

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISES INICIAIS DA ESTRUTURA ATMOSFERICA TURBULENTA SOBRE TERRENOS COMPLEXOS

Mara Nilza Estanislau Reis, mara.nilza@terra.com.br¹
Brenno Rocha de Brito, brennordb@hotmail.com¹
Wender Pereira de Oliveira, wender-7@hotmail.com¹
Luciana Bassi Marinho Pires, lucianapires@sciencefortheworld²

¹ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas), Av. Dom José Gaspar, 500 - Prédio 03 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte/MG - CEP: 30535901

² Science for the World Research Institute, Atlanta, USA

Resumo: As diferentes topografias influenciam fortemente a geração de energia eólica, uma vez que o relevo acidentado influi diretamente na velocidade do vento, gerando perfis de vento peculiares que podem ser aproveitados pelos aerogeradores. Mudanças bruscas na topografia geram uma camada atmosférica adicional conhecida como Camada Limite Interna (CLI) que fica próxima ao solo e dentro da Camada limite atmosférica (CLA). A altura da bolha de recirculação gerada dentro de uma CLI e a turbulência causada dentro dessa bolha gerada a jusante de relevos complexos, tem um papel fundamental na decisão do local a ser instalado a turbina eólica em parques localizados próximos a geometrias complexas, como montanhas, falésias e fiordes. O litoral brasileiro, especialmente a região Nordeste, é caracterizado por possuir grande potencial para geração de energia eólica. O mapa de ventos do Brasil, produzido pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), indica que as maiores velocidades dos ventos se encontram da região litorânea do Rio Grande do Norte até o Amapá e o relevo dominante nessa região são as falésias. Este trabalho apresenta uma análise computacional dos perfis de turbulência da Camada Limite Interna (CLI) formada por vento neutro incidente a 90° em falésias com alturas variando de 10 a 50 metros, que são as alturas características das falésias existentes nas regiões Sul e Nordeste do Brasil, gerados pelo software comercial STAR-CCM+ da CD-Adapco, utilizando a metodologia Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). Os resultados foram avaliados e comparados com dados experimentais disponíveis na literatura. Após a análise dos resultados obtidos nas simulações foi possível visualizar as zonas de recirculação existentes.

Palavras-chave: Energia eólica. Camada limite interna. Turbulência. STAR-CCM+.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia, aliada a obrigação de proteger o meio ambiente, cuja degradação é acentuada pelas formas tradicionais de geração de energia, são fatores que motivaram o aumento do interesse nas chamadas fontes de energia renováveis.

A energia eólica atualmente é vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis conhecidas. As turbinas eólicas, isoladas, em pequenos grupos de quatro ou cinco ou em parques eólicos com cinquenta unidades, já são elementos habituais da paisagem de países como Estados Unidos, Alemanha, Dinamarca, Holanda e Reino Unido.

No Brasil os investimentos para que a energia eólica se expanda estão crescendo, assim como a potência eólica instalada, especialmente nos estados do Nordeste e no Rio Grande do Sul. Tais investimentos são de fundamental importância especialmente no caso brasileiro, onde o potencial de energia eólica é mais intenso de junho a dezembro, meses com menor intensidade de chuva (ANEEL, 2003). Isso coloca o vento como uma possível fonte suplementar à energia gerada por hidrelétricas, principal fonte de energia elétrica do país.

A energia eólica é abundante, renovável, limpa e disponível em diversos lugares, gerada por meio de aerogeradores, nos quais a força do vento é captada por hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico. A quantidade de energia transferida ao gerador é função da densidade do ar, da área coberta pelas pás e da velocidade do vento, sendo o último o fator de maior variabilidade, exigindo-se assim um conhecimento detalhado de seu comportamento.

A análise de ventos é uma importante fase na escolha de um local adequado para a instalação de uma turbina eólica. Os ventos mais fortes, mais constantes e mais persistentes ocorrem a cerca de dez quilômetros da superfície da terra,

porém por diversas limitações existentes atualmente, o espaço com potencial energético encontra-se entre trinta e duzentos metros de altura em relação ao solo (CRESESB, 2001). Nessa altura o vento é diretamente afetado pela fricção na superfície, o que provoca alterações em seu perfil de velocidade.

Medições realizadas por estações meteorológicas munidas de aparelhos convencionais podem ser suficientes para a aviação, previsão do tempo e agricultura. No entanto, uma avaliação correta do potencial eólico, tendo em vista a produção de energia elétrica, tem de se basear em medidas de vento efetuadas especificamente para esse efeito. Tais medidas são possíveis graças aos avanços da micrometeorologia, ramo da meteorologia que estuda eventos em áreas inferiores a um quilometro quadrado e com duração inferior à uma hora.

Estudos micrometeorológicos são de fundamental importância em diversas aplicações, que vão desde correções de rota em lançamentos de foguetes até o aprimoramento do conforto térmico em edificações. Tais estudos se tornam ainda mais relevantes em áreas onde o relevo causa alterações consideráveis nos campos de vento, como é o caso das falésias, escarpas na vertical delimitando o encontro da terra com o mar, que são encontradas em diversos locais do mundo e, no Brasil estão presentes no litoral do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e no Rio Grande do Norte (ANEEL, 2003).

