância da direção do vento entre o quadrante nordeste e leste (ANDREAE et al, 2015; LIMA et al, 2017). A ocorrência de ventos na região norte-sul nas duas torres foi superior a 80% na primeira semana e decaiu ao longo do mês. Tal comportamento pode ser observado nas Tabelas 2 e 3. Os pontos de máximo e mínimo entre as duas torres são deslocados em 30° e há uma proporcionalidade entre a direção predominante do vento e a sua velocidade, 40% a 50% são ventos fortes, enquanto nas regiões com menor incidência 70% a 80% dos ventos nessas direções são fracos ou moderados.

Os anemômetros foram instalados na direção leste da torre e orientados para o norte, conforme orientação do fabricante, dessa forma a região de sombreamento deve estar situada na direção oeste da torre. Na torre Retangular, a predominância é acintosa entre 30° e 180° na primeira semana e nas semanas seguintes entre 30° e 150° (mais de 70 %) conforme a Tabela 2. Na torre triangular há concentrações bem definidas entre 0° e 150° que correspondem juntos a mais de 70% das medidas na direção do anemômetro sônico na maior parte do tempo (Tabela 3).

Tabela 2 - Predominância do vento (%) na torre Retangular durante o mês de março de 2012. A predominância do vento é na direção nordeste e leste.

Dir. (°)	Sem. 01	Sem. 02	Sem. 03	Sem. 04	Dia 29-31
0-30	5,6	6,1	9,1	6,4	2,2
30-60	14,2	13,4	9,6	15,2	12,6
60-90	22,9	17,3	15,4	13,4	13,9
90-120	14,8	17,7	15,8	14,2	27,3
120-150	11,4	9,7	14,3	18,7	26,8
150-180	14,6	9	8,1	9,2	10
180-210	5,3	6,3	6,2	3	0,5
210-240	1,1	5,6	3,3	2,5	0,5
240-270	0,7	1,9	3,4	2,8	0,5
270-300	1,7	2,1	4,8	3,8	0,7
300-330	2,9	4,6	5,3	5,9	2
330-360	5	6,2	4,7	4,9	3,1

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Predominância do vento (%) na Torre Triangular durante o mês de março de 2012.

Dir. (°)	Sem. 01	Sem. 02	Sem. 03	Sem. 04	Dia 29-31
0-30	13,5	12,5	10	13,9	8,8
30-60	23,4	17,5	15,9	11,9	9,3
60-90	15,8	20	16,8	15,6	30,5
90-120	11	10,1	14,3	21,7	32,2
120-150	14,2	7,8	8	10,7	14,6
150-180	5,6	6,8	7,2	1,9	1,1
180-210	1,2	3,4	3,2	1,2	0,4
210-240	0,8	0,6	2,8	3,3	0,1
240-270	1,3	0,9	4,2	3,3	0,2
270-300	3,1	5,7	4,5	5,5	0,8
300-330	4,6	8	4,7	5,6	0,8
330-360	5,7	6,7	8,4	5,5	1,2

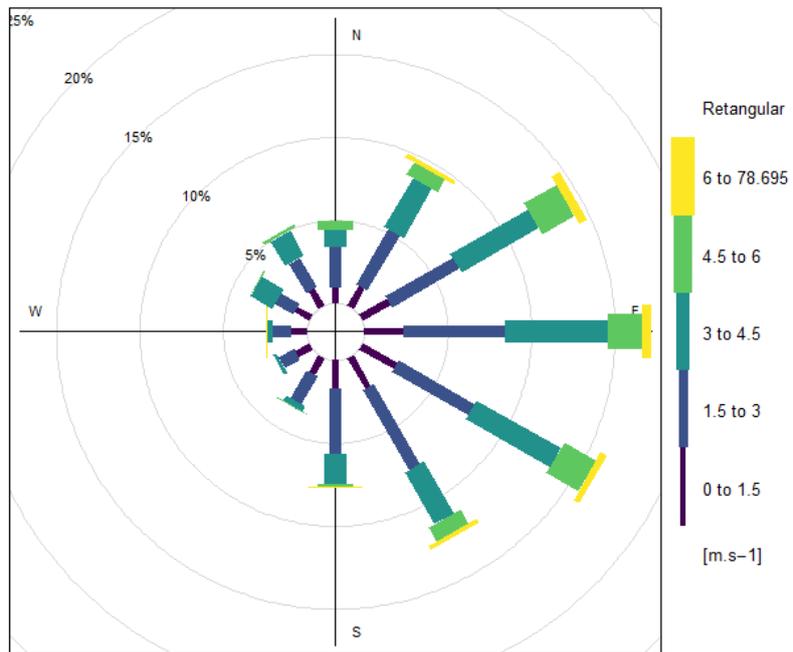
Fonte: Autor

Todavia, na semana 03 a torre triangular atingiu 33% de predominância na região na região de esteiras e a torre Retangular 27%. Nas duas torres, a velocidade do vento diminui no quadrante sul-sudoeste e sudoeste-oeste, mas a predominância de ventos fracos difere entre elas.

Na torre Retangular (figura 6) a região que apresenta pelo menos 75% dos dados abaixo de 2 m.s^{-1} está entre 240° e 270° , na torre triangular (figura 7) essa região se encontra entre 180° e 240° . Na segunda semana os ventos moderados e fracos são predominantes no 210° - 240° na torre triangular enquanto na torre Retangular predominam apenas ventos moderados ou fortes. Na semana 03, na torre triangular a predominância de ventos fracos está entre 180° a 240° e entre 300° e 360° , enquanto na torre Retangular essa região aparece entre 210° a 270° e depois entre 330° e 360° .

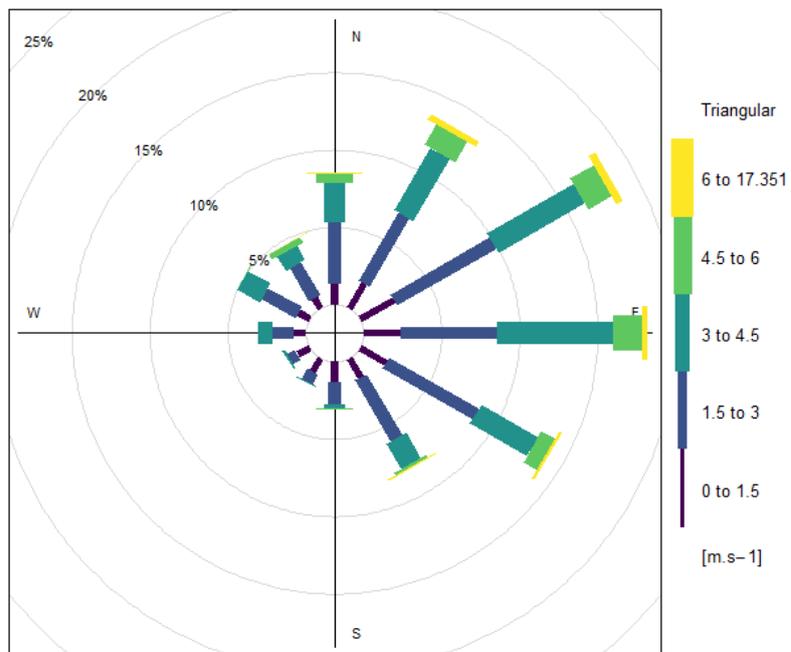
A semana 04 apresenta uma predominância de ventos fracos entre 180° e 240° na torre triangular e 210° a 270° na torre retangular. Nos últimos dias do mês a predominância de ventos fracos permaneceu entre 210° e 300° na torre retangular enquanto na torre triangular essa predominância se estende desde 180° a 360° , todavia, essas contribuições têm duração inferior a 30 minutos.

Figura 6 - Distribuição mensal da velocidade do vento médio na torre retangular.



Fonte: Autor.

Figura 7 - Distribuição mensal de velocidade do vento na torre triangular.



Fonte: Autor.

Essas variações entre os períodos atestam a necessidade de estudar a região de sombreamento e indicam uma forte influência da topografia na direção do vento. O escoamento do ar e os campos de concentração dentro e acima do dossel são perturbados pelas elevações e depressões do terreno e conduzem a um significativa advecção horizontal e vertical de CO₂ (KATUL et al, 2006). Tota et al (2008) mostrou que advecção é responsável por 70% do balanço de CO₂ no período noturno em uma floresta ombrófila densa, no oeste da região amazônica, e que sua ocorrência está relacionada à topografia.

