

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo realiza-se uma revisão da literatura dos estudos que utilizaram a modelagem matemática e física do escoamento dentro e acima da camada do dossel. Inicialmente é apresentada uma revisão dos trabalhos que utilizaram modelos de fechamentos de primeira e ordem superior. Em seguida, os estudos que envolveram o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão. Por fim, são apresentadas as pesquisas realizadas através de experimentos de túnel de vento e de campo.

2.1

Escoamento Dentro e Acima de Dosséis de Vegetação

Nesta seção descreve-se os principais modelos encontrados na literatura sobre o escoamento dentro e acima da camada do dossel. No final do capítulo são apresentados os estudos que utilizaram experimentos de campo e de túnel de vento.

Os primeiros estudos da modelagem do escoamento sobre superfícies vegetadas foram realizados por Cionco (1965), Cowan (1968), dentre outros. Estes estudos foram realizados através de modelos de fechamento de primeira ordem ou modelos K. Estes modelos fornecem boas previsões dos campos de velocidade e de pressão médios, porém falham nas previsões das estatísticas de segunda-ordem.

Li et al. (1984) propuseram um esquema de fechamento não-local para os fluxos de quantidade de movimento (tensores de Reynolds e fluxo dispersivo) e assim, desenvolveram um modelo de fechamento de primeira ordem que foi capaz de prever o pico da velocidade do vento nas baixas regiões do dossel. A parametrização da difusão do gradiente dos tensores de Reynolds foi modificada pela introdução de um termo de transporte de quantidade de movimento volumétrico.

As limitações dos modelos de fechamento de primeira ordem foram descritas por vários autores, embora ainda sejam empregados na determinação

de propriedades aerodinâmicas de dosséis, tais como o deslocamento do plano zero, o coeficiente de arrasto e a altura de rugosidade (Katul & Albertson, 1998). Wilson & Shaw (1977) sugeriram que os modelos K forneciam pouco discernimento dos processos de transporte de quantidade de movimento no interior de dosséis. Wilson (1988) reportou que a parametrização dos fluxos turbulentos nestes modelos não apresentou uma base física satisfatória. Além disso, Pereira & Shaw (1980) mostraram que esta modelagem falha nas predições da velocidade do vento nas baixas regiões no interior do dossel, onde um gradiente vertical aproximadamente nulo é freqüentemente observado.

Devido às deficiências dos modelos K, Wilson & Shaw (1977) propuseram modelos de fechamento de ordem superior (segunda-ordem) na qual as equações da energia cinética turbulenta (ECT) e dos tensores de Reynolds fossem resolvidas simultaneamente com a equação da quantidade de movimento. Além disso, estes autores mostraram que razoável concordância com as observações podia ser obtida com estes modelos.

Segundo Katul & Albertson (1998) uma deficiência dos modelos de fechamento de segunda ordem seria uma aproximação de fluxo-gradiente da correlação tripla da velocidade, pois esta não reproduz corretamente os perfis de transporte de quantidade de movimento próximos ao topo do dossel.

Neste contexto, Meyers & Baldocchi (1986) desenvolveram um modelo de fechamento de terceira ordem, a fim de obterem melhores resultados nas simulações da correlação-tripla da velocidade. Pode-se também prever satisfatoriamente o perfil do vento para diferentes tipos de vegetação. Entretanto, o modelo proposto por Meyers & Baldocchi (1986) utilizava 10 equações para resolver um problema 1-D com alto custo computacional, tornando assim, o seu uso impraticável.

Recentemente Shaw & Schumann (1992) e Kanda & Hino (1994) estudaram o escoamento turbulento sobre dosséis utilizando a técnica de simulações de grandes escalas (LES). No trabalho realizado por Shaw & Schumann (1992) foram apresentados os perfis verticais do vento médio, dos tensores de Reynolds, da energia cinética turbulenta e da skewness da velocidade do escoamento turbulento instantâneo sobre uma floresta Estacional. Kanda & Hino (1994) reproduziram as estruturas coerentes no último estágio de desenvolvimento do escoamento turbulento dentro e acima de um dossel. A influência do arrasto devido aos elementos da vegetação foi modelada através da introdução de um termo adicional na equação de quantidade de movimento. Estes estudos demonstraram que a técnica LES

é uma poderosa ferramenta na investigação da estrutura da turbulência de dosséis. Entretanto, devido o alto custo computacional, esta técnica foi analisada no presente trabalho.