As condições micrometeorológicas junto às falésias são propícias a gerar turbulências, que para serem estudadas requerem medições específicas e estimativas. Portanto se faz necessário entender os perfis verticais, a velocidade, a intensidade e o espectro da turbulência dos ventos, para conhecer a altura da bolha de recirculação gerada pelas falésias e a turbulência existente no seu interior. Estes aspectos são de fundamental importância para a instalação de usinas eólicas mais eficientes.

Os dados relativos à velocidade do vento são complexos, a intensidade do vento é influenciada pelo relevo e rugosidade do solo da região. Uma vez que este nível de detalhamento não está presente no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, são requeridos estudos detalhados para a instalação dos aerogeradores. Portanto, estudos que levam em consideração a micrometeorologia e fazem simulações para entender os perfis de velocidade dos ventos em uma localidade específica para o melhor aproveitamento do potencial eólico existente são facilmente justificáveis.

Estudando como as formas complexas de relevo influenciam os perfis de velocidade e a formação de turbulência, todo o potencial eólico brasileiro poderá ser explorado de forma mais eficiente, seja aproveitando o regime favorável de ventos do litoral, seja aproveitando as maiores altitudes e relevo complexo do interior do país, como é o caso do estado de Minas Gerais.

As simulações que levam em conta as zonas de recirculação do vento criadas pelo relevo acidentado do estado e o regime do vento nas altitudes mais elevadas, poderão ser decisivos no estudo da viabilidade da instalação de aerogeradores para suprir demandas localizadas ou para compor o Sistema Interligado Nacional (SIN).

2. Camada limite

A superfície terrestre está no limite inferior do domínio atmosférico. Processos de transporte que ocorrem entre 100 e 3000 m de altitude da atmosfera modificam este limite, criando o que é chamada de camada limite atmosférica (CLA) (MOREIRA, 2012).

A Camada Limite Atmosférica pode ser definida como a região da atmosfera que é diretamente afetada pelas propriedades da superfície terrestre (fricção, aquecimento e resfriamento), que geram turbulência e podem assim manter essa região misturada até certa altura, onde há uma inversão térmica que limita a troca de ar (GARRATT, 1992). Para Moreira (2012) a CLA, também conhecida como camada limite planetária (CLP), é uma fina camada adjacente à superfície da terra em que o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds, onde a turbulência que, além de ser uma de suas características mais fortes e é utilizada para defini-la, gera transporte de energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera.

A turbulência na camada limite atmosférica é aproximadamente homogênea e horizontal, e é localmente isotrópica em escalas suficientemente pequenas, tais que os efeitos gerados pela superfície da atmosfera são desprezíveis. A mistura do fluido pela turbulência se dá através de vórtices, e o tamanho típico dos vórtices de turbulência na atmosfera varia de 10^{-3} a 10^3 m (GARRATT, 1992).

A CLA é afetada diretamente pelas características topográficas e orográficas do terreno. Sua espessura varia em função do tempo e do espaço, e pode chegar a alguns metros e quilômetros e está relacionada à variação de temperatura durante o dia. No entanto, a radiação do solo é a maior responsável do ar na CLA e em dias mais quentes geram trocas turbulentas mais intensas de energia, massa e quantidade de movimento (MOREIRA, 2012).

A estrutura da CLA é influenciada diariamente pelo aquecimento e resfriamento da terra e pela presença de nuvens. Assim, é possível subdividir a camada limite atmosférica em Camada Limite Convectiva (CLC) e Camada Limite Estável (CLE).

A CLC ocorre quando forte aquecimento da superfície (devido ao sol) produz instabilidade térmica ou convecção na forma de térmicas e de plumas, e quando convecção invertida é gerada por resfriamento radiativo de topo de nuvens (PIRES, 2009).

Sendo considerada a parte diurna da camada limite atmosférica, a camada limite convectiva apresenta uma turbulência mais forte devido às forças de empuxo geradas pelo aquecimento da superfície da Terra (FEDOROVICHET, 2004).

Ela pode ser dividida em três camadas: Camada Superficial (CS), Camada de Mistura (CM) e Região de Entranhamento (RE) (FREIRE, 2012).

A camada superficial consiste em uma camada de cerca de 10% o tamanho da CLA e as suas características são relacionadas com a estrutura do vento, que é alterada pela natureza da superfície da terra e pelo gradiente horizontal de temperatura. É nela onde o cisalhamento exerce maior influência (MOREIRA, 2012).

A camada de mistura consiste em uma camada de aproximadamente 3 km (podendo variar em função da hora e do local) onde as tensões cisalhantes são variáveis e a estrutura do vento é forçada pela fricção, gradientes de pressão e rotação da terra (MOREIRA, 2012).

A concentração de escalares é aproximadamente constante. Por último, a RE é a região de transição entre a CLA e a Atmosfera Livre (AL), região da atmosfera acima da CLA onde a turbulência deixa de ser significativa (FREIRE, 2012).

Durante a noite ou em invernos rigorosos uma Camada Limite Estável (CLE), ou Camada Limite Noturna (CLN) se forma devido ao radiativo da superfície terrestre, caracterizada por um perfil estável de temperatura potencial (FREIRE, 2012).

