

Resumo

O estudo dos fenómenos resultantes da interacção da atmosfera com a orografia reveste-se de grande importância por ter muitas aplicações de carácter prático. Uma aplicação de grande relevância na actualidade é o aproveitamento do potencial eólico. O estudo do comportamento de escoamentos sobre orografia complexa permite otimizar o uso deste tipo de energia, determinando, por exemplo a localização e a intensidade dos máximos da velocidade média do vento.

Neste trabalho pretende-se estudar o comportamento do acréscimo relativo de velocidade, nomeadamente dos seus valores máximos e médios, em função das características da orografia e da estratificação da atmosfera. Serão estudados escoamentos estaticamente neutros e estáveis de camada limite sobre orografia complexa, usando um modelo numérico não hidrostático, de mesoescala, (Argain, 2003) previamente validado com observações. Este modelo será também usado para validar o desempenho de um modelo teórico. No modelo numérico os efeitos da estabilidade à superfície são incorporados através da teoria de similaridade de Monin-Obukhov. De modo a poder simular escoamentos sobre orografia complexa, o modelo numérico está dotado de um conjunto de ferramentas tais como: o uso de coordenadas generalizadas ortogonais, enquanto que o modelo analítico está baseado no modelo linear de Hunt et al. (1988a) com a modificação de Hunt et al. (1988b) para incorporar os efeitos da estabilidade.

Introdução

Desde os primórdios o Homem necessitou de energia para viver. Acompanhando a evolução da humanidade, houve uma crescente necessidade de fontes de energia. Até hoje, a civilização industrial viveu quase exclusivamente da exploração intensiva de energias acumuladas ao longo das épocas geológicas. Assim, mais de 85% da energia consumida, hoje, é obtida através do carvão, petróleo, gás natural, urânio, etc. Como a velocidade de reposição destas energias é praticamente nula na escala da vida humana o seu esgotamento está para muito breve. Neste contexto, as fontes de energia renováveis constituem um factor primordial na estratégia energética do planeta. Devido ao rápido desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, o uso, de modo rentável e eficiente, destas fontes é uma realidade. À medida que se optar pelas energias renováveis, poder-se-á pensar na redução progressiva da utilização do carvão e do petróleo, criando novas perspectivas de futuro.

A energia eólica é hoje considerada uma das mais promissoras fontes naturais de energia, principalmente porque é renovável, limpa, pouco invasiva e rentável. Ela constitui uma alternativa real de substituição das fontes de combustíveis fósseis para a redução do efeito estufa.

O custo da geração de energia eólica tem caído rapidamente nos últimos anos. Em 2005 o custo da energia eólica era cerca de um quinto do que custava no final dos anos 90, e essa queda de custos deve continuar com a ascensão da tecnologia de produção de grandes aerogeradores. A energia eólica é hoje em dia vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis, caracterizada por uma tecnologia madura desenvolvida principalmente na Europa e nos EUA.

Assim, e dada a importância de que se reveste esta forma de energia, pretende-se que este trabalho seja um modesto contributo para o estudo do potencial eólico de um local. A circulação atmosférica é, em larga medida, uma circulação forçada pela superfície. Parte do forçamento tem carácter local, envolvendo fluxos de momento linear, massa e energia, transportados na vertical por processos de difusão molecular e pela turbulência (Argain, 2003).

As alterações de escoamento a grande distância horizontal e vertical da zona de forçamento são perturbações estacionárias e transientes, provocadas quer pela orografia, quer por padrões de heterogeneidade superficial em todas as escalas. A interacção da atmosfera com a orografia tem muitas aplicações de carácter prático, como, por

exemplo, o potencial eólico pode ser otimizado se se conhecer a localização dos máximos da velocidade média do vento, em função do perfil da orografia e da estratificação. O estudo do escoamento na vizinhança de orografia complexa pode ser realizado recorrendo a diferentes metodologias. A metodologia experimental, baseada na observação de escoamentos laboratoriais, melhor ainda de escoamentos reais em torno de obstáculos, constitui uma base fundamental para este estudo. No entanto, as experiências são em geral muito dispendiosas. Em escala real, normalmente não é possível controlar os parâmetros do escoamento, a resolução é sempre limitada e a localização é quase sempre difícil. Estas desvantagens obrigam o recurso à modelação teórica que pode ser empírica, analítica ou numérica. Tanto a modelação numérica como a empírica têm baixos custos, mas a primeira requer dados fiáveis para a calibração dos modelos e a segunda requer aproximações lineares que a tornam com frequência não aplicável a casos reais. Assim, optou-se por aplicar a modelação numérica que permite estudar qualquer tipo de casos reais, não lineares. A qualidade do desempenho dos modelos numéricos depende, no entanto, da sua validação com observações e eventualmente com modelos analíticos.

