

3 Revisão da Literatura

Como foi mencionado anteriormente, a abordagem do problema da dispersão de poluentes pode ser baseada em técnicas experimentais e teóricas. A revisão bibliográfica apresentada ao longo desta seção descreve trabalhos relacionados à modelagem numérica da dispersão de poluentes atmosféricos, que estão mais relacionados com a abordagem utilizada no presente trabalho. Apsley (1995) apresenta uma extensa revisão de trabalhos que utilizam as diferentes abordagens para o problema, incluindo as experimentais e teóricas.

No trabalho de Rathby et al. (1987) foi avaliado o desempenho de um modelo numérico tridimensional na simulação de escoamentos sobre terrenos irregulares. A topografia simulada corresponde a uma colina isolada de 116m de altura. Medições de campo do escoamento sobre a colina forneceram dados para comparação. O modelo empregou a técnica de volumes finitos e foi baseado na solução das equações tridimensionais do movimento. Assumiu-se que o escoamento estudado apresentava estabilidade neutra, de forma que não foram considerados termos de empuxo nas equações de conservação. Para a representação dos efeitos de turbulência foi utilizado o modelo $k-\varepsilon$. O valor da constante C_μ foi alterado para levar em consideração efeitos relativos à Camada Superficial da atmosfera.

Os resultados mostraram que as variáveis médias do escoamento simulado obtiveram boa concordância com os dados medidos. Segundo os autores, a energia cinética turbulenta calculada foi mais alta do que a medida devido à escolha da constante usada no modelo de turbulência. Como a escolha do valor da constante foi baseada em dados experimentais extensamente investigados as discrepâncias podem ser, portanto, atribuídas a diferenças significativas entre o escoamento investigado e outros escoamentos de camada limite atmosférica, ou ainda a erros nas medições.

Algumas grandes discrepâncias na distribuição vertical de tensões sugeriram que o modelo de turbulência era inadequado para a correta simulação. Apesar disso, os autores concluíram que o desenvolvimento da modelagem numérica permitiu a simulação do escoamento sobre colinas isoladas com razoável precisão.

Dawson et al. (1991) desenvolveram um código numérico para modelar o transporte atmosférico e a difusão de poluentes sobre edificações e sobre uma colina tridimensional. O modelo clássico de duas equações, utilizado no fechamento de primeira ordem para a turbulência foi modificado de forma a considerar os efeitos da camada superficial e a reduzida produção de dissipação na região acima da camada superficial encontrada na camada limite atmosférica.

Segundo os autores, a preocupação com a poluição atmosférica levou a um grande número de estudos no escoamento e na dispersão sobre colinas isoladas de pequenas dimensões. Na modelagem utilizada pela EPA (Agência de Proteção Ambiental Norte-americana), o modelo de pluma Gaussiana para escoamento sobre terreno homogêneo é modificado através de um fator de correção de terreno obtido empiricamente, que leva em consideração os efeitos de colinas sobre a pluma. Os efeitos de esteiras e separação do escoamento são ignorados e é enfatizado o contato da pluma com a face a montante da colina.

Experimentos de campo realizados sobre uma colina de 300 m de altura (Ryan et al., 1984) mostraram que, em vários testes, plumas geradas por emissões a montante da colina foram transportadas para a zona de recirculação atrás da colina resultando em concentrações máximas no solo localizadas a jusante do seu topo. Isto indica que os efeitos de esteira influenciam fortemente o transporte e a difusão de poluentes sobre colinas isoladas. As observações indicaram que a pluma foi transportada por advecção e/ou difusão para a região de recirculação atrás da colina com um subsequente transporte para os níveis mais próximos ao solo.