Os efeitos do relevo na velocidade do vento médio também foram estudados no ATTO por Souza (2019). As direções predominantes do vento para o mês de março de 2012, estudados nessa dissertação, advêm de uma região com bastante elevações que se estende desde o oeste até o leste (270°-110°) do sítio de pesquisa. O restante tem influência tanto das elevações quanto de depressões que compõem a fitofisionomia do sítio (SOUZA, 2019). Outro fator a ser levado em consideração é a rugosidade da floresta. Embora a altura dos sônicos tenham sido escolhidas no nível mais alto das torres, não se pode ignorar por completo o cisalhamento do vento pela copa das árvores (RAUPACH et al, 1996; SANTANA et al 2018).

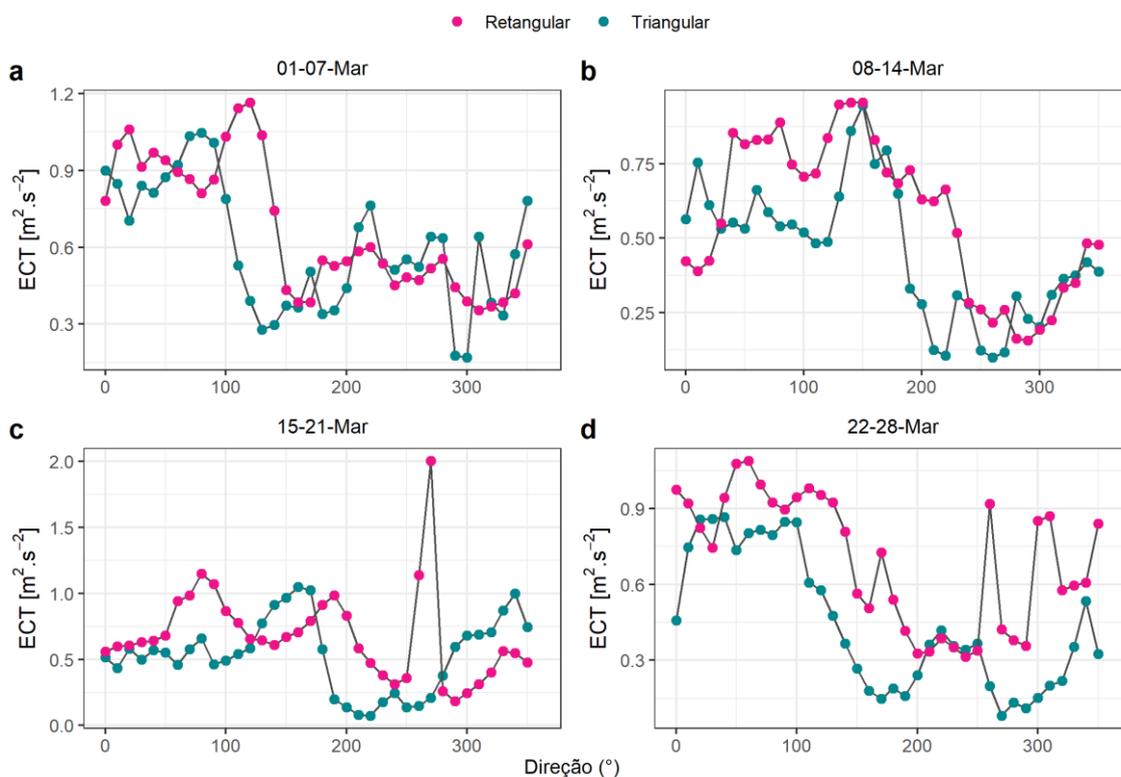
4.2 ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA

A ECT apresentou diferença entre a região de predominância do vento e a região de esteiras nas duas torres (figura 8). Os picos de ECT na região de esteiras das torres são resultado do sombreamento do anemômetro sônico (McCAFFREY et al, 2017; BERGSTROM, 1996). Na primeira semana (figura 8a), as duas torres apresentam comportamentos inversamente proporcionais entre si na região predominante do vento persistindo até a região de esteiras. Alguns picos podem ser observados na torre triangular logo após atingir um valor mínimo no início da região de esteiras. A torre retangular apresenta um comportamento homogêneo em torno de 0.45 e 0.6 m². s⁻², enquanto a torre triangular oscila bastante entre 0.1 e 0.75 m². s⁻².

Na segunda semana (figura 8b), a ECT decai abruptamente em 200° na torre triangular seguido de dois picos até aumentar em 300°. Nesse mesmo intervalo na torre retangular, a ECT decai de forma escalonada, onde atinge um mínimo próximo de 300° e em seguida aumenta juntamente com a torre triangular. Nas semanas seguintes o padrão não muda muito na região de predominância de SW, mas na região de esteiras um pico

de $2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ emerge na terceira semana, na torre quadrada entre 260° e 270° . Na semana seguinte, outro pico de $0.9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ pode ser observado no mesmo intervalo.

Figura 8 - Média de 10 minutos da ECT agrupada em 10° a cada 07 dias.

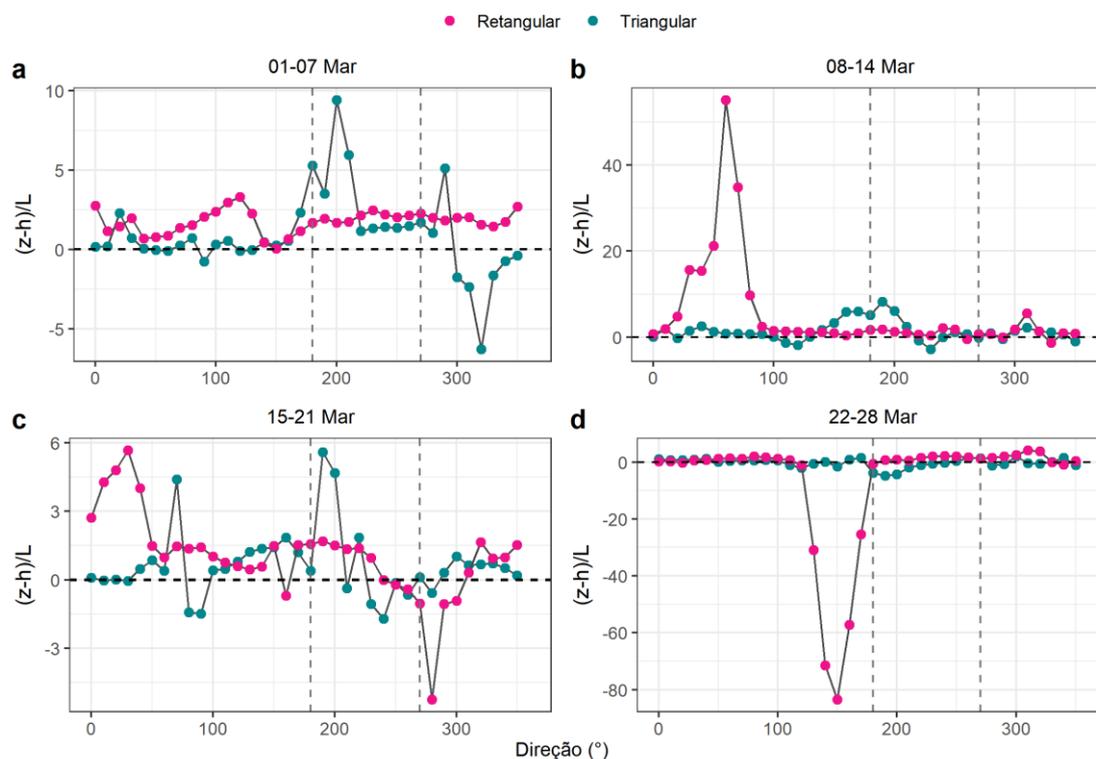


Fonte: Autor.

Na região de esteiras a predominância é de ventos fracos e moderados e σ_w abaixo de 0.45 (Figura 9). A componente vertical está associada a turbulência e ao transporte e em estudos sob condições de atmosfera estável (recorrente no período noturno) a relação entre U e a σ_w poderia explicar a variação da ECT. Sun et al. (2016) argumentam que em condições de SW e $V_{ECT} = ECT^{1/2}$ acima de um valor de corte definido experimentalmente a ECT seria proporcional a U . Em condições de WW e V_{ECT} abaixo de desse valor, a ECT é independente do vento médio. Dias-Junior et al. (2017) replicou o experimento na Rebio-Jarú usando σ_w e para valores abaixo de 0.45 e em WW a ECT apresenta independência de U . A produção de cisalhamento é forte nas componentes u e v , enquanto o termo de flutuabilidade está associado a componente w . O fato de σ_w ser muito menor na região de esteiras do que região de predominância do

vento sugere que os picos são resultados da turbulência de grade e que envolvem o cisalhamento do vento médio (Stull, 1988) com a estrutura das torres.