Wilson (1988) apresentou um modelo de fechamento de segunda ordem para o escoamento em condições neutras para um dossel horizontalmente uniforme. O esquema de fechamento adotado baseava-se na formulação desenvolvida em 1975 por Launder e co-autores, diferindo apenas na parametrização das correlações tripla da velocidade. O modelo utilizou uma formulação empírica para a taxa de conversão da energia cinética turbulenta em energia cinética da esteira. O modelo apresentou boa concordância com dados de experimentos de campo de Wilson & Shaw (1977) e de túnel de vento de Raupach et al. (1986) para as estatísticas do vento médio.

Katul & Albertson (1998) propuseram dois esquemas de parametrizações utilizados em modelos de fechamento de ordem superior para calcular as correlações triplas do tensor velocidade. Os parâmetros estudados foram: uma aproximação difusão-gradiente da velocidade utilizada em modelos de segunda ordem e um balanço do tensor da correlação tripla da velocidade utilizada em modelos de segunda ordem. Os resultados modelados foram comparados com dados coletados em experimentos de campo realizados na Floresta Duke na Carolina do Norte, Estados Unidos da América, (35° 98' N, 79° 8' W). A altura média do dossel era de 14 m com índice de área foliar de 3,82.

Neste trabalho, os resultados mostraram que: (1) não existiram grandes vantagens na modelagem com fechamento de terceira ordem das equações de movimento de $\sqrt{\langle u'^2 \rangle}$ e $\sqrt{\langle w'^2 \rangle}$; (2) quando o modelo de fechamento de segunda ordem foi utilizado ocorreu uma boa concordância entre os perfis previstos e as medições de $\langle \bar{u} \rangle$ e $\langle \bar{u}'w' \rangle$; (3) os valores modelados de $\sqrt{\langle w'^2 \rangle}$ nas baixas regiões do dossel ($z/h_f < 0,4$) não apresentaram boa concordância com os dados experimentais, porém, uma melhor concordância foi observada nas regiões mais altas do interior do dossel ($z/h_f > 0,6$); (4) os dois modelos de fechamento utilizados falharam nas previsões dos momentos de terceira ordem da velocidade e (5) os perfis medidos de $\overline{\langle w'u'w' \rangle} / u_*^3$ indicaram que a magnitude desta estatística foi significativa nas regiões acima do dossel em concordância com outros experimentos.

Ross & Vosper (2005) realizaram simulações numéricas em condições neutras sobre uma superfície vegetada em regiões de montanha através de um modelo de fechamento de primeira ordem. O modelo de floresta foi representado pela inclusão de um termo de arrasto na equação de transporte de quantidade de movimento. Os autores utilizaram um esquema

de fechamento que foi proposto em 1998 por J.D. Wilson e J.J. Finnigan. Neste esquema foi assumido um comprimento de mistura (l_m) dentro do dossel constante. Assim, de acordo com a analogia da camada de mistura o tamanho dos turbilhões dentro do dossel foi determinado pela espessura da camada de cisalhamento no topo da copa. Comparações entre as previsões numéricas e resultados experimentais de túnel de vento mostraram que este simples esquema de fechamento de comprimento de mistura apresentou boas estimativas do escoamento médio sobre uma montanha com cobertura vegetal.

2.2

Modelo de Turbulência $k - \varepsilon$

Svensson & Häggkvist (1990) utilizaram um modelo para estudarem o escoamento sobre dosséis baseado no modelo $k - \varepsilon$ padrão. Devido o arrasto dos elementos da vegetação foram incluídos termos fontes nas equações de transporte de quantidade de movimento, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação devido ao arrasto do dossel. Este modelo foi testado para diferentes situações relacionadas a experimentos de túnel de vento e a camada limite. Os resultados mostraram uma significativa redução da velocidade do vento médio na direção do escoamento principal. Além disso, foi observado a geração de um escoamento secundário a jusante da floresta, cuja extensão era de aproximadamente 200 m.

