

INTRODUÇÃO DO ESTUDO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

C.A.M. do Nascimento, S.L.S. Pinto – CEMIG e R.M.Valle, M.A. Martins, J.A. de Abreu e W.F. Chagas - UFMG

Resumo-Esse trabalho científico tem o objetivo explicitar as ações e a ferramenta computacional implementada pela parceria entre a Cemig e UFMG através de um projeto P&D Aneel/Cemig – 063, que foi motivado principalmente pelos últimos acidentes com queda de estruturas de linhas de transmissão na Cemig. Devido a esses acidentes foram reativados os estudos e pesquisas para verificar as características atuais dos ventos. Dessa forma, foi introduzida uma nova ferramenta computacional para análise técnica da velocidade e direção do vento através do estudo teórico e experimental da camada limite atmosférica do vento. Os resultados e conclusões experimentais obtidos em três anos de projeto em algumas regiões de Minas Gerais são apresentados neste trabalho.

Palavras-chave— Análise numérica, Camada Limite Atmosférica, Linhas Aéreas de Transmissão, Projeto Estrutural de Linhas e Dados Climatológicos.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, a modelagem da velocidade do vento têm sido cada vez mais pesquisada e explorada em projeto de linhas aéreas de transmissão pela comunidade técnica e científica do setor elétrico, com o objetivo de melhorar o entendimento físico da correlação dinâmica e temporal entre a velocidade do vento e as várias áreas de aplicações em linhas aéreas, tais como: projeto estrutural, coordenação de isolamento, ampacidade, projeto civil das fundações, projeto eletromecânico, etc. Nesse contexto, surge a necessidade de melhorar as análises de confiabilidade sobre a principal variável climatológica que é a velocidade do vento. Isto se tornou uma realidade através da evolução da modelagem matemática e computacional da camada limite atmosférica do vento. A Cemig atua em duas frentes, uma de curto prazo que envolveu a aquisição de estruturas de emergência, associada a um plano estratégico de contingência através de treinamento técnico para atuação integrada das equipes de projeto, construção, operação e manutenção. A outra frente de trabalho, a científica, está sendo desenvolvida através da

parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Dessa parceria surgiu um projeto Aneel P&D que teve como principal objetivo melhorar a confiabilidade do projeto mecânico de linhas aéreas. Dessa forma, é possível verificar de forma inédita e simultânea os esforços mecânicos em uma estrutura de linha e associá-los ao estudo da camada limite atmosférica-CLA, para poder verificar se um projeto específico de linha aérea estaria adequado para às condições climáticas para as quais foi concebido, ou ainda, conhecer uma nova realidade de campo para definir novos critérios de dimensionamento para projeto. Em pesquisas bibliográficas foi encontrado um projeto de grande relevância tecnológica [8] em fase avançado de desenvolvimento sobre a CLA na área de meteorologia. Pesquisas com a correlação dos esforços resultantes em estruturas de linhas e a CLA ainda são de caráter inovador. Os resultados obtidos até o momento via modelagem numérica da CLA são animadores porque foram validados com dados experimentais disponíveis na literatura e com dados experimentais de velocidade e direção de vento, obtidos em regiões de interesse em Minas Gerais.

II. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A CLA pode ser definida como sendo uma fina camada atmosférica adjacente à superfície terrestre (até 2 km de altura), em que o escoamento do vento apresenta um elevado número de Reynolds. Esse escoamento ocorre em diferentes escalas, onde cada escala, descrita em termos de domínio computacional utiliza modelos distintos. Esses modelos utilizam as mesmas equações constitutivas gerais (4), apresentando diferenças apenas nas simplificações dos termos fonte, dependendo do domínio computacional, estratificação térmica e de outros fatores que se desejam incluir no modelo. As equações que regem estes escoamentos geofísicos são basicamente as equações de continuidade, de conservação de quantidade de movimento, de conservação de energia e de conservação da espécie química, obtendo-se a partir da solução numérica destas equações os campos de temperatura, pressão, velocidade e direção do vento em qualquer região desejada. O estudo da CLA consiste, de fato, no estudo da turbulência atmosférica e dos fatores associados, como fluxo de calor provenientes do solo, da irradiação solar, das fontes de poluição térmica, das mudanças

Este trabalho foi apoiado financeiramente pela Aneel-Cemig e contou com o apoio técnico e científico da Escola de Engenharia da UFMG, Dpto de Engenharia Mecânica.