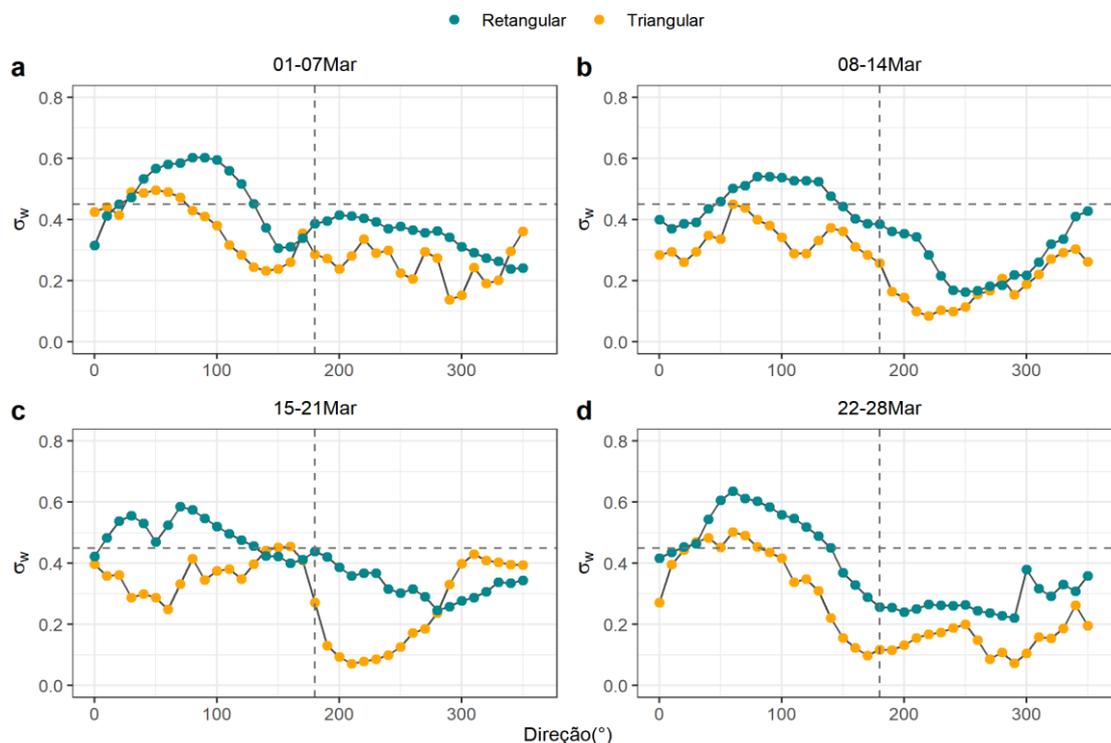
Figura 9 - Critério de estabilidade de Monin-Obukhov. A linha horizontal representa a região neutra ($-0.02 > \xi < 0.02$)



Fonte: Autor.

Nesse cenário, usaremos a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, cientes de suas limitações em terrenos complexos (DIAS-JUNIOR et al, 2019; CHAMECKI et al, 2020). A partir da definição de estabilidade de Monin-Obukhov, a figura 9 mostra que em alguns momentos tem-se atmosfera instável ($\xi < -0.02$) na região de esteiras (figura 9 c e d), mas há predominância de um regime estável ($\xi > 0.02$). Atmosfera estáticamente estável tende a suprimir a ECT, e pode ser observada no topo da camada de mistura e está relacionada a valores negativos de flutuabilidade (STULL, 1988). Na região de esteiras a predominância é de ventos fracos, e σ_w (figura 10) abaixo de 0.45 durante todo o período diurno ao longo do mês.

Figura 10 - Desvio padrão da componente w. Os valores abaixo de 0.45 (linha tracejada horizontal) são predominantes na região de esteiras (a partir da linha tracejada vertical) nas duas torres.



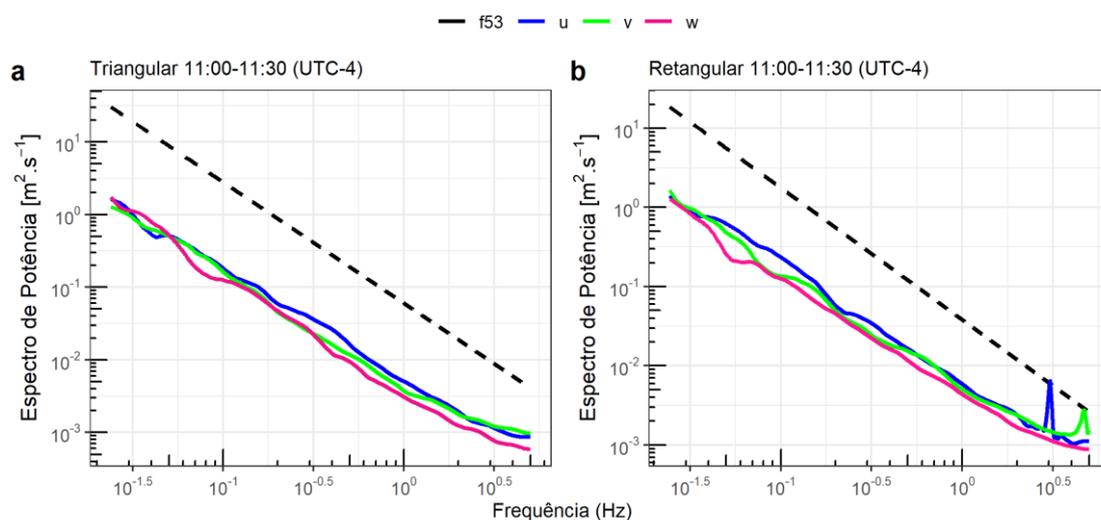
Fonte: Autor.

4.3 ANÁLISE ESPECTRAL DA REGIÃO SUB-INERCIAL

Nas direções predominantes de ventos fortes e que estão na frente do anemômetro sônico, a subcamada inercial segue o feito cascata de energia de Kolmogorov. A figura 11 compreende o intervalo de 180° a 225° em um período de 1 hora do primeiro dia de março. Esse intervalo foi escolhido devido a predominância de ventos fracos e logo de imediato nota-se um pico emergindo na região da alta frequência da torre retangular. Todavia, apenas as componentes da torre retangular são afetadas, enquanto a torre triangular segue o efeito cascata de Kolmogorov. Em outros momentos não houve surgimento de picos, todavia, a principal diferença nos resultados das duas torres foi a formação de um leve platô no início da alta frequência do espectro da torre retangular, entre 1 Hz e $10^{0.5}$ Hz enquanto o espectro da torre triangular, no entanto permanece decaindo de acordo com Kolmogorov.