Liu et al. (1995) realizaram simulações do escoamento 2-D sobre florestas utilizando o modelo $k - \varepsilon$ padrão com a inclusão de termos fontes e sumidouros nas equações de transporte do modelo, a fim de investigar o escoamento turbulento a jusante de uma floresta. Os resultados numéricos foram comparados com dados coletados em experimentos de túnel de vento realizados por Chen et al. (1995). Neste trabalho foi aplicado um esquema proposto por Raupach & Thom (1981). Os resultados mostraram boa concordância entre os valores experimentais e numéricos dos perfis da velocidade do vento e da ECT. Os autores sugeriram que o modelo $k - \varepsilon$ pode ser considerado uma ferramenta útil nos estudos da dinâmica do escoamento sobre floresta. Porém, o modelo apresentou algumas deficiências na descrição da turbulência na região de esteira próxima do dossel.

Sanz (2000) derivou termos fontes para as equações da energia cinética turbulenta e taxa de dissipação de energia do modelo $k - \varepsilon$ padrão a fim de modelar o balanço de energia turbulenta na esteira dos elementos da vegetação. O autor mostrou que através das relações de Kolmogorov

pode se obter uma solução analítica para o caso de uma vegetação densa e homogênea com comprimento de mistura constante, em condições de estabilidade neutra. A partir de expressões analíticas das variáveis do escoamento sobre o dossel foi derivado um coeficiente para o “curto circuito espectral” do espectro da energia turbulenta em função da produção da energia cinética turbulenta na esteira.

Três diferentes versões do modelo $k - \varepsilon$ foram utilizadas por Katul et al. (2004), a fim de avaliarem a performance de modelos de fechamento de primeira e de segunda ordem. Os resultados das previsões numéricas dos perfis verticais do vento médio, da ECT e dos tensores de Reynolds foram comparados dados de experimentos de campo realizados sobre seis diferentes tipos de vegetação e de túnel de vento com um modelo de floresta em escala reduzida. As três versões do modelo utilizadas foram: (I) $k - \varepsilon$ com um comprimento de escala prescrito para o cálculo da viscosidade turbulenta; (II) $k - \varepsilon$ padrão e (III) uma simplificação do modelo $k - \varepsilon$, denominado de $k - U$ ou modelo de uma equação, na qual não se tinha uma equação para a taxa de dissipação da energia cinética. Neste caso, Katul e co-autores utilizaram somente k e um comprimento de mistura prescrito. Nos dois primeiros modelos citados, termos sumidouros e fontes foram introduzidos nas equações de transporte de quantidade de movimento, da ECT e sua taxa de dissipação. Os resultados de todas as simulações numéricas nas diferentes morfologias de vegetação investigadas apresentaram boa concordância com os valores experimentais. Não existiram grandes vantagens nas previsões numéricas com a inclusão da equação da taxa de dissipação da energia cinética.

Os resultados encontrados por Katul et al. (2004) também mostraram que a raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM) entre as previsões numéricas e os dados experimentais foi da mesma ordem de grandeza de resultados obtidos com modelos de fechamento de segunda e terceira ordens. Além disso, o tempo computacional para o modelo de uma equação foi quatro vezes menor do que para o modelo $k - \varepsilon$ padrão. Eles sugeriram que este modelo de uma equação pode ser considerado adequado nos estudos das interações entre o sistema solo-vegetação-atmosfera.

Phaneuf et al. (2004) realizaram simulações numéricas do escoamento dentro e acima um modelo de floresta com uma região de clareira. Medições realizadas em experimentos de túnel de vento foram comparadas com previsões numéricas de três versões do modelo de turbulência $k - \varepsilon$: os modelos $k - \varepsilon$ padrão, RNG e $k - \varepsilon$ baixo Reynolds. Um perfil vertical da velocidade na região de floresta a montante da clareira e três perfis

de velocidades na região de clareira provenientes dos experimentos foram comparados com simulações numéricas. A fim de considerar a floresta como uma meio poroso foi utilizada uma condição de contorno de “salto poroso” ou uma descontinuidade no campo de tensão viscosa. Os resultados mostraram que as três versões estudadas apresentaram boa concordância com os dados experimentais, no qual o modelo $k - \varepsilon$ padrão apresentou a melhor performance.