C. A. M. Do Nascimento(caxandre@cemig.com.br) e S.L.S. Pinto trabalham na Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão – ER/LT da CEMIG.

R.M.Valle (ramon@demec.ufmg.br), M.A. Martins, J.A. de Abreu e W.F. Chagas trabalham na EEUFMG.

topográficas, resultantes da ação do homem sobre o ambiente, podendo ser incluídos todos estes fatores no modelo. Os modelos para simulação dos campos de velocidade de vento são classificados em três classes: modelos de circulação global, modelos de predição de climas e modelos de mesoescalas (4). Os modelos de circulação global utilizam domínios entre 200 e 500 km e são utilizados para analisar os campos de vento sobre a superfície terrestre. Os modelos de predição de climas utilizam domínios entre 50 e 100 km e são utilizados para resolver estruturas de frentes climáticas. Os modelos de mesoescalas utilizam domínios típicos entre 2 a 50 km e são empregados no estudo dos campos de velocidade de vento sobre topologias (topografias). Esses modelos utilizam as mesmas equações constitutivas gerais com mais ou menos simplificações nos seus termos fonte. Por exemplo, os modelos de mesoescalas usualmente desprezam os efeitos da rotação da terra no escoamento do vento. De acordo com Alberton e Parlange [2], um domínio típico para a simulação de escoamentos atmosféricos deve ser maior que 6 km nas direções x e y, respectivamente. O contorno superior do domínio deve ser prescrito acima da camada limite atmosférica, ou seja, a uma altura de cerca de 3 km acima do solo. Nesta altitude o escoamento é considerado estável o suficiente para que a condição de Newman possa ser imposta a todas as variáveis do escoamento (6). O contorno inferior apresenta maior influencia sobre a estrutura da turbulência do que os demais contornos. A relevância deste contorno se deve ao fato da produção mecânica da turbulência ser decorrente da ação de forças de arraste sobre a superfície e, ainda, pelo fato dos fluxos de calor, responsáveis pelos movimentos convectivos, serem originados na superfície, também conhecida como força de flutuação e caracterizadas pelo número de Froude (Fr).

III. METODOLOGIA NUMÉRICA

Nesse trabalho, são apresentados os resultados de simulação do estudo da CLA, que permitem fazer uma análise teórica da distribuição da velocidade dos ventos em regiões vizinhas à uma linha aérea em estudo. Estudos dos resultados da simulação foram realizados sobre o comportamento das camadas limites locais. Os resultados foram validados com os dados experimentais resultantes de monitoramento em campo, de forma a buscar o aprimoramento do modelo numérico proposto. O modelo proposto pode ser aplicado a uma diversidade de problemas geofísicos e de engenharia. O modelo é capaz de resolver variações de densidade do ar, resultantes dos efeitos térmicos e de altitude, por meio da aproximação de Boussinesq. O modelo de turbulência utilizado neste trabalho para o estudo da CLA é o RNG k- ϵ , amplamente utilizado em escoamentos atmosféricos [15]. O modelo proposto para a CLA, pertence à classe de modelos de mesoescalas e não considera o chamado efeito Coriolis, que pode ser descrito como o efeito da rotação da terra sobre as estruturas do escoamento. As equações governantes, sujeitas à aproximação de Boussinesq são apresentadas a seguir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho_0} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \underbrace{\frac{\delta \rho}{\rho_0} g \delta_{i3}}_I \quad (2)$$

$$\frac{\delta \rho}{\rho_0} = -\frac{\delta T}{T_0} \quad (3)$$

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (4)$$

As equações (1, 2 e 4) representam a conservação da massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente, onde, u_i são as componentes de velocidade, ρ é densidade de referência, p é a pressão, k é a energia cinética, g é a aceleração da gravidade, t é o tempo, ν_t é a viscosidade efetiva, c_p é a capacidade térmica do ar a pressão constante, Pr_T é o número de Prandtl turbulento, T é a temperatura e Q é a taxa de geração de energia. A Equação (3), conhecida como equação de estado, permite acoplar as equações de quantidade de movimento (2) com a equação da energia (4).