A CLA é composta por uma região interna e uma região externa. Na região externa, o fluxo mostra uma pequena dependência com a natureza da superfície e, na atmosfera, a força de Coriolis devida à rotação da Terra também é importante. O fluxo na camada interna (também chamada de parede ou camada de superfície) é principalmente dependente das características da superfície e é pouco afetado pela rotação. A transição entre as camadas interna e a externa não é abrupta, mas é caracterizada por uma região sobreposta. A influência da superfície é diretamente sentida na subcamada interfacial, que é a camada de ar acima dos elementos rugosos, como sejam as superfícies do continente ou do oceano (PIRES, 2009).

A Camada Limite Interna (CLI) se forma na parte inferior da Camada Limite Atmosférica (CLA) e é uma importante consequência meteorológica dos movimentos do ar, através das mudanças das condições da superfície. Ela geralmente se desenvolve como resultado a uma resposta do fluxo atmosférico a uma descontinuidade na superfície seja uma mudança em degrau, rugosidade (mecânica), temperatura ou umidade (térmica) (GARRATT, 1992).

O crescimento da altura da CLI, (δ_{CLI}), sob condições de estabilidade neutra, sem degrau topográfico na superfície, segue uma lei de potência, conforme descrito na Eq. (1), do tipo inicialmente proposto por Elliot (1958):

$$\delta_{CLI} = ax^b \quad (1)$$

Onde:

x é a distância do ponto de descontinuidade (m);

a e b são constantes que dependem da rugosidade da superfície.

Valores do coeficiente (a) estão entre 0,35 e 0,75 e do coeficiente (b) variam de 0,1 (superfície lisa) a 0,4 (áreas urbanas), sendo válidas até 1 ou 2 km da costa, quando δ_{CLI} se torna constante (KALLSTRAND; SMEDMAN, 1997).

Entretanto, Pires (2009), define a δ_{CLI} como a altura em que a derivada vertical (z) da vorticidade (ω) torna-se praticamente nula, o que corresponde a um perfil praticamente constante, e velocidade variando quase linearmente com a altura, como é o caso da CLA acima da CLI.

Segundo Moreira (2012), é na camada limite interna onde todos os efeitos de perturbação acontecem devido às mudanças de rugosidade superficial.

Condições de superfície tais como a rugosidade e forma do terreno influenciam os escoamentos atmosféricos. Quando o terreno é íngreme origina-se uma aceleração na velocidade do escoamento, devido à compressão das camadas de estratificação, levando a velocidades mais elevadas. Em casos mais extremos, quando as camadas de estratificação são muito comprimidas, o fluido se desloca para o lado dos obstáculos, ao invés de ir para cima do topo. No lado a jusante dos obstáculos, o escoamento se expande em camadas de estratificação, causando uma desaceleração do escoamento, que reduz a sua velocidade. Em terrenos montanhosos suaves é suficientemente seguro afirmar que o escoamento, como um todo, é desacelerado. Dimensões horizontais típicas de colinas nestes terrenos são de alguns quilômetros ou menos

Em seu estudo, Ludwig (2011) afirma que a faixa de interesse para os estudos sobre conversão de energia eólica é de 50 a 150m. Observa-se que o perfil se comporta como uma função logarítmica dada pela Eq. (2):

$$V = \frac{u^*}{k} \left[\ln \frac{h}{z_0} \right] \quad (2)$$

Onde:

V é a velocidade do vento na altura h em relação ao solo (m/s);

z_0 é o fator de rugosidade do terreno;

u^* é a velocidade de atrito (m/s);

k é a constante adimensional de Von Karman, usualmente adotada como 0,4.

A velocidade de atrito u^* representa a tensão de cisalhamento da camada limite junto ao solo e pode ser descrita pela Eq. (3):

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} \quad (3)$$

Onde:

τ_s é a tensão de cisalhamento da camada limite junto ao solo (N/m^2);

ρ é a massa específica do ar (kg/m^3).

2.1. Equações governantes

As equações governantes do problema para o escoamento são as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento e do gás perfeito.

Para este estudo as equações de energia não foram consideradas, uma vez que, a variação de temperatura pode ser desprezada, devido à alta velocidade do vento no local onde os dados foram coletados. No Panorama do Potencial Eólico no Brasil, referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50m acima da superfície para cinco condições topográficas distintas: zona costeira que são áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; campo aberto que são áreas planas de pastagens, plantações e /ou vegetação baixa sem muitas árvores altas; mata que são áreas de vegetação nativa com arbustos e árvores altas, mas de baixa densidade, tipo de terreno que causa mais obstruções ao fluxo de vento; morro que são áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto; e montanha que são áreas de relevo complexo, com altas montanhas (ANEEL, 2003).

A mudança de altitude para 1.000 m acima do nível do mar acarreta uma diminuição de 9% na densidade média de energia e a diminuição de temperatura para 15°C provoca um aumento de cerca de 2% na densidade de energia média (ANEEL, 2003).

3. METODOLOGIA

Para validar os dados experimentais, coletados, tratados e processados por um modelo numérico criado em estudos anteriores, que reproduziram os perfis de vento da região de Alcântara no estado do Maranhão e definiram as espessuras e perfis das camadas limite internas geradas pelas falésias da região, foi usado o pacote computacional comercial STAR-CCM+ da CD-Adapco. Os resultados gerados pelo pacote computacional foram comparados com os resultados do modelo numérico e ainda com os dados experimentais medidos in loco.