2.3

Experimentos de Campo e de Túnel de Vento

Experimentos de campo e de túnel de vento são ferramentas importantes em muitos estudos do campo de escoamento dentro e acima de regiões de florestas. Estes tornaram-se métodos práticos para avaliar a influência da vegetação no escoamento, providenciar os dados necessários para o desenvolvimento de modelos matemáticos e validação de previsão numérica.

A coleta de dados realizadas em experimentos de campo apresentam a vantagem de fornecerem informações sobre o escoamento e a geometria em escalas reais. Nestes pode-se identificar a influência da turbulência, que ocorre em pequenas e grandes escalas, na camada limite planetária (CLP). É possível também analisar a influência das condições de estabilidade atmosférica no escoamento. Apesar de serem essenciais para um melhor entendimento dos processos físicos envolvidos, estes experimentos são realizados em ambientes não controlados e são dispendiosos.

Além disso, na atmosfera real as medições realizadas fornecem informações sobre as condições atmosféricas apenas para um instante e local particular. Portanto, do ponto de vista prático, tais dados são frequentemente difíceis de serem interpretadas sem uma clara compressão dos processos atmosféricos.

O objetivo fundamental dos experimentos realizados em túneis de vento é reproduzir, no interior de uma seção de testes, uma corrente de ar com propriedades controladas, permitindo o ensaio de modelos em escalas reduzidas, que tanto podem ser árvores artificiais ou qualquer outro tipo de obstáculo sólido. Existem várias aplicações na área de Engenharia de Vento, além das aplicações clássicas do escoamento sobre regiões de florestas (Raupach et al., 1986). Destacam-se os estudos de dispersão de poluentes e de partículas sólidas por efeito do vento.

Nas simulações da CLP em túneis de vento, diversas técnicas foram desenvolvidas para se obter o perfil de velocidade média do vento, a

intensidade da turbulência, a escala integral e o espectro de potência, correspondentes ao tipo de terreno que se pretende simular. Entretanto, existe a dificuldade de se reproduzir nestes estudos, em um modelo de escala reduzida, o conjunto total das condições presentes na atmosfera real. Por exemplo, não se pode gerar as grandes escalas da turbulência que causam as oscilações da direção de vento. Além disso, a maioria dos túneis de vento são limitados para se investigar uma CLP em condições de estabilidade neutra.

Meyers & Baldocchi (1991) obtiveram as estatísticas médias da turbulência dentro e acima de uma Floresta Estacional, a fim de examinarem o balanço da energia cinética turbulenta e da tensão de cisalhamento. Os dados experimentais foram comparados com previsões numéricas de um modelo de fechamento de ordem superior proposto por Meyers & Paw U (1986). Entretanto foram necessárias algumas pequenas modificações no modelo, principalmente em relação ao cálculo da escala de comprimento dentro do dossel. Os resultados mostraram que a arquitetura do dossel tem um importante papel na determinação da estrutura da turbulência. As previsões do modelo superestimaram os componentes da ECT nas regiões acima da interface vegetação-atmosfera e subestimaram no interior do dossel, embora foram observados bons resultados dos perfis verticais da velocidade do vento. Conseqüentemente os momentos da velocidade e a correspondente contribuição dos termos de transporte nas equações de balanço de segunda-ordem foram sub-estimados.

Além disso, Meyers & Baldocchi (1991) sugeriram que a superestimação da energia cinética turbulenta acima do dossel foi resultante do método de parametrização da taxa de dissipação da energia. A geração da energia cinética nas esteiras foi maior que a geração da turbulência devido o cisalhamento. Apesar disto as escalas de movimento nestas regiões não apresentaram significativas contribuições nas variâncias da velocidade. Um importante resultado deste trabalho, foi que as estatísticas da turbulência dentro da Floresta Estacional foram semelhantes as observadas numa Floresta Tropical.