Ainda segundo os autores (Dawson et al., 1991), os estudos de engenharia mostram que somente os modelos de segunda ordem, e modelos de primeira ordem mais sofisticados são capazes de simular o escoamento e os processos de dispersão quando os efeitos de esteiras de separação de escoamento e efeitos de empuxo estão

presentes. Esquemas numéricos bi e tridimensionais são usados para calcular o escoamento e a transferência de calor em sistemas de pequena escala de interesse para os engenheiros. Por outro lado, cálculos de escoamentos atmosféricos eram, na maioria das vezes, focados em fenômenos de grande escala nos quais as zonas de recirculação ou não estavam presentes ou então eram muito menores do que a escala da malha computacional utilizada nos cálculos. Entre os escoamentos de engenharia de pequena escala e os movimentos atmosféricos de grande escala situa-se a área de escoamentos sobre edificações e menores acidentes de relevo.

O código numérico TEMPEST utilizado para os cálculos do escoamento corresponde a um programa tridimensional de diferenças finitas que resolve as equações transientes do movimento, continuidade e energia para escoamentos incompressíveis que leva em consideração variações de densidade através da aproximação de Boussinesq. Os termos de turbulência nas equações governantes, decorrentes da decomposição de Reynolds, são obtidos utilizando-se o modelo $k - \varepsilon$ de turbulência. Duas alterações no modelo $k - \varepsilon$ foram recomendadas para a sua aplicação a escoamentos atmosféricos. A primeira consiste na modificação do valor da constante c_μ de forma a levar em consideração os efeitos da camada superficial. A segunda modificação consiste em alterar o valor de constantes na equação de transporte da dissipação da energia cinética turbulenta para representar melhor as escalas de comprimento característico de turbulência na região acima da camada superficial.

Para o cálculo das concentrações foi utilizado o modelo isotrópico a duas equações $k - \varepsilon$ através do código PEST. Foi também testada uma abordagem na qual as difusividades turbulentas de massa nas direções horizontal e vertical foram ajustadas de maneiras diferentes, de forma a levar em consideração os efeitos não isotrópicos de empuxo no transporte turbulento vertical. De acordo com os autores, para as simulações da dispersão em estabilidade aproximadamente neutra realizadas no trabalho, os resultados obtidos com o modelo isotrópico e com o não isotrópico foram praticamente os mesmos, e somente a abordagem isotrópica foi descrita.

Foram realizadas simulações do escoamento e da dispersão sobre uma colina de 330m de altura denominada Steptoe Butte, localizada em Washington – E.U.A.. Os

resultados numéricos foram comparados a medições de campo realizadas no trabalho desenvolvido em Ryan et al. (1984). A emissão foi simulada de duas diferentes maneiras: na primeira, foi calculada uma taxa média de emissão no volume da célula contendo a fonte pontual. Na segunda, uma técnica Gaussiana foi utilizada para calcular os valores de concentração em uma região definida a jusante da fonte emissora. Os resultados obtidos com as duas abordagens mostraram-se idênticos.

Foram encontradas divergências entre os resultados de concentração calculados e medidos no lado a montante da colina. Leves oscilações de vento que ocorreram durante o experimento de campo, e que não foram consideradas nas simulações, contribuíram para tais diferenças. A frequência de oscilação pode ter sido alta o suficiente para evitar o aparecimento de altos valores de concentração média ao nível do solo no lado a montante da colina.

Por outro lado, as oscilações foram responsáveis pelo surgimento de correntes advectivas contornando as laterais da colina e atingindo a região a jusante desta. O poluente transportado pelas correntes para a região de esteira turbulenta podem ter contribuído para os altos níveis de concentração no solo observados na região atrás da colina nas medições experimentais. Nas simulações numéricas foi verificado que a pluma atingiu a superfície frontal da colina (a montante do topo) e houve pouco transporte da pluma para a zona de recirculação na região atrás da colina.

Em Castro e Apsley (1997), foram investigadas simulações computacionais do escoamento e da dispersão de poluente sobre colinas bidimensionais com diferentes inclinações em condições de estabilidade atmosférica neutras. Os resultados das simulações foram comparados a resultados de experimentos de laboratório. De acordo com os autores, os principais efeitos da topografia na dispersão da poluição resultam das variações do escoamento médio (que afeta o caminho da pluma), da turbulência (que afeta a velocidade da dispersão) e a possibilidade da advecção do poluente para o interior de regiões de recirculação. Embora complexos modelos de turbulência tenham sido utilizados para cálculos de dispersão, a maior parte das modelagens de dispersão para uso regulador são ainda realizadas através de modelos simplificados analíticos – a maioria deles emprega alguma forma do modelo de pluma-Gaussiana.