Estado actual de conhecimentos no tema em estudo

O estudo de escoamentos sobre a orografia tem sido uma área de grande interesse teórico, experimental e numérico. Realçam-se os trabalhos de Lyra (1943) e Queney (1948) no que se refere a escoamentos lineares da subcamada externa. Estes, foram trabalhos pioneiros usando a teoria das perturbações lineares e obtiveram importantes soluções para as ondas gravíticas forçadas por uma topografia tridimensional isolada, numa atmosfera aberta, invíscida e homogénea. Os resultados de Queney (1948) abrangem os casos não hidrostático, hidrostático e com rotação, demonstrando a importância da escala horizontal da orografia na definição do tipo de escoamento (cf. Miranda, 1991). Queney (1948) demonstra também a capacidade das ondas gravíticas de transferir momento linear e momento angular (quando a rotação é importante) de uma região para outra ou entre a superfície e uma região a grande altitude. No caso das ondas gravíticas geradas em montanhas, a transferência vertical de momento é compensada pela força resultante exercida pela perturbação de pressão sobre a montanha; arrasto ondulatório.

Em 1949, Scorer estendeu a análise linear de Queney (1948) ao caso de uma atmosfera não homogénea, e definiu as condições para a existência de ondas a jusante. Eliassen and Palm (1961) desenvolveu uma teoria com um relevante resultado teórico no que se refere à propagação de ondas internas em escoamentos reais, em que existe cisalhamento e/ou heterogeneidade da estratificação. O resultado principal desta teoria sobre a interação das ondas com escoamento médio, é o teorema de Eliassen e Palm: num escoamento estacionário, não dissipativo e sem níveis críticos ($U \neq 0$), o fluxo ondulatório de momento é constante, ou seja, as ondas não modificam o escoamento médio.

Sawyer (1962) obteve soluções analíticas para as ondas a jusante (*lee waves*). Klemp & Lilly (1975), usando um modelo linear, estudaram a propagação das ondas gravíticas numa atmosfera multicamadas com descontinuidades no perfil de estabilidade. Long (1953), usou uma teoria linear, obtendo soluções analíticas para o caso em que a amplitude da montanha é considerada grande e portanto o escoamento é não linear. As soluções de Long (1953) só são possíveis porque nos escoamentos bidimensionais não há produção de vorticidade associada ao estiramento dos vórtices (*stretching*), e como não há difusão viscosa de vorticidade gerada na fronteira, a única fonte de vorticidade é a baroclinicidade. Este autor chegou à conclusão de que os efeitos não lineares

produzem um aumento de inclinação das isentrópicas, com a conseqüente geração de ventos nas encostas a jusante da orografia e incremento do arrasto ondulatório. O modelo de Lang (1953) tem sido usado como referência teórica em escoamentos não lineares por autores como Clark e Peltier (1977,1984), Peltier e Clark (1979,1983), Durran (1986). Estes autores têm também, estudado fenômenos que vão para além da validade deste modelo, tal como o rompimento das ondas gravíticas.

A compreensão da origem dos regimes de arrasto elevado tem sido objecto de estudo por parte de muitos autores. Klemp e Lilly (1978) sugeriram que o crescimento crucial era a ressonância linear associada à reflexão parcial das ondas gravíticas internas, resultante da variação da estabilidade estática numa atmosfera multicamada. Clark e Peltier (1979) sugeriram um mecanismo de ressonância não linear, em que a reflexão ocorre numa cavidade formada entre um nível crítico ($U=0$) gerado pelas ondas gravíticas quando rompem e a superfície. O ponto crítico do mecanismo de Clark e Peltier (1979) estava relacionado com a falta de uma justificação teórica para o facto de o nível crítico actuar como um reflector perfeito, de modo a produzir interferência construtiva entre o nível crítico e a superfície.

Smith (1980) determinou soluções para escoamentos tridimensionais forçados por orografia e discutiu os efeitos da aproximação hidrostática. Smith (1985) desenvolveu uma teoria hidráulica baseada no modelo de Long (1953) para demonstrar a possibilidade da formação de ventos fortes a jusante de uma zona de estagnação de fluido bem misturado. Esta teoria prevê explicitamente a ocorrência de escoamentos ressonantes para níveis críticos do escoamento de referência localizados em níveis espaçados por um comprimento de onda vertical. Os trabalhos numéricos de Bacmeister e Pierrehumbert (1985) e a experiência de Rottman e Smith (1998) confirmaram o modelo de Smith(1985). O trabalho de Miranda e Valente (1997), no caso tridimensional, mostra a existência de um mecanismo de ressonância qualitativamente diferente, caracterizado por um espaçamento vertical entre níveis críticos ressonantes de meio comprimento de onda, análogo ao das teorias clássicas da ressonância de cordas vibrantes.

Sobre os escoamentos turbulentos na vizinhança de orografia têm sido publicados diversos trabalhos, alguns dos quais constituem aperfeiçoamentos da teoria de Jackson e Hunt (1975) para escoamentos bidimensionais de camada limite sobre colinas médias e pequenas. Os elementos fundamentais deste modelo teórico são:

- a- O escoamento é dividido em duas subcamadas principais; a interna onde a tensão de corte da perturbação da velocidade tem um efeito dominante, e a externa onde as perturbações são essencialmente invíscidas.
- b- A turbulência na subcamada interna é parametrizada com o modelo de comprimento de mistura.
- c- As equações de movimento são linearizadas mediante a decomposição da velocidade média num perfil de referência e uma perturbação.
- d- As equações linearizadas são escritas no espaço dos números de onda usando transformadas de Fourier, onde são resolvidas.
- e- As transformadas de Fourier são invertidas para obter o campo de velocidades.