Após a inserção de dados, correspondentes aos ventos presentes na falésia próxima ao Centro de Lançamento de Alcântara, no pacote computacional será possível confrontar os dados disponíveis na literatura com os dados obtidos pelo STAR-CCM+, validando assim os perfis de velocidade dos ventos da região. É importante salientar, que o Centro de Lançamento de Alcântara foi escolhido, devido a disponibilidade de dados coletados em trabalhos anteriores para o estudo da influência da alteração dos perfis de vento no desvio de rota ocasionados durante o lançamento de foguetes e localizado a trinta e dois quilômetros de São Luís capital do estado do Maranhão.

A partir da validação dos resultados e dos estudos realizados ao longo deste trabalho, será possível compreender como a falésia cria turbulência no perfil de velocidade dos ventos da região, possibilitando a instalação de usinas eólicas nos locais onde serão mais eficientes. Alterando ainda as condições de entrada do modelo, é possível simular os perfis de ventos em falésias ou em qualquer forma complexa de relevo, com diferentes alturas, graus de inclinação e localização geográfica, possibilitando o estudo do potencial eólico em outras localidades.

3.1 Pré-processamento

O pré-processamento consiste na entrada do problema de escoamento na interface do programa CFD, para isso as atividades são divididas em: definição da geometria, região de interesse, geração de malha, seleção de fenômenos físicos e químicos a serem modelados, definição das propriedades do fluido, especificação das condições de contorno e os testes da malha.

A definição das fronteiras físicas é a representação da geometria das superfícies envolvidas, o modelo desenvolvido neste trabalho é a representação de uma seção da falésia de Alcântara com cinquenta metros de altura e inclinação em relação ao solo de noventa graus.

Para reduzir o número de elementos e diminuir o tempo computacional, o modelo foi desenhado numa escala de 100:1, a área de controle é de três metros de altura por seis metros de comprimento, contendo uma falésia de cinquenta metros de altura com duzentos metros de solo.

Para a simulação do comprimento do oceano e do comprimento depois do degrau, e após diversos testes concluiu-se que a escala utilizada foi suficiente para desenvolver o vento e as zonas de recirculação induzidas pelo degrau.

Segundo Reuter 2004, a altura máxima da Camada Limite Oceânica (CLO) na região de Alcântara é de trezentos metros, o que justifica a escolha da altura da área de controle.

Antes de criar a malha, as regiões onde as variações das velocidades do escoamento são mais significativas foram definidas. Por se tratar de uma falésia, as regiões que sofrem maiores influências são a declividade e a área posterior à mesma, onde forma a camada limite interna, a outra região está localizada entre a altura zero e a altura de cento e cinquenta metros em relação ao solo. As regiões foram delimitadas por planos que serviram de base para um posterior refino da malha.

A partir das áreas de maior interesse, a malha foi gerada com a discretização do domínio contínuo em uma malha de elementos discretos, ou seja, a área contida entre a superfície do oceano, a parede da falésia, o solo e o contorno da área de controle foi dividida em diversas células ou nós, que são pequenas áreas de controle em representações de duas dimensões ou volumes de controle em representações tridimensionais.

Por se tratar de uma geometria simples representada em duas dimensões optou-se por criar uma malha estruturada, constituída por células planares com quatro arestas e numeradas com os índices i e j que correspondem ao respectivo sistema de coordenadas adotado.

A solução adotada foi a utilização de uma malha não uniforme, permitindo aliar a precisão nas áreas de interesse à velocidade de processamento. Para isso, criou-se uma malha contendo células menores onde variações maiores ocorrem e células maiores onde as variações são menos intensas. Este é um processo demorado e meticuloso, que ocorre de maneira empírica.

Inicialmente foi criada uma malha extremamente densa, limitada pela capacidade computacional disponível e com valores muito próximos dos esperados. Em seguida foi aumentando os tamanhos dos elementos de malha nas regiões de menor interesse, e analisando a influência na precisão dos resultados, determinando assim a maior dimensão do elemento que mantém o resultado esperado, restando apenas a região de maior interesse com grande refinamento. Assim garantiu-se que o nível de resolução necessário fosse atingido sem extrapolar a capacidade do hardware e utilizando-se um intervalo de tempo plausível.

Um estudo de sensibilidade de malha foi realizado para avaliar todos os seus principais parâmetros, como a razão de áreas, que defini a razão entre a área de um elemento pela área dos seus elementos vizinhos. Na superfície inferior do domínio, onde os gradientes de velocidade são maiores e sua variação é acentuada, camadas finas de elementos prismáticos (prism layer) na direção vertical e substancialmente maiores nas direções longitudinais são empregadas.

O uso destes elementos permite que os gradientes próximos da parede sejam captados sem que seja necessário um número exagerado de elementos. Um controle superficial da aresta do elemento é usado para concentrar elementos próximos à superfície inferior. Vários testes de malha foram realizados com o intuito de minimizar os erros oriundos de malhas grosseiras.

A malha final é composta por 631195 elementos, tendo 1261147 faces e 633823 vértices e a “prism layer” é composta por vinte camadas tendo um fator de redução de 0,5 que garante uma transição uniforme para os elementos de malha convencionais.

Um escoamento em regime permanente e turbulento, onde a velocidade do vento é condição de entrada e dado de saída foi simulado. Devido à constância das temperaturas na região, com pouca variação entre o período da noite e do dia, o modelo foi considerado isotérmico.