Na década passada, a atenção foi direcionada na tentativa de superar algumas das deficiências dos modelos simples, mas os novos modelos ainda não foram capazes de levar em consideração apropriadamente efeitos tais como aqueles causados por regiões de separação e forte estabilidade.

Os autores do trabalho citado (Castro e Apsley, 1997) propuseram modificações no modelo $k-\varepsilon$ para escoamentos ambientais. Tais modificações têm o propósito de levar em consideração o fato de que, (1) existe sempre um limite superior para o tamanho do vórtice turbulento (e logo, para o comprimento de escala), usualmente definido pela profundidade da camada limite ou pela estratificação de densidade e, (2) que a estrutura da turbulência responde à curvatura do escoamento médio e a deformações longitudinais de maneiras que o modelo $k-\varepsilon$ tradicional não é capaz de representar. Tais alterações foram denominadas pelos autores como “modificação de curvatura” e “modificação de dissipação”. A modificação de curvatura se dá através da alteração da forma de cálculo da viscosidade turbulenta, enquanto a modificação de dissipação foi introduzida no termo de produção na equação de transporte de ε .

Foi considerado que o poluente não influenciou as características do escoamento, de modo que a sua equação de transporte pode ser resolvida separadamente, uma vez que o campo de escoamento tinha sido calculado. As componentes da velocidade e propriedades relacionadas à turbulência foram interpoladas para uma segunda malha, refinada próxima à posição da fonte. Além disso, um domínio analítico foi utilizado para o cálculo das concentrações próximas à fonte, através da solução exata da equação tridimensional de advecção-difusão com coeficientes constantes. De acordo com os autores, este procedimento permite a utilização de uma malha mais grosseira.

Os resultados das simulações realizadas foram comparados com dados de túnel de vento disponíveis na literatura, que incluíam valores referentes ao escoamento médio e quantidades de turbulência sobre colinas, assim como dados de concentração para fontes situadas em diversas posições em torno das colinas.

Os resultados apresentados mostraram que o modelo $k-\varepsilon$ de turbulência modificado, de maneira geral, reproduziu razoavelmente o comportamento do escoamento médio, mas subestimou levemente os valores da energia cinética

turbulenta e a dispersão lateral da pluma. Segundo os autores, esta última deficiência pôde ser compensada através da normalização dos valores das concentrações ao nível do solo pelos valores máximos obtidos em simulações realizadas na ausência da colina, ou seja, em terreno plano. Ainda, calculando-se corretamente o escoamento médio, consegue-se obter resultados precisos para o “fator de amplificação devido ao terreno” (“terrain amplification factor”), que corresponde à razão entre a concentração máxima ao nível do solo no escoamento em terreno complexo e aquela obtida para terreno plano.

A modelagem empregada no trabalho permitiu a observação de elevados valores de concentração à montante da fonte, quando esta estava posicionada em regiões de recirculação. Este resultado, que não é captado por modelos simples de pluma Gaussiana, foi previsto em razoável concordância com os dados experimentais. Outro resultado importante consiste na observação de que ocorrem grandes variações nas concentrações ao nível do solo dentro da cavidade, onde está posicionada a fonte. Frequentemente assume-se que dentro da cavidade de recirculação, o longo tempo de residência do poluente e os elevados níveis de turbulência, asseguram ser esta uma região bem misturada de forma que as concentrações ao nível do solo são aproximadamente constantes. Esta idéia algumas vezes forma a base para as modificações em modelos de dispersão atmosféricos semi-empíricos para se levar em consideração tais regiões de cavidades associadas, por exemplo, a grandes edificações. Desta forma, concluiu-se que tais modelos teóricos, que assumem a concentração constante na cavidade, não são muito realísticos.

Para finalizar os autores ressaltam que as simulações computacionais foram capazes de prever adequadamente os fatores de amplificação devido ao terreno assim como a localização das máximas concentrações ao nível do solo. Modelos mais simples, frequentemente utilizados em indústrias, não são capazes de representar adequadamente tais características em situações nas quais ocorre separação no escoamento.