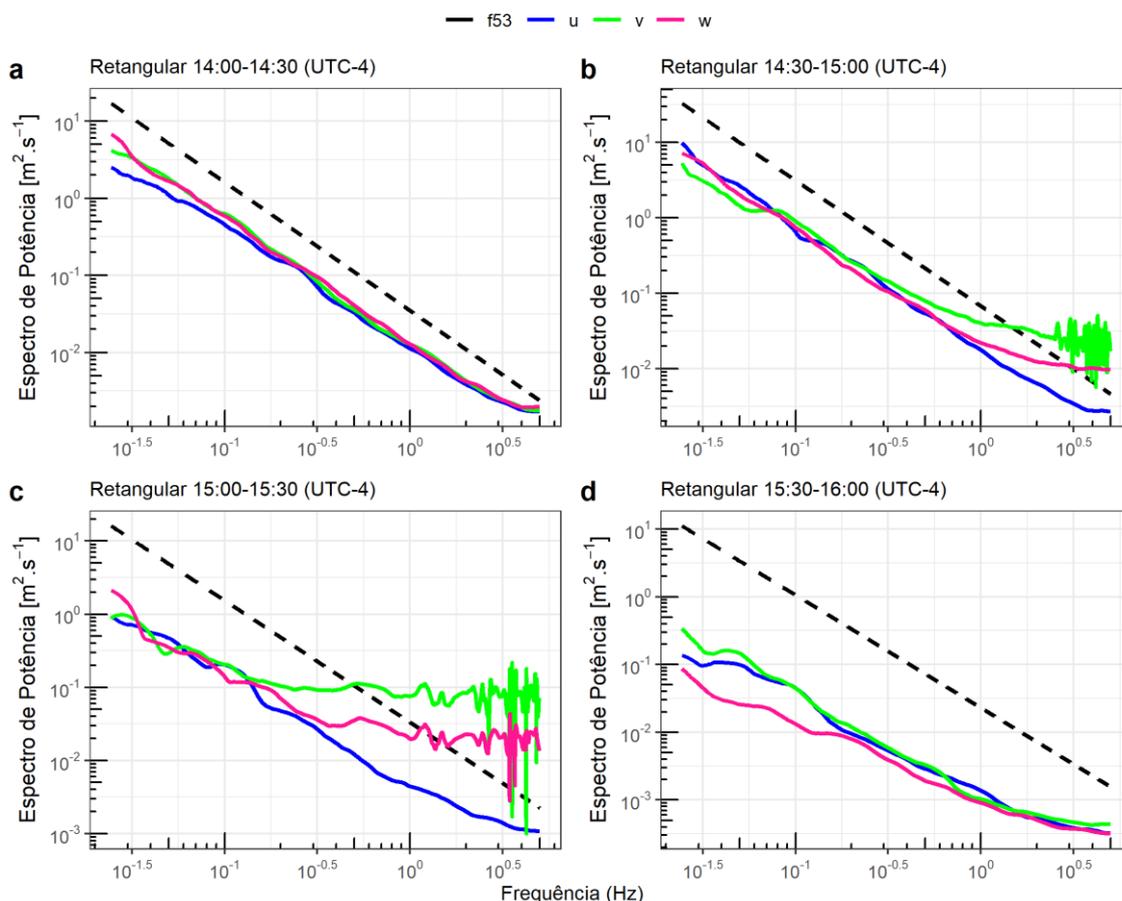
No dia 12, a torre triangular mantém-se com poucas interferências entre 180° - 225° , apesar de uma leve inflexão na alta frequência. No entanto, a torre retangular apresentou perturbações na região de alta frequência (figura 12). Observando a distribuição do vento nessa região, nota-se que pelo menos 25% dos ventos são considerados fracos nessa região e durante a semana pelo menos 18% dos dados residem nesse quadrante. A componente u permanece inalterada, todavia, observa-se um desacoplamento entre as componentes u, v e w, indicando ausência de isotropia.

Figura 11 - Dia 1º de março. região inercial do espectro turbulento no quadrante 180 - 225° e surgimento de um pico na alta frequência nos resultados da torre Retangular.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Perturbação na região de alta-frequência na subcamada inercial, no intervalo de 180° a 225°, período diurno do dia 12 de março de 2012.



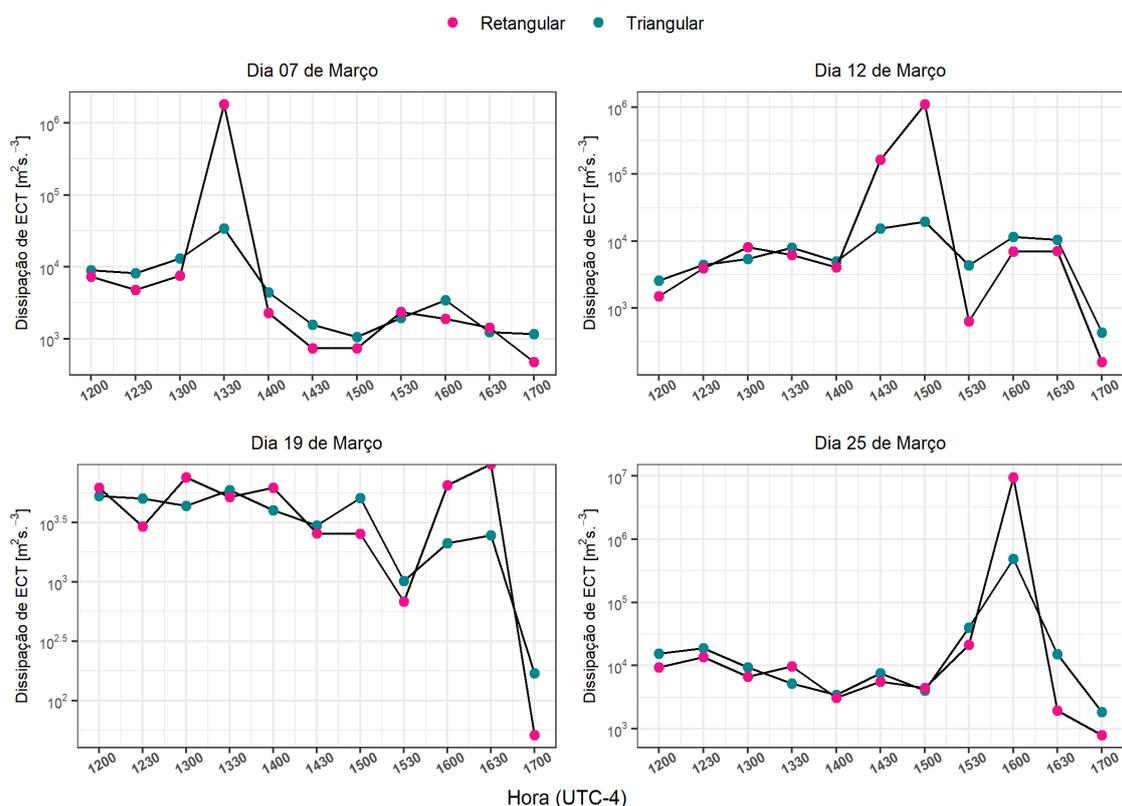
Fonte: Autor.

O que foi observado na maioria dos períodos estudados, é a formação de um platô e o desacoplamento das componentes transversais. Tais resultados indicam a região de sombreamento. Na região inercial não há produção ou dissipação de energia e o decaimento segue o efeito cascata de Kolmogorov. Quando o escoamento principal é deformado pela estrutura da torre, há a formação de esteiras e a perda de energia cinética média devido ao trabalho realizado pela deformação (TENNEKES & LUMLEY, 1972), resultando em atenuações de velocidade.

A esteira formada nesse processo é rapidamente dissipada e passa a contribuir para o termo ϵ do balanço de energia cinética turbulenta (BRUNET et al, 1994). Os picos e a formação do platô são resultados do aumento abrupto de energia e sua imediata dissipação. A anisotropia pode ser explicada pela conversão de energia cinética média em

energia cinética turbulenta prevalecer somente em uma das componentes. Segundo Seigner (1976) as estruturas treliçadas afetam principalmente as componentes v e w devido a anisotropia na região inercial (Figura 12 b, c).

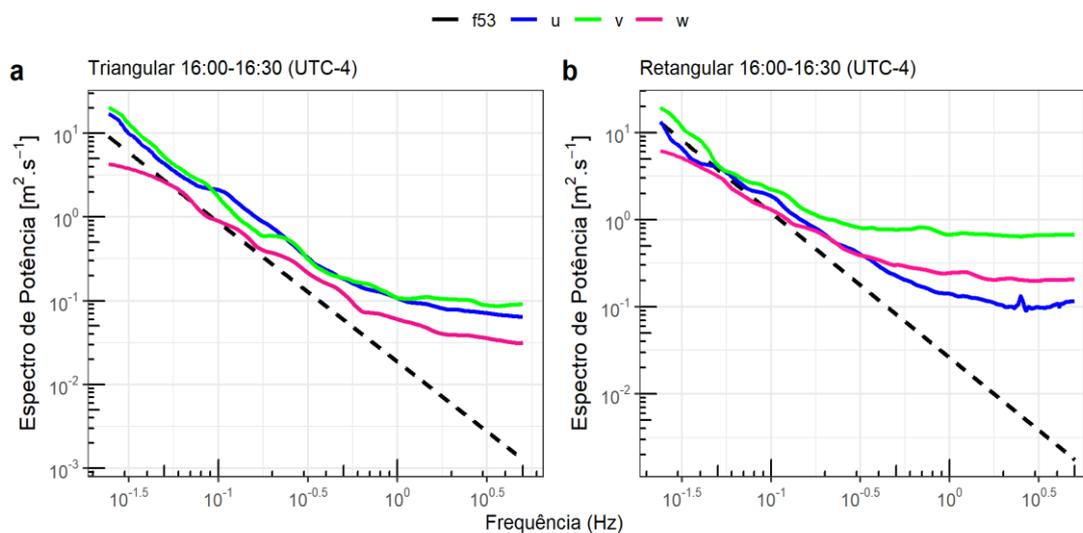
Figura 13 - Média de 30 minutos de ϵ desde o Meio-dia até as 17horas (UTC-4).