O ar possui todas as suas propriedades pré-definidas na biblioteca do STAR-CCM+. A viscosidade cinemática foi alterada para o valor de $1,5 \times 10^{-5}$ (m^2/s) de acordo com as características da região.

A especificação das condições de contorno apropriada é a última tarefa da etapa do pré-processamento. Durante esta etapa, os elementos da malha são associados ao contorno do domínio, e a condição de não deslizamento é imposta, logo a velocidade próxima aos contornos do relevo será igual à zero. Na saída adotou-se, como condição de contorno, o gradiente de pressão nulo.

Com base nos dados experimentais foi determinado o perfil de velocidade do vento na região de Alcântara, importado como condição de entrada dos ventos no modelo. O perfil de velocidade é descrito pela Eq. (4):

$$U_{z/inlet} = U_{ref} \left(\frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \right) \quad (4)$$

Onde:

$U_{z/inlet}$ é a velocidade de entrada em determinada altura em m/s;

U_{ref} é a velocidade na altura de referência em m/s;

z é a altura em que se deseja conhecer $U_{z/inlet}$ em m;

z_0 é a altura em que foi medida a velocidade de referência em m;

z_{ref} é 10^{-3} metros para superfícies como o mar calmo.

A velocidade de entrada do vento para diferentes alturas foi calculada e o perfil de vento médio da região foi traçado conforme mostra no Fig. 1:

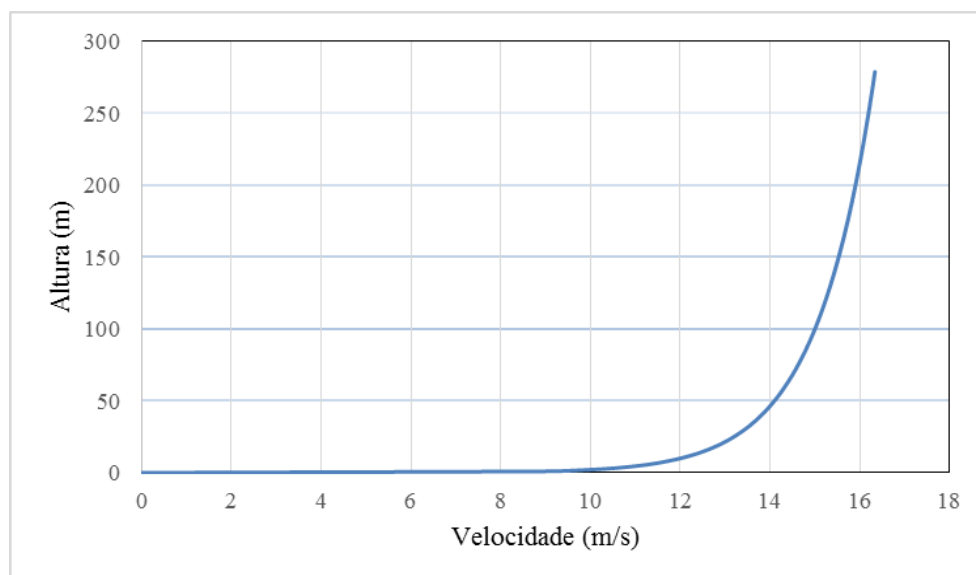


Figura1. Perfil de velocidade do vento.

Algumas simulações foram feitas aumentando o comprimento da superfície oceânica, a fim de garantir o desenvolvimento do perfil de velocidade que melhor se aproximava dos perfis de velocidade da brisa marítima na região de Alcântara. Entretanto, apenas o crescimento do modelo não foi suficiente para tal, sendo necessário um estudo para traçar a equação do perfil de velocidade do vento da região.

A Eq. (4) tem como variáveis a velocidade de referência, a velocidade de entrada, a altura de referência, o comprimento de rugosidade aerodinâmica e a altura de medição. Com os dados disponíveis na literatura, adotou-se o valor de 0,001 metros para o comprimento da rugosidade aerodinâmica sobre o oceano, 10 metros como a altura de referência, e a velocidade de referência 3 m/s, por se tratar de um valor médio entre o período diurno e noturno e entre as diferentes estações do ano (PIRES, 2009).

A partir da Eq. (4) foi criada uma matriz com diferentes valores de velocidade para diferentes alturas, sendo então utilizada como condição de entrada do modelo, assim as velocidades de entrada foram muito próximas às velocidades reais, o que possibilitou a formação da camada limite interna com alturas próximas às aferidas no local possuindo as mesmas zonas de recirculação na parte interna.

A malha gerada foi testada para garantir resultados coerentes com a situação real. A malha criada na superfície da falésia é de baixa complexidade, logo o teste de convergência foi viável. Durante o teste realizado automaticamente pelo software, a ordem de grandeza da malha é elevada em todas as direções de interesse e as simulações são repetidas até que não haja diferença significativa entre os resultados, obtendo assim células suficientemente pequenas onde acontecem a maior parte dos fenômenos e células maiores onde as influências dos fenômenos estudados são menores.

O teste de malha manual foi realizado inicialmente variando-se o tamanho base da malha e mantendo-se o número de camadas prismáticas constante. Observou-se que à medida que o tamanho base aumentava o tempo para se gerar a malha, o número de células e o número de interações para que todas as equações tivessem resíduos abaixo de 10^{-4} também aumentava.