Em outro trabalho, Apsley e Castro (1997) aplicaram o modelo descrito em Castro e Apsley (1997) em simulações atmosféricas tridimensionais em escala real. O

trabalho investigou o escoamento e a dispersão de poluente gasoso sobre uma colina aproximadamente axi-simétrica, com altura máxima em torno de 100m, 500m de raio, conhecida como Cinder Cone Butte. Além de comparar os resultados numéricos com dados obtidos em campo, também foram usados resultados obtidos em experimentos em escala de laboratório.

Neste trabalho os autores comentam que mantiveram o valor convencional (0,09) para a constante C_μ , já que o conjunto de constantes envolvidos no modelo $k-\varepsilon$ de turbulência foram ajustados em conjunto e alterações no valor de C_μ não deveriam ser realizados sem a re-otimização das demais constantes.

As simulações revelaram características do escoamento e da dispersão que não são satisfatoriamente incorporadas pelos modelos reguladores típicos. Os cálculos do campo de ventos demonstraram que a forte estabilidade intensifica assimetrias no escoamento associadas ao complexo formato da colina. A advecção no sentido da zona de recirculação tridimensional atrás da colina resultou no crescimento das concentrações ao nível do solo nessa região. Condições mais estáveis também levaram ao aumento da dependência dos níveis das concentrações no solo com relação à direção do vento (particularmente onde pequenas variações na direção do vento à montante da colina levam a pluma a trocar de um lado da colina para o outro) e à importante assimetria da pluma devido ao terreno.

No trabalho desenvolvido por Boçon e Maliska (2000), um modelo de turbulência não isotrópico foi estendido e aplicado a escoamentos tridimensionais estavelmente estratificados e cálculos de dispersão. Segundo os autores, Koo (1993) desenvolveu um modelo $k-\varepsilon$ modificado não-isotrópico que leva em consideração as diferentes difusividades turbulentas nas direções laterais e verticais na atmosfera. Tal modelo é derivado do modelo de tensões algébricas e foi aplicado em problemas unidimensionais para a previsão de perfis verticais de velocidade, temperatura potencial e variáveis de turbulência para o escoamento horizontal em uma camada limite atmosférica homogênea. O modelo também foi aplicado a problemas bidimensionais, como por exemplo a simulação da circulação da brisa do mar. Sob o ponto de vista dos autores na época do desenvolvimento do trabalho (Boçon e

Maliska, 2000), devido a limitações de recursos computacionais, os modelos de turbulência mais complexos como o tensões de Reynolds e a Simulação de Grandes Escalas não eram apropriados para a maior parte dos problemas de engenharia, devido ao grande tempo de CPU e memória necessários.

A tarefa de calcular o campo de concentrações a jusante da fonte foi dividida em duas etapas. Em primeiro lugar foi calculado o escoamento (velocidade, temperatura potencial e variáveis turbulentas) na região de interesse. Posteriormente, os campos de velocidade e de difusividade turbulenta foram utilizados para se resolver a equação da concentração. A separação pode ser feita, pois considerou-se que a liberação do poluente não perturba o escoamento. No experimento em túnel de vento contra o qual os resultados foram comparados, o gás traçador foi liberado praticamente sem quantidade de movimento nem empuxo térmico.

Como a malha computacional utilizada para o cálculo do escoamento não é adequada para o cálculo das concentrações, uma segunda malha (refinada próximo à fonte) foi utilizada para este propósito. As velocidades e as difusividades turbulentas obtidas da solução do escoamento são interpoladas para uma segunda malha para o cálculo das concentrações.

Após calcular as concentrações, os autores constataram que, para todos os casos estudados (neutros e estáveis), ocorreu uma dispersão excessivamente alta da pluma próximo à fonte e, conseqüentemente, baixas concentrações por todo o domínio (especialmente na região mais próxima à fonte). Baseando-se numa distribuição de pluma Gaussiana próxima à fonte, os autores decidiram utilizar um tratamento especial para reduzir linearmente as difusividades turbulentas calculadas a partir da solução do escoamento, para serem aplicadas nos cálculos de concentração. Usando este procedimento simples, a qualidade dos resultados melhorou consideravelmente.