O termo I, definido na Equação 2, é conhecido como termo de flutuação. A definição desse termo juntamente com a equação de estado caracteriza diversos modelos disponíveis na literatura. Usualmente, os modelos apresentados na literatura (3, 5, 8 e 14) utilizam a aproximação de Boussinesq e os modelos de turbulência derivados do modelo k- ϵ . O termo de flutuação pode ser expresso em um número adimensional de extrema relevância para o escoamento atmosférico, definido como número adimensional de Froude, $Fr = U/NH$, em que U é a escala da velocidade, H é o comprimento de escala e N é a frequência de flutuação (ou frequência de Brunt-Väisälä), definida como:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \quad (5)$$

O comprimento de escala H é definido como a amplitude máxima no domínio de cálculo. O modelo definido de (1 a 5) é adequado para a implementação no software utilizado para resolver as equações (CFX). O CFX permite a implementação de equações diferenciais parciais e algébricas adicionais, como por exemplo a Equação de estado. As condições de contorno empregadas para os modelos de mesoescalas consideram a rugosidade e o estado da atmosfera, definidas pelo comprimento médio de Obukov, (L). As Equações (6 e 7) mostram a condição de contorno de entrada que foi imposto ao perfil de velocidade do vento.

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_M \left(\frac{z}{L} \right) + \psi_M \left(\frac{z_0}{L} \right) \right) \quad (6)$$

em que,

$$\psi_M(z) = -17 \left(1 - e^{-0,29 \frac{z}{L}} \right) \quad (7)$$

onde u_* é a velocidade de fricção, κ é a constante de Von Karman ($\kappa = 0,41$), z é distância vertical e z_0 é o compri-

mento médio de rugosidade. Andreas [3] propõe os seguintes valores típicos para a rugosidade média: 0,0001 m para lagos e oceanos, 0,03 m para grama baixa, 0,3 para florestas e 1 m para áreas residenciais. No presente trabalho considerou-se a atmosfera neutra o que corresponde a um comprimento médio de Obukov de 10000 [5]. Dessa forma, as funções ψ_M na (6) tendem a zero e o perfil de entrada se resume a um perfil logarítmico. Para definir esse perfil é necessário determinar apenas a velocidade de fricção uma vez que a rugosidade média pode ser estimada ou medida experimentalmente. Neste caso, considerou-se uma altura de referência (z_{ref}), para uma velocidade de referência medida nesta altura (u_{ref}). Desta forma, a velocidade de fricção pode ser calculada pela expressão.

$$u_* = ku_{ref} \ln \frac{z_{ref}}{z_0} \quad (8)$$

A condição de parede é aplicada automaticamente pelo CFX na superfície da topografia, a qual foi considerada como uma superfície sujeita a condição de não-deslizamento ($u = 0$) e com rugosidade média z_0 . Em relação ao transporte de energia, a superfície pode ser: adiabática, com fluxo térmico prescrito, ou isotérmica. A condição de superfície isotérmica foi adotada neste trabalho, ou seja, nenhum efeito térmico proveniente do solo está sendo considerado. A condição de contorno de derivada nula foi adotada para o topo e para as laterais do domínio. Esta condição de contorno garante fluxo nulo de todas as grandezas nas respectivas superfícies. A condição de contorno na saída do domínio foi imposta por meio da especificação da média da pressão estática nula e gradiente nulo na direção do escoamento para as demais grandezas. As equações governantes são discretizadas utilizando o método numérico de volumes finitos em malhas não estruturadas [7]. O sistema de equações é acoplado utilizando o algoritmo de Rhie-Chow [10]. Maiores informações sobre a metodologia utilizada para a solução das equações governantes podem ser encontradas em [1].

IV. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os primeiros dados experimentais utilizados para validar o modelo computacional implementado no CFX foram obtidos do projeto pioneiro da colina de Askervein [11, 12 e 13], mostrada nas Figuras 1(a) e 1(b). Estes dados representam uma referência mundial no estudo da CLA. Essa colina apresenta 116 m de altura e está localizada na costa oeste da ilha do South Uist na Outer Hebrides na Escócia. A colina é relativamente isolada, suave e sua forma é aproximadamente elíptica com vegetação baixa e rugosidade variável. Os conjuntos completos de dados coletados em Askervein e os detalhes referentes à topografia encontram-se disponíveis em [11 e 12]. As medidas de velocidade de vento foram obtidas na altura de 10m acima da superfície da colina, conforme mostrado na Figura 1(c).