Em seguida variou-se o número de camadas prismáticas e manteve-se constante o tamanho base da malha. Observou-se que à medida em que aumentava-se o número de camadas prismáticas junto à parede do domínio o número de células, o tempo para se gerar a malha também aumentava. Em contrapartida, o número de interações diminuía. Como pode ser evidenciado na Tab.1 abaixo:

Tabela 1. Teste de Malha.

Região de Refinamento	Base Size (m)	Prisma Layer	Resíduo (Interações)	Tempo (s)	Células
Não	1	2	150	31,925	2035
Não	0.5	2	425	50,352	7956
Não	0.3	2	510	65,903	12874
Não	0.1	2	715	163,767	16437
Não	0.01	2	6100	5722,542	269105
Não	0.01	10	3550	3443,974	275521
Não	0.01	20	3000	13099,779	286041
Sim	0.01	20	7000	149800,126	845085

Por se tratar de um escoamento turbulento, o modelo de simulação com média de Reynolds RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) foi selecionado no software STAR-CCM+ para tratar de escoamentos médios, além de sua capacidade em convergir os resultados, especialmente se comparado ao modelo de técnica direta, DNS (Direct Numeric Simulation), ou até mesmo ao modelo de Simulação das Grandes Escalas (SGE) ou Large Eddy Simulation (LES).

Para definir o melhor modelo de turbulência vários testes foram feitos com três diferentes parâmetros para a altura da primeira camada prismática, sendo eles: $y^+ \approx 5$, $y^+ \approx 1$, $y^+ \approx 0,1$. O modelo $k-\omega$ apresentou melhores resultados em todas as situações, principalmente nas regiões mais próximas das paredes, onde tradicionalmente são menos confiáveis. O modelo Realizable $k-\epsilon$ foi testado, apresentando resíduos muito altos e não convergindo.

3.2 Pós-processamento

Para análise dos dados e posterior validação, foram montadas cenas usando o recurso “Scenes” do software, que mostram a malha, a representação escalar e a representação vetorial da velocidade em escalas de cor, sendo possível analisar a formação da camada limite interna e o comportamento do escoamento. O gráfico com os resíduos da simulação e das velocidades em determinados pontos são apresentados.

4. RESULTADOS

Após todas as fases de criação do modelo numérico no software STAR-CCM+, iniciou-se a simulação, que primeiramente tinham como condição de entrada ventos a velocidades constantes. Constatou-se então que o vento não se desenvolvia ao longo do comprimento do oceano, chegando à falésia praticamente constante como pode ser visto na Fig. 2 abaixo, e a camada limite gerada possuía alturas muito maiores do que as encontradas nas medições experimentais.

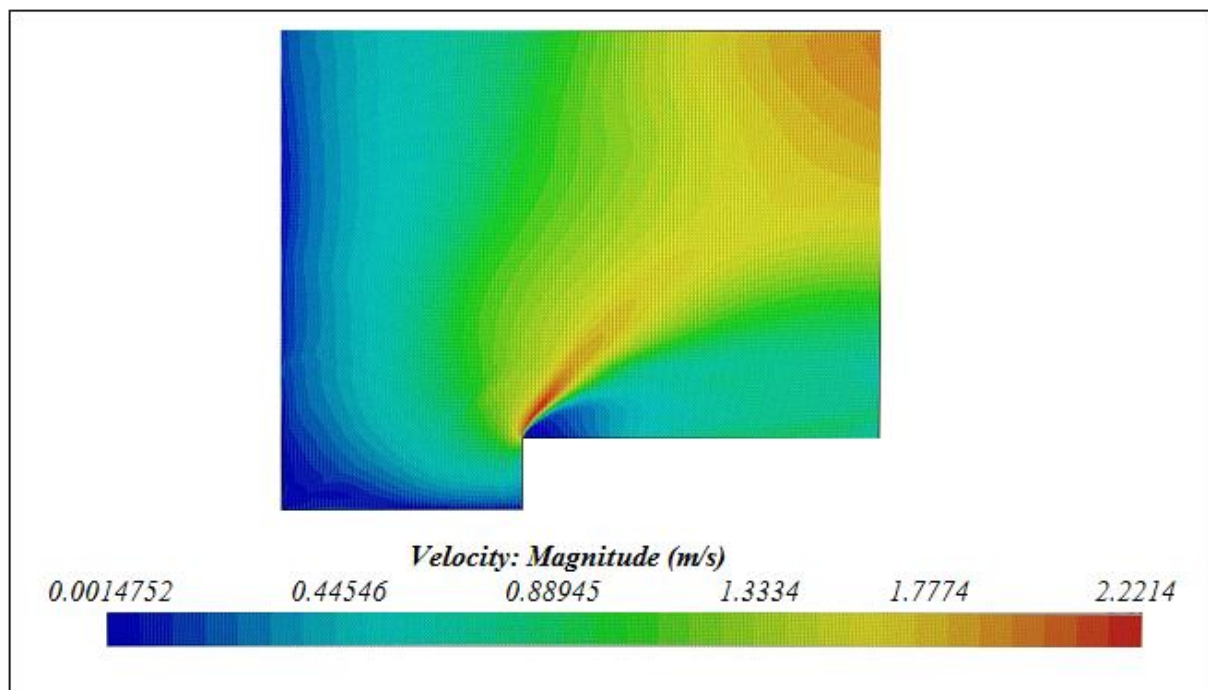


Figura 2. Resultados com ventos constantes.