Hunt et al. (1988a) (HLR) aperfeiçoaram o modelo de Hunt (1975) e Hunt et al. (1988b) (HRB) implementaram nele uma modificação para incorporar os efeitos da estratificação. Belcher et al. (1993), usando uma abordagem similar à de HLR, determinaram o arrasto de forma e Belcher and Wood (1996) incluíram o efeito da estratificação estável no cálculo desta grandeza. Weng (1989), após levar a cabo um estudo comparativo com observações, chegou à conclusão que a solução de HLR sobrestima a perturbação da velocidade junto à superfície, e propôs uma modificação para corrigir este defeito. Por outro lado, Weng et al. (1997) desenvolveram um perfil de velocidade contínuo que permite a propagação das ondas gravíticas para fora da camada limite estável.

Jackson e Hunt Taylor et. Al (1987) fizeram uma revisão dos trabalhos experimentais mais importantes, realizados em condições de estabilidade estática quase neutra. Bradley (1980) realizou medidas sobre uma colina isolada, e verificou uma boa concordância entre os seus resultados.

Coppin et al. (1994) desenvolveram uma importante experiência sobre a orografia de Cooper, na Austrália, estudando atmosferas neutras e estratificadas. Estes autores chegaram à conclusão que nos casos instáveis, neutro e pouco estável, o modelo teórico de Hunt et al. (1988) conseguia descrever bem o escoamento, mas que nos casos moderada e fortemente estáveis, o mesmo sobrestimava os acréscimos de velocidade em relação aos perfis experimentais. O projecto experimental de monte Askervein (Taylor e Teunissen, 1985) foi um projecto ambicioso que proporcionou um conjunto de medidas importantes para o estudo dos escoamentos sobre colinas tridimensionais isoladas.

Castro e Snyder (1982), Carruthers e Choularton (1982), Bowen (1983), Arya et al. debruçaram-se sobre compreensão da dinâmica de dispersão de poluentes, bem como da otimização da localização dos geradores de energia eólica em terreno montanhoso. Britter e tal. (1981) estudaram a influência da rugosidade da superfície da separação características do "acelerar" o factor, ou seja, o aumento máximo da velocidade no topo o monte. Os autores concluíram que a velocidade de perturbação no topo da colina pode ser estimada assumindo uma superposição linear das alterações produzidas pela velocidade das mudanças na elevação e na rugosidade da superfície. Quanto à estrutura turbulenta, Britter et al. (1981) foram os primeiros a correlacionar o campo de flutuação para os efeitos da distorção rápida. Estes autores podem ser considerados um dos pioneiros em tentar explicar o comportamento do campo turbulento sobre as colinas.

Bradley (1980) realizou uma das primeiras campanhas de medição extensiva de campo. Os dados foram apresentados para o campo de velocidade média e componentes turbulentas sobre Black Mountain, localizada no Canadá. Zeman e Jensen (1987) desenvolveram um novo modelo para investigar o campo de escoamentos turbulentos sobre duas colinas bidimensionais. Eles aplicaram a transformação de von Mises para as equações do momento médio, juntamente com um tipo de segunda ordem de encerramento de turbulência. As previsões do modelo foram comparadas com alguns resultados experimentais do projeto Askervein mostrando uma boa concordância. A pressão de perturbação na montanha foi calculada por meio da teoria do fluxo potencial. Os autores focaram a sua atenção sobre as características da turbulência do fluxo de campo sobre colinas.

Uma pesquisa sobre o estado da arte referente à camada limite atmosférica pode ser obtida a partir Kaimal e Finnigan (1994), e Belcher e Hunt (1998). Esses autores apontam a principal limitação das investigações de campo sobre os fluxos separados no lado de sotavento de colinas íngremes: a profundidade de recirculação é geralmente da ordem de altura do monte, que é simplesmente muito grande para ser explorado por torres meteorológicas de campanhas de campo. A partir desta perspectiva, os estudos de túnel de vento ainda tem muito a contribuir para a compreensão do processo de separação na atmosfera.

Em relação aos efeitos de estratificação, experimentos de túnel de vento e por Meroney Cermak (1975) e Ogawa et al. (1985) revelaram as principais características do fenómeno de terreno plano. Mais recentemente, Ohba et al. (2002) realizaram um estudo de túnel de vento da difusão de um gás sobre um monte isolado em atmosferas

neutra, estável e instável. Ross et al. (2004), realizaram estudos numéricos e experimentais, a fim de avaliar o desempenho dos diferentes regimes de fechamento de turbulência na previsão do campo de fluxo ao longo de uma montanha.

Argain et al (2009) introduziu mais uma modificação no modelo analítico (A09) que permite estimar a velocidade de fricção, que por sua vez interfere no cálculo do acréscimo da velocidade (speedup).