Os resultados para o campo de velocidades foram similares àqueles obtidos com o modelo $k-\varepsilon$ clássico, porque os gradientes verticais das variáveis do escoamento não eram grandes (quando comparados com o campo de concentrações), resultando aproximadamente na mesma difusão turbulenta para ambos os modelos: o $k-\varepsilon$ clássico (isotrópico) e o modificado (não isotrópico). Contudo, para os resultados de concentração, as diferenças entre as soluções numéricas obtidas com os

modelos $k-\varepsilon$ clássico e modificado foram bastante distintas. A concordância dos valores de concentração obtidos através do modelo $k-\varepsilon$ modificado – comparados com resultados de túnel de vento – foi bastante satisfatória para o caso de terreno plano. Sobre terreno montanhoso, os valores máximos de concentração foram muito bem previstos, mas suas localizações (altura acima do solo) não foram. O problema foi atribuído à falha do modelo em prever a zona de recirculação aberta tridimensional, que ocorre na região à jusante do topo das colinas. Nas zonas de recirculação, as viscosidades turbulentas foram superestimadas e assim o tamanho da recirculação é subestimado. Conseqüentemente, o caminho da pluma sobre o topo da colina e sobre a região à jusante do topo não foi bem prevista, com relação à sua altura acima do solo, que é subestimada. Apesar disso, o modelo $k-\varepsilon$ modificado não-isotrópico produz melhores resultados do que o modelo isotrópico convencional.

Em um outro trabalho, Boçon e Maliska (1999) avaliaram o desempenho do modelo $k-\varepsilon$ modificado não-isotrópico em um experimento de dispersão em escala real. O escoamento e a dispersão de um contaminante foram simulados computacionalmente sobre uma montanha de aproximadamente 100m de altura (Cinder Cone Butte (USA)). Foi utilizado um caso representativo de condição atmosférica muito estável, que é geralmente considerada a pior situação sob o ponto de vista da poluição atmosférica. As malhas foram geradas pelo código TOPOGRID, que produz malhas alinhadas com a direção do vento a montante da montanha, permitindo refinamento local onde for necessário.

Segundo os autores, uma característica interessante de escoamentos estavelmente estratificados é que, na presença de um obstáculo, em níveis mais próximos ao solo o escoamento não tem energia suficiente para passar sobre a montanha. Esta camada mais baixa apresenta uma significativa divergência lateral com o escoamento seguindo os contornos da montanha. Foi verificado que para alturas até aproximadamente 10m o escoamento era essencialmente horizontal, passando ao redor da montanha. Acima de cerca de 20m o escoamento passa sobre a montanha sem divergência lateral.

Os valores de concentração calculados ao nível do solo foram superestimados, quando comparados com os valores experimentais. Isto pode ser explicado pela grande variação da direção do vento que ocorre no caso real. Intensas variações na direção do vento levam a pluma de um lado da montanha para outro da montanha, alternadamente. Isto causa uma grande dispersão da pluma real e, portanto, menores concentrações ao nível do solo. Devido à grande sensibilidade do caminho da pluma às variações na direção do vento, e às intensas variações do vento próximo ao solo, os autores concluíram que a dispersão da pluma e, portanto, as concentrações não são quantitativamente bem previstas por simulações computacionais ou experimentos em laboratório nas quais as condições a montante do obstáculo permanecem constantes.

Em sua tese de doutorado, Santos (2000) investigou o escoamento e a dispersão de poluentes nas vizinhanças de edificações utilizando uma técnica CFD (“Computational Fluid Dynamics”). Foram apresentados resultados de simulações numéricas em condições atmosféricas neutras, estáveis e instáveis utilizando um obstáculo cúbico e outro de formato complexo.