Chent et al. (1995) realizaram experimentos de túnel de vento para investigar o regime de vento a jusante de um modelo artificial de floresta. A partir da distribuição espacial da difusividade vertical, os autores identificaram uma zona de calmaria ($x \approx 3 h_f$), onde h_f é a altura da floresta, e uma zona de ajustamento (entre 3 a 18 h_f) na região de esteira da floresta. Os resultados mostraram que para distâncias $x < 0,7 h_f$ e alturas $h < h_f$, o perfil da velocidade do vento foi de aproximadamente 5 % da velocidade da corrente livre. Ocorreu também um aumento da velocidade

do vento para $h < 3h_f$ à medida que se afastava do extremo da vegetação. Segundo os autores, este aumento da velocidade foi causado pelo transporte vertical de quantidade de movimento pelo escoamento médio. Além disso, a influência do dossel podia ser percebida a uma distância $x \approx 22 h_f$ na região de esteira, pois os valores medidos da velocidade do vento médio foram menores que o valores medidos sem a presença da vegetação.

Brunet & Irvine (2000) analisaram a estrutura da turbulência a partir de dados de seis experimentos realizados em cinco florestas de pinheiro distintas e em uma plantação de milho para diferentes condições de estabilidade atmosférica. Os resultados mostraram que em condições neutras e instáveis, os valores da escala integral de comprimento da componente vertical da velocidade do vento (λ_w) e da escala de comprimento associada ao cisalhamento vertical do vento (L_s) apresentaram grande espalhamento e que ambas as variáveis decrescem em condições estáveis com o aumento da estabilidade atmosférica. Os autores reportaram que as escalas de comprimento turbulentas, associadas às transferências verticais de quantidade de movimento próximo a interface vegetação-atmosfera foram controladas por L_s . Este estudo também confirmou a hipótese citada por Raupach et al. (1996) de que a existência de um ponto de inflexão, nos perfis verticais da velocidade média do vento, determina a não aplicabilidade da Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov para o escoamento turbulento sobre regiões vegetadas.

Kruijt et al. (2000) investigaram a estrutura da turbulência em duas reservas florestais da região Amazônica brasileira para diferentes condições de estabilidade atmosférica acima do dossel da vegetação. Os valores da escala integral de comprimento para o componente vertical da velocidade do vento no topo do dossel foram pequenos, aproximadamente $0,15 h_f$, comparado aos valores esperados pelos autores, de aproximadamente $0,28 h_f$. Estes resultados mostraram que apesar das transferências entre as camadas inferiores e acima do topo do dossel das florestas tropicais não serem totalmente suprimidas, elas diferem significativamente de outras florestas no que se refere à capacidade de penetração dos vórtices associados às estruturas coerentes em regiões inferiores do dossel.

Liu et al. (2001) realizaram experimentos de campo com anenômetros/termômetros sônicos 3-D para obterem os três componentes da velocidade do vento e temperatura dentro e acima do dossel da vegetação. O método de correlação de vórtices foi utilizado para se determinar o espectro da turbulência, a isotropia local e taxa de dissipação. Os experimentos foram realizados na Reserva de Equilíbrio Ecológico Na-

tural da China. Os picos das frequências espectrais da velocidade e da temperatura foram maiores no interior da vegetação do que acima desta. Isto ocorreu devido a quebra das grandes escalas do escoamento médio pelos elementos da vegetação (folhas, galhos e troncos). Acima da interface vegetação-atmosfera as escalas dominantes dos turbilhões foram 3 a 5 vezes maiores que no interior do dossel.

Marshall et al. (2002) mediram os perfis da velocidade média dentro e acima de três diferentes modelos artificiais de florestas através de um anemômetro Laser Doppler em experimentos de túnel de vento. Os resultados mostraram que os perfis verticais de velocidade média próximos ao topo do dossel exibiam as inflexões de uma camada cisalhante. Neste trabalho foi demonstrado que estes perfis da velocidade próximos ao topo de dosséis de diferentes densidades colapsam para um perfil universal quando escalonados pela escala de comprimento da camada de mistura. Estes resultados demonstram a importância do mecanismo da camada de mistura do escoamento sobre superfícies vegetadas.