O desenvolvimento da camada limite e das zonas de recirculação à medida que a velocidade aumenta pode ser observado na Fig. 3, para o perfil de velocidade gerado para uma velocidade de referência de 3m/s.

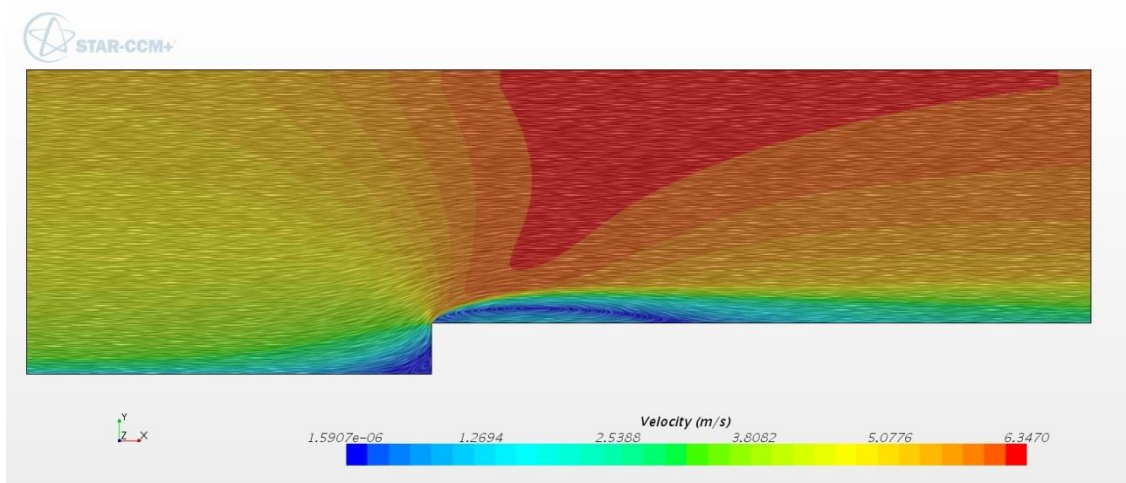


Figura 3. Formação da Camada Limite.

Para as velocidades de referência estudadas observou-se, que a altura da camada limite interna diminuiu à medida que a velocidade aumentou.

No modelo com maior superfície que representa o oceano, as alturas da camada limite estavam condizentes com os resultados experimentais e foi possível perceber que as velocidades escalares possuíam a mesma ordem de grandeza encontrada em simulações numéricas disponíveis na literatura.

A solução encontrada para forçar o desenvolvimento da camada limite e consequentemente a unificação da zona de recirculação foi aumentar o número de iterações inicialmente quinhentos para duas mil e quinhentas iterações, fazendo com que o resultado convergisse e se aproximasse consideravelmente dos resultados encontrados na literatura como pode ser evidenciado na Fig. 4.

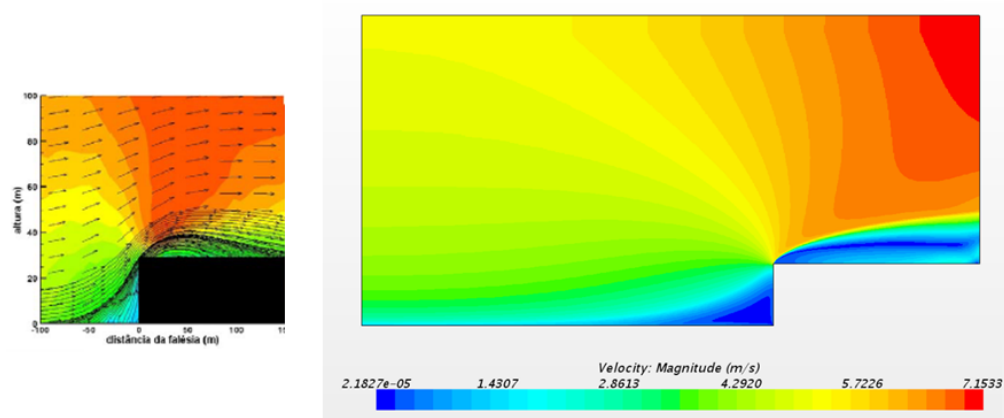


Figura 4. Comparativo entre resultado esperado e obtido.

Apesar do estudo inicial apresentar o modelo de turbulência $k-\epsilon$ como o mais indicado uma vez que, a simulação trata de um escoamento externo onde as interações com as paredes são menos relevantes do que o escoamento médio, o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, que foi visto com grande robustez para resolver as equações perto das superfícies, representando corretamente os efeitos de borda e ainda não perdeu a resolução ao calcular os escoamentos médios, ou seja, distantes da parede, representando assim com grande precisão os fenômenos que ocorrem dentro da camada limite.

5. CONCLUSÃO

A energia eólica é uma fonte de energia renovável já explorada em diversos países no mundo, que tem através dos aero geradores uma fonte de energia confiável, barata e limpa. Tal tecnologia pode e deve ser difundida em maior escala no Brasil, uma vez que temos diversas regiões já mapeadas com excelente potencial eólico, como é o caso do litoral do Nordeste. Os regimes de vento em território brasileiro se intensificam nos meses em que o índice pluviométrico é menor, e os níveis das barragens das hidrelétricas, principal fonte de energia elétrica nacional, estão nos níveis mais baixos, favorecendo assim a implantação de parques eólicos como fonte complementar de energia.