Foi realizada uma investigação da capacidade de modelos CFD utilizando o modelo $k-\varepsilon$ de turbulência para simular o escoamento atmosférico ao redor de uma edificação de formato cúbico através da comparação das simulações numéricas com dados de túnel de vento e outras simulações numéricas utilizando diferentes modelos de turbulência (simulação de grandes escalas, modelo de tensões de Reynolds, modelo algébrico de tensões e modelo $k-\varepsilon$ clássico). O modelo $k-\varepsilon$ empregado incluiu a correção de Kato e Launder (1993) no cálculo da produção de energia cinética turbulenta e uma função de parede modificada. Os resultados obtidos constituíram-se em uma considerável evolução em relação àqueles apresentados pelo modelo $k-\varepsilon$ clássico, que superestimou enormemente os valores da energia cinética turbulenta na quina superior do obstáculo. O campo de velocidade foi acuradamente previsto pelo modelo $k-\varepsilon$ empregado. Embora os níveis de energia cinética turbulenta obtidos tenham sido comparáveis àqueles obtidos por outros modelos, existiram algumas divergências em relação aos valores obtidos em túnel de vento.

Valores alternativos para as constantes de turbulência (C_μ e σ_ϵ) encontrados em experimentos de campo foram investigados e uma forte influência dessas constantes foi verificada no campo de energia cinética turbulenta calculado. Os níveis de energia cinética turbulenta variaram significativamente ao redor da edificação, alterando o campo de velocidade média a jusante. Os níveis de concentração também foram afetados pela alteração dos valores das constantes de turbulência, mas não tanto quanto os níveis de energia cinética turbulenta.

Foram realizados experimentos de campo para medir a distribuição de concentração nas superfícies de uma edificação de formato complexo. Foi investigada a influência da estabilidade atmosférica e do tempo de média (tempo definido para obtenção de média) na distribuição de concentração nas superfícies de tal edificação.

Os resultados experimentais obtidos mostraram que o aumento do tempo de média produziu uma leve redução na concentração média e um leve aumento na intensidade da flutuação de concentração, especialmente na parede a jusante do cubo. Esta tendência foi mais pronunciada sob condições instáveis.

Através da comparação entre os resultados numéricos e os experimentais foi possível verificar que a simulação numérica da dispersão ao redor da edificação de formato complexo subestimou os valores de concentração por um fator de dois. Contudo, a concordância qualitativa entre os dados numéricos e experimentais foi muito boa.

Em Reis Júnior et al. (2002), foi implementado um algoritmo para a determinação do campo de ventos sobre uma região de topografia moderadamente complexa, baseado no princípio da conservação de massa, incluindo informações sobre a topografia e reconstruindo o campo de ventos tridimensional.

Conforme é descrito no trabalho, os modelos utilizados para a determinação do campo de ventos em regiões de topografia complexa podem ser divididos em dois grupos principais: os modelos de prognóstico e os modelos de diagnóstico. Os primeiros baseiam-se na solução das equações de quantidade de movimento e energia que governam o escoamento de fluidos. Além do considerável esforço computacional associado à solução das equações tridimensionais e transientes, alguns autores

apontam que a complexidade dos dados de entrada requeridos por tais modelos, muitas vezes, restringe a sua aplicabilidade.

Os modelos de diagnóstico baseiam-se na utilização de dados medidos para determinar o campo de ventos sobre a região. A hipótese principal deste tipo de modelo é que existam dados meteorológicos suficientes para a caracterização do escoamento na região. Além disso, a principal influência sobre o escoamento corresponde às mudanças de direção impostas pela conservação de massa através das variações de relevo, negligenciando os efeitos de inércia e viscosos. A simplicidade de tais modelos os torna extremamente atraentes para situações práticas.

No referido trabalho, um modelo de diagnóstico foi testado em um problema de escala real, em uma região onde o campo de ventos e sua variação durante o ciclo diário são analisados. Para a obtenção do campo de ventos são necessárias duas etapas: a etapa de inicialização e a de ajuste. Na etapa de inicialização os vetores de vento conhecidos em determinados pontos (estações meteorológicas) são transformados em um “campo inicial”, através de interpolação/extrapolação, para a região de estudo. A etapa de ajuste visa transformar o “campo inicial” em um “campo final” que satisfaça a conservação de massa.