Para a preparação, montagem e testes preliminares dos equipamentos de monitoramento em campo das grandezas necessárias, tanto para a análise dos esforços em linhas de transmissão como para a validação do modelo proposto, foi desenvolvido um laboratório de testes na UFMG, com o

objetivo fundamental para aferição dos sistemas de medição antes da sua instalação em campo. As Figuras 2(a) e 2(b) mostram, respectivamente, o sistema de medição por ultrassom e o sistema com as células de carga para medição dos esforços mecânicos.



Figura 1. Detalhes da topografia da colina de Askervein (a) e Sistemas de medição do vento (b).



Figura 2. Anemômetro ultra-sônico (a) e Sistema de medição de esforços mecânicos (b)

Com o objetivo de monitorar a velocidade e direção do vento de uma planta piloto em operação, 8 anemógrafos digitais tipo Second Wind - modelo 2000S foram instalados na região de Acuruí a 50 km de Belo Horizonte-MG, Brasil. As torres utilizadas para medir a velocidade e a direção do vento possuem altura de referência de 10 metros. Essa altura é utilizada como referência em todos os trabalhos da literatura. A Figura 3(a) apresenta o mapa topográfico da região de Acuruí digitalizada no CFX, com a indicação dos pontos de instalação dos sistemas de medição de velocidade e direção do vento. A Figura 3(b) mostra um ponto de medição (ponto 4), adjacente a uma linha de transmissão da CEMIG.

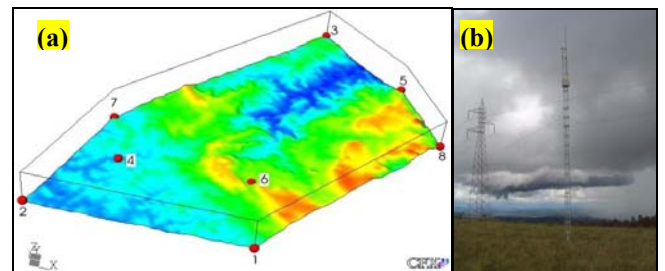


Figura 3. Topografia digitalizada da região de Acuruí-MG(a) e detalhe do ponto 4(b).

Para avaliar os esforços resultantes do campo de velocidades do vento a velocidade e direção do vento nas três direções sobre uma estrutura de 500kV foi implementado um sistema de medição em tempo real. A instalação desse sistema em pontos estratégicos permite o monitoramento em tempo real das condições climáticas, gerando ao mesmo tempo um banco de dados que pode ser usado para alimentar e validar modelos de previsão de vento nas regiões adjacentes às LT's. Este sistema permite a aquisição de dados

via telefonia celular integrada à Intranet. As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) apresentam os detalhes da instalação desses equipamentos.

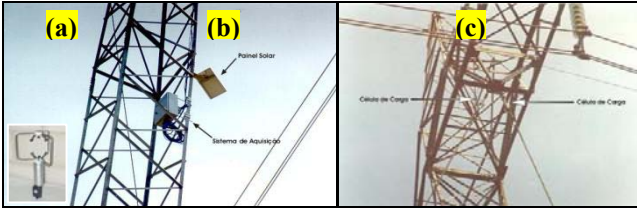


Figura 4. Anemômetro Ultra-Sônico - Sistema de aquisição dos dados (a) e Posição da instalação das células de cargas nos estais na LT (b).

Primeiramente, o modelo foi validado matematicamente por meio da comparação entre os resultados de simulação e de uma solução analítica exata utilizando a teoria de ondas lineares de montanha que permite obter soluções analíticas para o escoamento horizontal sobre um terreno com baixa elevação em forma de sino de Montavon [8]. Essa validação não é mostrada neste trabalho. Posteriormente, conforme mencionado anteriormente, o modelo foi validado utilizando os dados experimentais da colina de Askervein. Para a validação do modelo propriamente dito, foram utilizados os dados disponíveis do aumento relativo de velocidade, medidos por Taylor e Teunissen [12]. Na Figura 5(a) é apresentada as linhas de nível e a topografia digitalizada no CFX da colina de Askervein. Estes resultados experimentais foram obtidos para uma atmosfera neutra, isto é, para números de Froude maiores que 1000. A Figura 5(b) apresenta o aumento relativo da velocidade ao longo da linha A-A. Este valor representa quantas vezes a velocidade local é maior que a velocidade de referência, dada em (9).