Aliado ao regime dos ventos favoráveis existe em nosso país diversas regiões com relevo acidentado, como é o caso da região de Alcântara no estado do Maranhão que possui falésias que criam alterações nas velocidades dos ventos gerando turbulência. Tais turbulências acontecem dentro de uma região específica delimitada pela camada limite interna.

O modelo hidrodinâmico criado neste trabalho com o objetivo de simular os campos de velocidade e direção dos ventos para uma camada limite atmosférica bem comportada é eficiente para prever a velocidade e direção do vento em condições de regime permanente e com o número de Reynolds inferior a $3,0 \times 10^6$.

A altura das camadas limite interna visualizada no modelo são muito próximas às alturas obtidas por programas numéricos anteriores disponíveis na literatura, entretanto este modelo apresenta algumas restrições que limitam sua utilização para uma camada limite atmosférica instável. As principais restrições são impostas por limitações computacionais, pelos efeitos térmicos e transientes que foram desconsiderados neste trabalho.

Para que sirva de base para estudos de instalação de novos aerogeradores em locais mais eficientes o estudo deve ser continuado, implementando no modelo as rugosidades do oceano e da superfície, e fazendo a simulação em 3D, para isto será necessário modelar o relevo da região a fim de poder gerar resultados mais confiáveis.

Em uma próxima fase, os efeitos térmicos devem ser considerados, o que permitirá que o modelo seja utilizado em diferentes regiões que possuam o relevo acidentado, como é o caso de Minas Gerais, e não tenham uma brisa oceânica constante e praticamente uniforme como acontece na região de Alcântara.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimento a FAPEMIG - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais pela ajuda financeira e o incentivo para a publicação deste artigo e a empresa Cd-Adapco.

7. REFERÊNCIAS

- ALVES, J. J. Análise regional de energia eólica no Brasil. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, 2009. 165-188.
- ANEEL. Energia Eólica. Brasília, Brasil, 2003.
- CRESEB. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília, Brasil, 2001.
- FEDOROVICH, E., ROTUNNO, R., & STEVENS, B. Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology. Cambridge University Press, 2004.
- FREIRE, Átila. P. Teoria de Camada Limite. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- FREIRE, Livia. S. Teorias de Camada Limite Atmosférica: modelo de crescimento, fluxo de entranhamento e análise espectral. Curitiba, Paraná, Brasil, 2012
- GARRATT, J. R. The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge, 1992.
- LUDWIG, Daniel. E. Análise Numérica de influência de fatores atmosféricos na esteira aerodinâmica de turbinas eólicas. Porto Alegre, Brasil, 2011.
- MOREIRA, Gilberto. A. Desenvolvimento De Modelos De Camada Limite Atmosférica Aplicados A Micro-Regiões. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2012.
- Neto, Aristeu. d. Notas de Aula. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2014.
- PIRES, Luciana. B. Estudo da Camada Limite Interna desenvolvida em falésias com aplicação para o Centro de Lançamento de Alcântara. São José dos Campos, Brasil, 2009.
- PRYOR, S. C. Assessing climate change impacts on the near-term stability of the wind energy resource over the United States. PNAS, 2011.
- KALLSTRAND, B., SMEDMAN, A. S. A case study of the near-neutral coastal internal boundary-layer growth: Aircraft measurements compared with different model estimates, 1997.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

INITIAL ANALYSIS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE STRUCTURE ON COMPLEX TOPOGRAPHIES

Mara Nilza Estanislau Reis, maranilza@terra.com.br¹

Brenno Rocha de Brito, brennordb@hotmail.com¹

Wender Pereira de Oliveira, wender-7@hotmail.com¹

Luciana Bassi Marinho Pires, lucianapires@sciencefortheworld²

¹ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas), Av. Dom José Gaspar, 500 - Prédio 03 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte/MG - CEP: 30535901

² Science for the World Research Institute, Atlanta, USA

Abstract. *The different topographies strongly influence the wind power generation, since the rugged terrain is able to directly change the wind speed, generating unique wind profiles that can be harnessed by wind turbines. Sudden changes in topography generate an additional atmospheric layer known as Internal Limit Layer, which is close to the ground and within the Atmospheric Boundary Layer. The height of the recirculation bubble generated within an Internal Limit Layer and turbulence inside this bubble generated downstream of complex embossing has a key role in local decision of where the wind turbine should be installed in parks near complex geometries, such as mountains, cliffs and fjords. The Brazilian coast, especially the Northeast, is characterized by having great potential for wind power generation. The map of winds in Brazil, produced by the Brazilian Wind Energy Center indicates that the highest wind speeds are at the coastal region of Rio Grande do Norte to the Amapá and the dominant topography in this region are the cliffs. This paper presents a computational analysis of Internal Limit Layer's turbulence profiles formed by neutral wind incident at 90° on cliffs with heights ranging from 10 to 50 meters, which are the existing cliff's usual heights in the South and Northeast Brazil, generated by commercial software STAR-CCM+ CD-adapco, using the methodology Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). The results were evaluated and compared with experimental data available in literature. After analyzing the results obtained in the simulations, it was possible to visualize accurately the existing recirculation zones.*

Keywords: *Eolic energy. Internal Limit Layer. Turbulence. STAR-CCM+.*