Fonte: Autor.

A figura 13 mostra a média de ϵ a cada 30 minutos em um intervalo de 5 horas de um dia de cada bloco de 7 dias das duas torres. Um pico de ϵ é observado na torre Retangular entre as 14:00 e 15:30 no dia 12 e entre 16:00 e 16:30 no dia 25. Esses picos são resultado da produção de turbulência por esteiras geradas pela estrutura das torres. O espectro da torre triangular apresenta um comportamento de acordo Kolmogorov na maioria dos dias, mas é igualmente afetada na alta frequência no dia 25 (figura 14). No dia 16 outro pico de dissipação de ϵ semelhante foi observado, mas na região entre 200° e 235° e entre 270° e 300° esses intervalos foram observados no espectro turbulento na forma de um platô (figura 15). O mesmo ocorreu na torre triangular, com leve deformações nas componentes v e w (figura 16).

Figura 14 - Dia 25. Decaimento de energia na torre triangular e formação acentuada de um platô nas 3 componentes da torre Retangular.

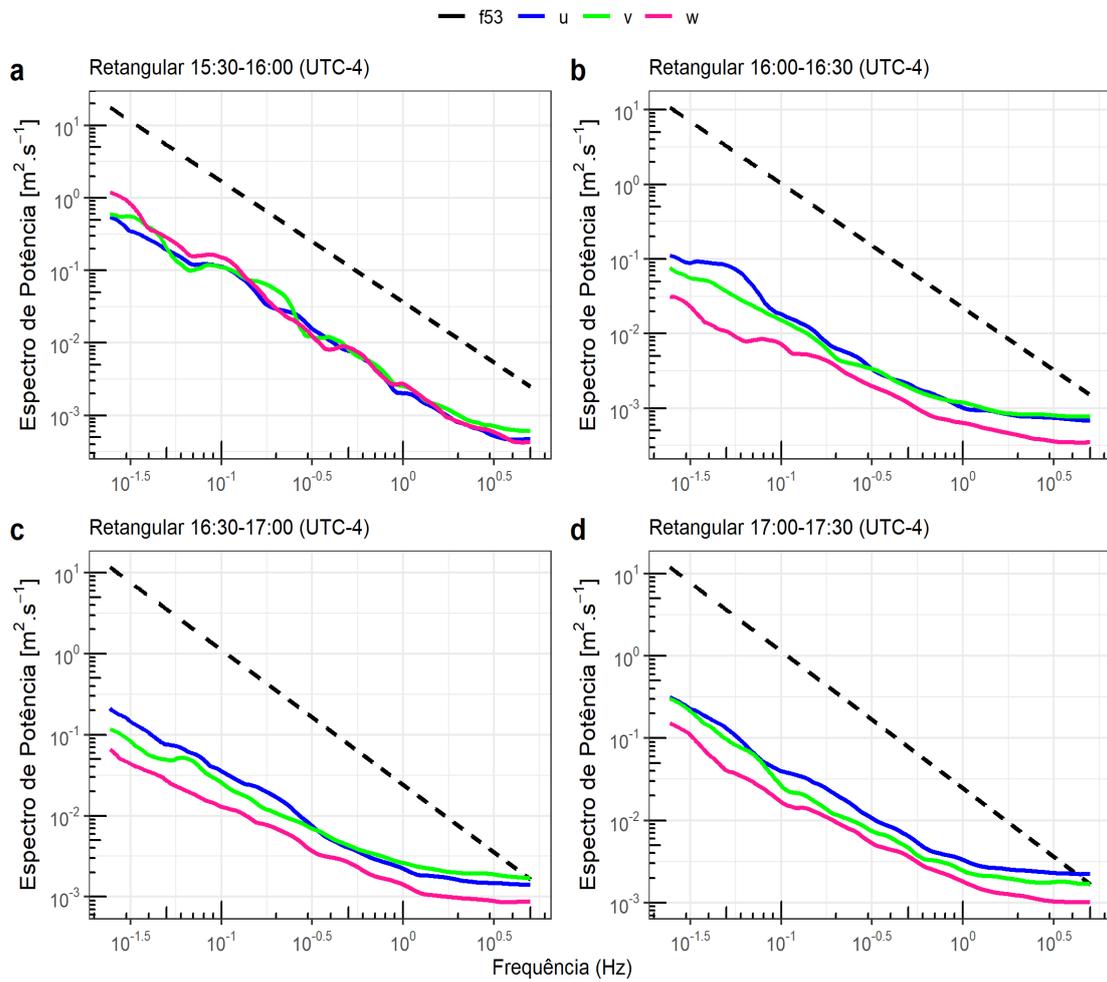


Fonte: Autor.

A ECT é também uma medida da intensidade da turbulência (STULL, 1988) e os picos estão associados ao sombreamento (McCAFFREY, 2017). Na análise do espectro é possível identificar se está havendo ou não sombreamento através da formação de um platô e da anisotropia na região inercial (BARTHLOT & FIEDLER, 2003). Nessas condições, ao calcularmos a dissipação de energia cinética e combinarmos com o intervalo de tempo em que eles acontecem, podemos observar picos de ϵ nos mesmos intervalos em que a região inercial é perturbada (BRUNET et al, 1994). A ECT agrupada por quadrantes nos informa a região em que o sombreamento está acontecendo (BERGSTRON, 1996).

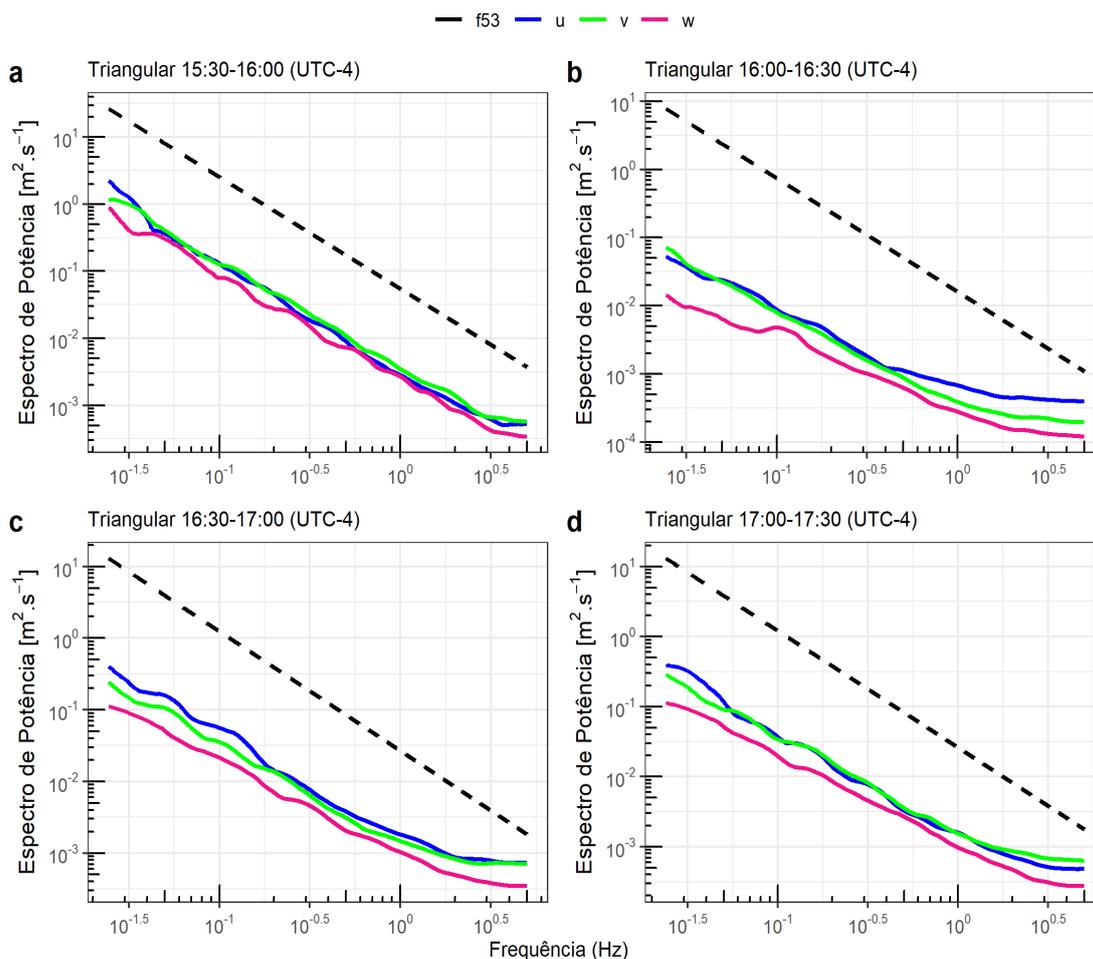
Com base nesses resultados, é razoável admitir que a região de sombreamento das duas torres varia em torno de 30° a 35° ao longo da região de esteiras entre 180 e 300° na torre retangular e entre 200° e 300° na torre triangular no mês de março. A região de sombreamento varia ao longo do ano devido às mudanças na direção predominante do vento no ATTO (ANDREAE et al., 2015).