O procedimento utilizado na etapa de ajuste é baseado na técnica variacional descrita originalmente por Sasaki (1958) e (1970). O desenvolvimento matemático para o problema leva a uma equação diferencial parcial elíptica para a perturbação (ou correção) dos componentes de velocidade. Assim, para se determinar o valor ajustado das componentes da velocidade é necessário resolver tal equação com base nos valores do “campo inicial”. A técnica de volumes finitos foi utilizada para a solução da equação diferencial elíptica.

As condições de estabilidade atmosférica foram consideradas na construção inicial do campo de velocidades e, na etapa de ajuste, através de parâmetros que indicam a importância dos movimentos verticais nas correções de velocidade.

A análise de acurácia de modelos de diagnóstico de campo de ventos é normalmente efetuada excluindo-se dados de algumas estações meteorológicas (dos dados de entrada para o modelo) e verificando se o campo de vento resultante consegue reproduzir de maneira adequada o escoamento na região.

A avaliação da qualidade das previsões efetuadas pelo modelo revelou os bons resultados. Todavia mostrou que a redução do número de estações utilizadas como entrada pelo modelo restringe de maneira significativa a capacidade de simular escoamentos com padrões mais complexos.

Em Uchida e Ohya (2003), foi desenvolvido um código CFD (RIAM-COMPACT) com o objetivo de simular escoamentos atmosféricos transientes tridimensionais sobre terreno complexo com escalas de comprimento característico da ordem de quilômetros. O código é baseado na simulação de grandes escalas utilizando o método de diferenças finitas. Os autores consideram que a abordagem através da simulação de grandes escalas é conceitualmente mais apropriada para a previsão do campo de ventos local sobre terreno complexo porque o movimento turbulento de grande escala, que é diretamente afetado pelas condições de contorno é calculado explicitamente, de modo que somente os efeitos do movimento de pequena escala, que tende a ser mais isotrópico e dissipativo, tem que ser modelado. Apesar de observarem que a simulação de grandes escalas atualmente exige um alto custo computacional, os autores consideram que esta abordagem mostra-se como um método promissor.

O código RIAM-COMPACT é aplicado no cálculo do escoamento atmosférico turbulento sobre um terreno complexo real em uma região horizontal de 9,5 km × 5 km com uma resolução espacial relativamente fina (de 50m). O escoamento é calculado utilizando-se uma malha computacional co-localizada em coordenadas curvilíneas generalizadas. Os resultados numéricos obtidos demonstraram que as variações induzidas no campo de ventos pelos efeitos topográficos, como por exemplo a aceleração local do vento e a separação do escoamento, foram simuladas com sucesso.

Lun et al. (2003) ressaltam a importância da previsão da distribuição de energia eólica sobre terrenos para a apropriada seleção de locais para a instalação de centrais eólicas. Assim, o trabalho citado apresenta simulações numéricas bi-dimensionais do escoamento atmosférico sobre dois tipos de características topográficas: os penhascos

e as colinas. Foram investigados três tipos de modelos de turbulência nas simulações, o modelo $k-\varepsilon$ clássico, uma forma modificada do $k-\varepsilon$ e uma forma revisada não linear do modelo $k-\varepsilon$. Também foi investigada a acurácia nas predições considerando, através de funções de parede, os efeitos de rugosidade superficial no campo de escoamento sobre o terreno.

Os resultados obtidos mostraram que a variação da rugosidade superficial teve uma grande influência no ponto de separação do escoamento e na recirculação. A posição do ponto de separação ocorreu mais cedo para uma maior rugosidade superficial levando à produção de uma maior área de recirculação atrás da montanha. Segundo os autores foi verificada a sobreestimativa da energia cinética turbulenta em regiões de impacto (“impinging”) do escoamento com o obstáculo quando foi utilizado o modelo $k-\varepsilon$ clássico. Esta falha foi corrigida pelos modelos $k-\varepsilon$ revisados investigados. Na região atrás da colina o modelo $k-\varepsilon$ não linear apresentou resultados mais próximos aos dados experimentais do que os outros modelos.