Figura 15 - Dia 16 de março de 2012. Formação de platô nas 3 componentes ao longo de 2 horas.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Formação de platô na torre triangular no dia 16 de 15:30 a 1730



Fonte: Autor.

4.4 REGIÃO DE SOMBREAMENTO

A quantidade de medidas realizadas pelo anemômetro sônico que a cada semana estavam na região oposta ao sensor (180° - 360°) flutuou entre 16% no início do mês até atingir 35% na terceira semana e findou o mês em 24%. O principal efeito físico do sombreamento é a redução da velocidade do vento médio. Nitidamente, a região que compreende a região de sombreamento se encontra entre 180° e 300° na torre quadrada e 200° a 300° na torre triangular, no entanto, as duas torres apresentam um deslocamento de 30° entre si na região em que a redução de velocidade é mais acentuada. Essa diferença deve estar relacionada a diferença de altura dos sensores e a topografia irregular do terreno e a heterogeneidade da superfície.

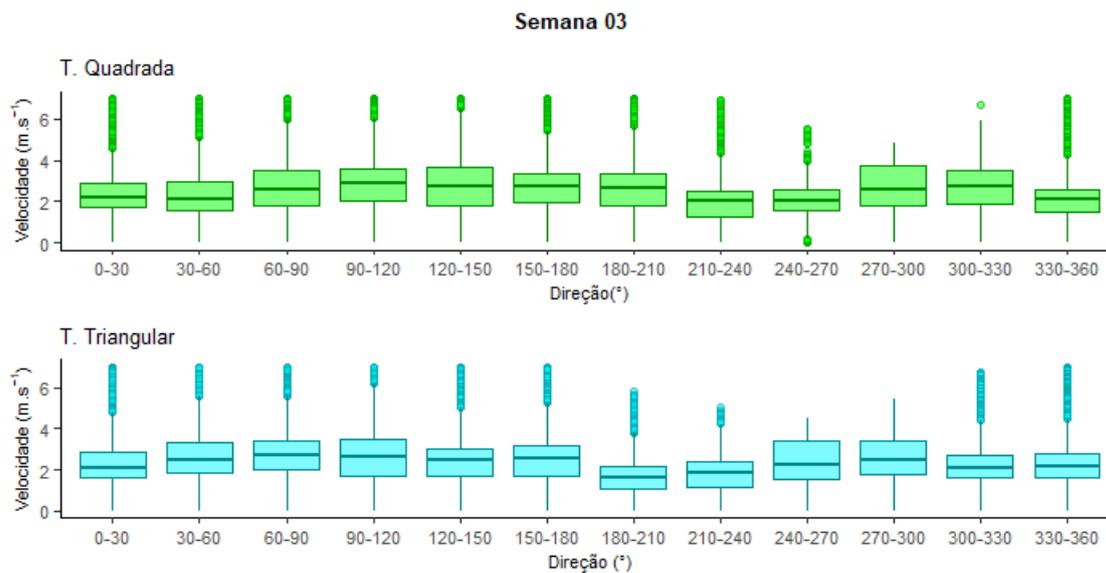
As duas torres apresentam diferenças significativas no tamanho da região sombreada e a análise espectral mostrou que há uma maior deformação do escoamento pela torre Retangular, mas a redução de velocidade abrupta não é observada na torre Retangular e isso pode ser confirmado na distribuição de velocidade da semana 03 (figura 16). Além disso, a torre triangular não apresenta valores de ϵ tão grandes, o que indica que os ventos na região de esteiras sejam fracos por alguma peculiaridade das florestas tropicais e não associados ao sombreamento.

Na torre Retangular, entre 210° e 240° a predominância é de ventos fracos e moderados, enquanto na torre triangular, a região com ventos predominantemente fracos é de 180° - 240° . Em termos de tamanho, a torre triangular tem uma região muito maior de ventos fracos. Entretanto na região de sombreamento da torre Retangular residem 12% das observações, enquanto 10% dos dados estão distribuídos nessa faixa. Algo similar acontece na primeira semana, quando a predominância de ventos fracos é a mesma nas duas torres, mas a extensão da região onde essas velocidades estão distribuídas é maior na torre Retangular.

O cálculo da quantidade dos dados a serem descartados levou em consideração a predominância dos ventos fracos entre 180° e 360° nas duas torres e depois levando em consideração ventos fracos e moderados. Nos intervalos da região de esteiras com predominância de vento médio fracos ($0 < U \leq 1,5 \text{ m.s}^{-1}$), a quantidade de dados descartados na torre triangular é de 4,5%, equivalente a mais de 27 horas e 2,7% na torre Retangular, equivalente a mais de 19 horas.

Levando em consideração também a predominância de ventos moderados ($1,5 < U \leq 3 \text{ m.s}^{-1}$), a relação se inverte entre as torres. A torre Retangular apresenta cerca de 20% de dados descartados e a torre triangular a 18%. A predominância de ventos fracos é maior na torre triangular enquanto na torre Retangular a predominância é de ventos moderados na região de esteiras.

Figura 17 - Distribuição de velocidades no período entre 15-21 de março.



Fonte: Autor.

O tamanho da região de sombreamento é estimado na literatura em $\pm 30^{\circ}$ na região de esteiras (CEMAK & HORN, 1961; KAIMAL & FINNIGAN, 1994; McCAFFREY et al., 2020). Embora essa direção seja variável no período estudado, é razoável admitir o mesmo tamanho para as duas torres, no entanto esse intervalo varia muito mais ao redor da torre Retangular indicando que o tamanho da estrutura influenciou na deformação do escoamento.

A diferença entre o descarte de dados nesse caso específico pode ser explicada pela falta de dados já mencionado acima, visto que essa diferença corresponde a 1 dia e meio. A exemplo disso, no dia 10 e dia 11, entre 180° - 270° durante a segunda semana de março, são os dias com maior incidência de ventos nessa região durante tal período. Os dados existentes nesse período estão completos apenas na torre Retangular. Na torre triangular faltam dados do período noturno, precisamente dados de 20hrs em diante e do dia 11 inteiro e parte do dia 12. O dia 11 também é um dos dias em que há predominância de ventos na região oposta ao sensor na torre Retangular. A diferença de quantidade de horas medidas nas duas torres é equivalente a 108 horas de dados a menos na torre triangular.

5 CONCLUSÕES

A região de sombreamento ainda é pouco estudada e em terrenos complexos essa tarefa se configura um verdadeiro desafio. As estruturas treliçadas são complexas devido ao arranjo e do formato geométrico de seus constituintes. O espaçamento entre eles, também é um fator que contribui para a deformação do escoamento e a conversão do vento médio em turbulência.

A região oposta ao sensor é fundamentalmente a região de sombreamento e na torre Retangular e na triangular a predominância do vento nessa região atingiu até 27% e 35% dos dados, respectivamente. No ATTO existe uma variabilidade na localização e na extensão dessas regiões entre as duas torres e durante o período que se está considerando. Os resultados mostraram ganhos de energia na subcamada-inercial e anisotropia local entre as componentes transversais no intervalo de 180° e 300°. As análises do espectro turbulento, mostraram uma forte influência da torre Retangular ao longo da região de esteiras da torre, no entanto a diferença entre o descarte de dados da região de sombreamento das duas torres não foi significativa para o mês de março.

O fato de a predominância de ventos fracos na torre triangular ser maior do que na torre Retangular e o tamanho dos picos de ϵ na região de esteiras serem menores do que na torre Retangular indica que os ventos advindos da região entre 180° e 360° são fracos na maioria dos casos e não estão associados ao sombreamento do anemômetro sônico pela torre triangular e que a torre triangular deforma muito pouco o escoamento do vento. A topografia e rugosidade da floresta tem um papel relevante, visto que ambos são eficientes em deformar o escoamento acima e dentro do dossel e em absorver momento.

É importante ressaltar também que teoria utilizada para terrenos complexos é baseada em experimentos em superfícies planas e homogêneas e ainda não existe uma metodologia que leve em consideração de forma satisfatória todas as nuances das florestas. Recomenda-se em trabalhos futuros, além da parte observacional, uma abordagem de modelagem computacional (*Computational Fluid Dynamics*-CFD) do escoamento do vento e sua interação com a estrutura das torres.

REFERÊNCIAS

ANDREAE, M. O., ACEVEDO, O. C., ARAÚJO, A., ARTAXO, P., BARBOSA, C. G. G., BARBOSA, H. M. J., BRITO, J., CARBONE, S., CHI, X., CINTRA, B. B. L., DA SILVA, N. F., DIAS, N. L., DIAS-JÚNIOR, C. Q., DITAS, F., DITZ, R., GODOI, A. F. L., GODOI, R. H. M., HEIMANN, M., HOFFMANN, T., KESSELMEIER, J., KÖNEMANN, T., KRÜGER, M. L., LAVRIC, J. V., MANZI, A. O., LOPES, A. P., MARTINS, D. L., MIKHAILOV, E. F., MORAN-ZULOAGA, D., NELSON, B. W., NÖLSCHER, A. C., SANTOS NOGUEIRA, D., PIEDADE, M. T. F., PÖHLKER, C., PÖSCHL, U., QUESADA, C. A., RIZZO, L. V., RO, C. U., RUCKTESCHLER, N., SÁ, L. D. A., DE OLIVEIRA SÁ, M., SALES, C. B., DOS SANTOS, R. M. N., SATURNO, J., SCHÖNGART, J., SÖRGEL, M., DE SOUZA, C. M., DE SOUZA, R. A. F., SU, H., TARGHETTA, N., TÓTA, J., TREBS, I., TRUMBORE, S., VAN EIJCK, A., WALTER, D., WANG, Z., WEBER, B., WILLIAMS, J., WINDERLICH, J., WITTMANN, F., WOLFF, S.; YÁÑEZ-SERRANO, A. M. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, v. 15, p. 10723–10776, doi:10.5194/acp-15-10723-2015, 2015.

BATCHELOR, George Keith. **The Theory of Homogeneous Turbulence**. Cambridge University Press, ISBN 0521041171, f. 197, 1953.

BALDOCCHI, Dennis; FALGE, Eva; GU, Lianhong; OLSON, Richard; HOLLINGER, David; RUNNING, Steve; ANTHONI, Peter; BERNHOFER, CH.; DAVIS, Kenneth; EVANS, Robert; FUENTES, Jose; GOLDSTEIN, Allen; KATUL, Gabriel; LAW, J. Beverly; LEE, Xuhui; MALHI, Yadvinder; MEYERS, Tilden; MUNGER, William; OECHEL, Walt; PAW U, K. T.; PILEGAARD, P KIM; SCHMID, H. P.; VALENTINI, Riccardo; VERMA, Shashi; VESALA, Timo; WILSON, Kell; WOFYSY, Steve. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, p. 2415-2434, doi: 10.1175/1520, 2001.

BARBOUR, Andrew; PARKER, Robert. psd: Adaptive, Sine Multitaper Power Spectral Density Estimation for R. *Computers & Geosciences*. v. 63, p. 1–8. 10.1016/j.cageo.2013.09.015, 2014.

BARTHLOTT, Christian. FIEDLER, Franz. Turbulence structure in the wake region of a meteorological tower. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 108, p. 175–190, 2003.

BERGSTROM, Hans. High resolution climatological wind measurements for wind energy Applications. *Flygtekniska Forsöksanstalten Aeronautical Research Institute of Sweden*, 1996.

BIRNIR, B. **The Kolmogorov-Obukhov Theory of Turbulence: A Mathematical Theory of Turbulence**. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, f. 108, doi: 10.1007/978-1-4614-6262-0, ISBN 978-1-4614-6262-0 (ebook), 2013.

BRUGGEMAN, D. Evaluation of Tower Shadowing on Anemometer Measurements at Los Alamos National Laboratory. **Los Alamos National Laboratory Report**, n. LA-UR-16-24130, 2016.

BRUNET, Y.; FINNIGAN J. J.; RAUPACH, M. R. A wind tunnel study of air flow in waving wheat: single-point velocity statistics. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 70, p. 95-132, 1994.

BUSINGER, J. A: Equation and Concepts in: Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling. **Springer Netherlands**. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9112-1>, 1968.

CANTERO, Elena; SANZ, Javier; BORBÓN, Fernando; PAREDES, Daniel; GARCÍA, Almudena. On the measurement of stability parameter over complex mountainous terrain. **Wind Energy Science Discussions**. <https://doi.org/10.5194/wes-2021-44>, Preprint, 2021.

CENGEL, Yunus. **Heat Transfer: a practical approach**. Mcgraw-Hill, 2ed, f. 896, ISBN-13: 978-0072458930, 2002.

CERMAK, J. E.; HORN, J. D. tower shadow effect. **Journal of Geophysical Research**. v. 73, n. 6, p. 1869–1876, 1968.

CHAMECKI, Marcelo; FREIRE, Livia S.; DIAS, Nelson L.; CHEN, Bicheng; DIAS-JUNIOR, Cléo Quaresma; MACHADO, Luiz Augusto Toledo; SÖRGEL, Matthias TSOKANKUNKU, Anywhere; ARAÚJO Alessandro C. Effects of vegetation and topography on the boundary layer structure above the amazon forest. **Journal of Atmospheric Sciences**, 77, 2941-2957, doi: 10.1175/JAS-D-20-0063.1, 2020.

DIAS-JÚNIOR, Cléo Q.; SÁ, Leonardo D.A.; FILHO, Edson P. Marques; SANTANA, Raoni A.; MAUDER, Matthias; MANZI, Antônio O. Turbulence regimes in the stable boundary layer above and within the Amazon forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 122–132. doi:10.1016/j.agrformet.2016.11.0., 2017.

DIAS-JÚNIOR, Cléo Q.; DIAS, N. L.; DOS SANTOS, R. M. N.; SÖRGEL, M.; ARAÚJO, A.; TSOKANKUNKU, A.; DITAS, F.; SANTANA, Raoni A.; VON RANDOW, C.; MARTA, S.; PÖHLKER, C.; TOLEDO MACHADO, L. A.; DE SÁ, L. D.; MORAN-ZULOAGA, D.; JANSSEN, R.; ACEVEDO, O.; OLIVEIRA, P.; FISCH, G.; CHOR, T.; MANZI, A. Is there a classical inertial sublayer over the amazon forest? **Geophys. Res. Lett.**, v. 46, p. 5614–5622, DOI:10.1029/2019GL083237, 2019.

FITZJARRALD, David. R.; MOORE, Kethelen; MORAES, Osvaldo; SCOLAR, José; MANZI, Antônio, O.; SÁ, Leonardo D. de Abreu. Daytime Turbulent Exchange Between the Amazon Forest and the Atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 825-16, <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16825>, 1990.

FITZJARRALD, David. R.; MOORE, Kethelen. E. Mechanisms of nocturnal exchange between the rain forest and the Atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, doi:10.1029/jd095id10p16839, 1990.

FOKEN, T. **Micrometeorology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg ISBN: 978-3-540-74665-2, 2008.

FORTUNIAK, K., PAWLAK, W. Selected Spectral Characteristics of Turbulence over an Urbanized Area in the centre of Łódź, Poland. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 154, p. 137–156, <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9966-7>, 2015.

FRANK, John M.; MASSMAN, William J.; SWIATEK, Edward; ZIMMERMAN, Herb A.; EWERS, Brent E. All sonic anemometers need to correct for transducer and structural shadowing in their velocity measurements. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 33, n. 1, p. 149–167, 2016.

KAIMAL J. C.; FINNIGAN J. J. **Atmospheric boundary layer flows: their structure and Measurement**. Oxford Press, New York, ISBN 0-19-506239-6 1, 1994.

KATUL, Gabriel. G.; FINNIGAN, J. J.; POGGI, D.; LEUNING, R.; BELCHER, S. E. The Influence of Hilly Terrain on Canopy-Atmosphere Carbon Dioxide Exchange. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 118, p. 189–216, doi:10.1007/s10546-005-6436-2, 2006.

KLIN, Jack. Effects of tubular anemometer towers on wind speed measurements. **Resource Assessment & Micrositing**, 2004. Disponível em: http://ramwind.com/uploads/3/4/7/8/34785936/effects_of_tubular_anemometer_towers_on_wind_speed_measurements.pdf. acesso em: 5 de abril de 2021.

KOLMOGOROV, Andrei N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. **Dokl. Akad. Nauk SSSR**, v. 30, p. 9–13, 1941a.

KOLMOGOROV, Andrei N. Dissipation of energy under locally isotropic turbulence. **Dokl. Akad. Nauk SSSR**, v. 32, p. 16–18, 1941b.

KOLMOGOROV, Andrei N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. **J. Fluid Mech.**, v.13, p. 82–85, 1962.

KONOW, H. **Tall Wind Profiles in Heterogeneous Terrain**. thesis (Ph.D.), f. 107, Hamburg University, Hamburg, Germany, 2015.

KRUIJT, B.; MALHI, Y.; LLOYD, J.; NOBRE, A. D.; MIRANDA, A. C.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; GRACE, J. Turbulence statistics above and within two Amazon rain forest canopies. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, n. 2, p. 297–331, 2000.

LANDAU L. D., & LIFSHITZ E. M. **Course of theoretical physics: fluid mechanics**. Pergamon Press, 2 ed., ISBN 9781483161044, 1987.

LIMA, Newton S.; TOTA, Julio; BOLZAN, Maurício J.A.; FERREIRA, Alan S.; PIETZSCH, Matheus R. A brief observation of the formation of coherent structures and turbulence over a rain forest area in central Amazonia: the ATTO-CLAIRE / IOP – 1/2012 experiment. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 35, p.187-199, 2017.

LUBITZ, W. D.; MICHALAK, A. Experimental and theoretical investigation of tower shadow impacts on anemometer measurements. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 176, p. 112–119, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.012>, 2018.

LESIEUR, Marcel. **Turbulence in Fluids**. 4 ed., Springer. ISBN 978-1-020-6435-7 (e-book), 2008.

McCAFFREY, Katherine; QUELET, Paul T.; CHOUKULKAR, Aditya; WILCZAK, James M.; WOLFE, Daniel E.; ONCLEY, Steven P.; BREWER, W. Alan; DEBNATH, Mithu; ASHTON, Ryan; IUNGO, G. Valerio; LUNDQUIST, Julie K. Identification of Tower-wake Distortions Using Sonic Anemometer and Lidar measurements. **Atmos. Meas. Tech.**, v.10, p. 393–407, 2017

MORAES, Osvaldo L.L.; FITZJARRALD, David R.; ACEVEDO, Otávio C.; SAKAI, Ricardo K.; CZIKOWSKY, Matthew J.; DEGRAZIA, Gervásio A. Comparing spectra and cospectra of turbulence over different surface boundary condition. **Physica A**, v. 387, p. 4927–4939, 2008.

MOSES, H., DAUBEK, H. G. Errors in Wind Measurements Associated with Tower-Mounted Anemometers 1. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 42, n. 3, p. 190–194, 1961.

MUNGER, J. W., LOESCHER, H. W., LUO, H. Measurement, Tower, and Site Design Considerations. *In*: Aubinet, M.; Vesala, T.; Papale, D. (Org.). **Eddy Covariance: a practical guide to measurement and data analysis**. Springer Atmospheric Sciences, 2012. v. 1, cap. 2, p. 21- 54, https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_2.

NÖLSCHER, A. C.; YAÑEZ-SERRANO, A. M.; WOLFF, S.; DE ARAUJO, A. C.; LAVRIČ, J. V.; KESSELMEIER, J.; WILLIAMS, J. Unexpected seasonality in quantity and composition of Amazon rainforest air reactivity. **Nature Communications**, DOI: 10.1038/ncomms10383, 2016.

ORTIZ-SUSLOW, D. G.; WANG, Q.; KALOGIROS, J.; YAMAGUCHI, R. A method for identifying Kolmogorov's inertial subrange in the velocity variance spectrum. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 37, p. 85–102, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0028.1>, 2020.

PEÑA, A.; DELLWIK E.; MANN, J. A Methods to Assess the Accuracy of Sonic Anemometer Measurements. **Atmos. Meas. Tech.**, v. 12, p. 237–252, <https://doi.org/10.5194/amt-12-237-2019>, 2019.

PFANNERSTILL, Eva Y.; NÖLSCHER, Anke C.; YAÑEZ-SERRANO, Ana M.; BOURTSOUKIDIS, Efstratios; KEßEL, Stephan; JANSSEN, Ruud H. H.; TSOKANKUNKU, Anywhere; WOLFF, Stefan; SÖRGEL, Matthias; SÁ, Marta O.; ARAÚJO, Alessandro; WALTER, David; LAVRIČ, Jošt; DIAS-JÚNIOR, Cléo Q.; KESSELMEIER, Jürgen; WILLIAMS, Jonathan. Total OH Reactivity Changes Over the Amazon Rainforest During an El Niño Event. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 1, doi:10.3389/ffgc.2018.00012, ISSN=2624-893X, 2018. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/ffgc.2018.00012>. Acesso em: 03 de janeiro de 2021.

RAUPACH, M. R., FINNIGAN, J. J., BRUNET, Y. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 78, p. 351-382, 1996.

RINNE, H. J. I.; GUENTHER, A. B.; GREENBERG, J. P.; HARLEY, P. C. Isoprene and monoterpene fluxes measured above Amazonian rainforest and their dependence of light and temperature. **Atmospheric Environment**, v. 36, p. 2421–2426, 2002.

SANTANA, Raoni A. S; DIAS-JÚNIOR, Cléo Q.; VALE, Roseilson S.; TÓTA, Júlio; FITZJARRALD, David. R. Observing and Modeling the Vertical Wind Profile at Multiple Sites in and above the Amazon Rain Forest Canopy. **Adv. Meteorol.**, doi:10.1155/2017/5436157, 2017.

SANTANA, Raoni. A.; DIAS-JÚNIOR, Cléo. Q.; TÓTA, J.; FUENTES, José. D.; VALE, R. S.; ALVES, E. G.; SANTOS, Rosa. M. N., MANZI, A. O. Air turbulence characteristics at multiple sites in and above the Amazon rainforest canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 41–54, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.027>, 2018.

SOUZA, Valmier Barbosa. **Análise da influência da topografia do terreno na organização da turbulência dentro e acima de um dossel florestal amazônico**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia, Universidades Estadual do Amazonas, Manaus, f. 54, 2019.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Kluwer Academic Publishers, doi:10.1007/978-94-009-3027-8, 1988.

STULL, R. B. **Meteorology for Scientists and Engineers**. ISBN-13: 978-0-88865-178-5 Vancouver, BC, Canada: [s.n]. http://www.eos.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/, 2015.

SEIGNER, I.; MULHEARN, P. J.; BRADLEY, E. F.; FINNIGAN, J. J. Turbulent Flow in a Model Plant Canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 10, p. 423-453, 1976.

SUN, Jielun; MAHRT, Larry; BANTA, Robert M; PICHUGINA, Yelena L. Turbulence Regimes and Turbulence Intermittency in the Stable Boundary Layer during CASES-99. **Journal Of The Atmospheric Sciences**, v. 69, p. 338-351, doi: 10.1175/JAS-D-11-082.1, 2012.

SUN, J., LENSCHOW, D. H., LEMONE, M. A., & MAHRT, L. The Role of Large-Coherent-Eddy Transport in the Atmospheric Surface Layer Based on CASES-99 Observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 160, p. 83-111, doi:10.1007/s10546-016-0134-0, 2016.

TAYLOR, G.I. The Spectrum Of Tubulence. **Proceedings of the Royal Society of London**, 1938.

TENNEKES, H. & LUMLEY, J. L. **A First Course in Turbulence**. MIT Press, ISBN 0262200198, f. 300, 1972.

TÓTA, J., FITZJARRALD, D. R., STAEBLER, R. M., SAKAI, R. K., MORAES, O. M. M., ACEVEDO, O. C., WOFYSY, S. C., & MANZI, A. O. Amazon Rainforest Subcanopy Flow and the Carbon Budget: Santarém LBA-ECO site. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, doi:10.1029/2007JG000597, 2008.