$$ARV = \frac{V_{local}}{V_{ref}} - 1 \quad (9)$$

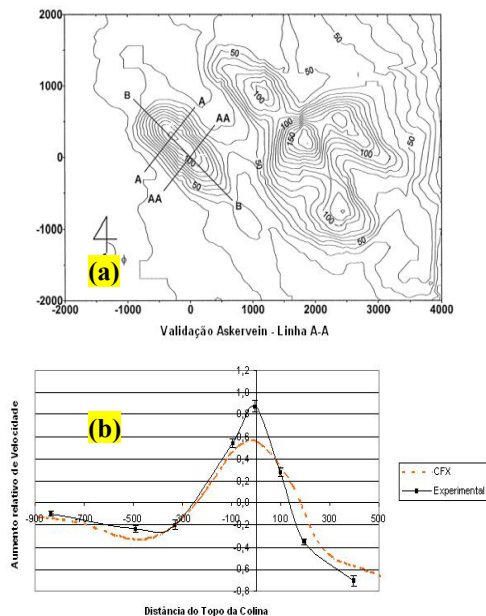


Figura 5. Topografia de Askervein (a) e validação do modelo numérico com os dados de Askervein (b).

Os resultados apresentados na Figura 5(b) mostram que, mesmo com uma malha muito refinada, os resultados do

modelo numérico apresentam uma diferença considerável quando comparados com os dados experimentais. Por outro lado, o comportamento das duas curvas é semelhante, mostrando que o modelo comporta-se qualitativamente semelhante aos dados experimentais. Uma revisão da literatura mostrou que praticamente todos os autores que validaram os seus modelos com estes mesmos dados experimentais de Askervein tiveram problemas na aproximação dos dados. Por exemplo, Kim [6] obtiveram resultados numéricos similares aos dados numéricos obtidos por Raithby [9] quando comparados aos dados experimentais de Askervein.

Os resultados numéricos dos dois autores reproduzem os dados experimentais com uma diferença relativamente grande em algumas regiões da colina de Askervein, conforme pode ser visto em [6 e 9], não tendo obtido diferenças menores com o refino de malha. Isto significa que os modelos consagrados na literatura apresentam algumas discrepâncias quando comparados os seus resultados com os dados experimentais de Askervein. Estas diferenças são da mesma ordem de grandeza das apresentadas atualmente pelo modelo desenvolvido pela parceria Cemig - UFMG.

A. Resultados Experimentais da região de Acuruí-MG

Dessa forma, com a validação obtida do modelo ajustado no Brasil, partiu-se para a validação com os dados experimentais monitorados na região do Acuruí-MG. As Figuras 6(a), 6(b) mostram respectivamente, a digitalização da malha da topografia e uma ampliação dessa malha para demonstrar a formação dos nós para saída dos vetores com os campos de intensidade e direção da velocidade do vento.

A Figura 7 mostra os perfis de velocidade para 3 pontos da região de Acuruí-MG. Nota-se que no ponto 1, por se tratar de uma superfície mais baixa e plana, o perfil de velocidade não apresenta regiões de aceleração da velocidade, permanecendo um perfil mais parabólico. Já nos pontos internos 4 e 6, acelerações aparecem para alturas entre 30 e 40 metros. Os perfis de velocidades foram obtidos para valores médios de velocidade e direção predominante de ventos nos pontos de fronteira do domínio mostrado na Figura 3(a).

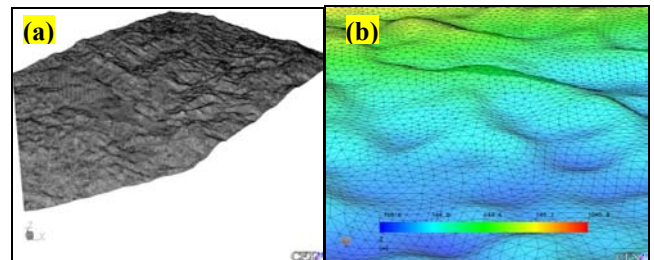


Figura 6. Malha digitalizada da região de Acuruí (a) e ampliação da malha para a região de Acuruí-MG (b).

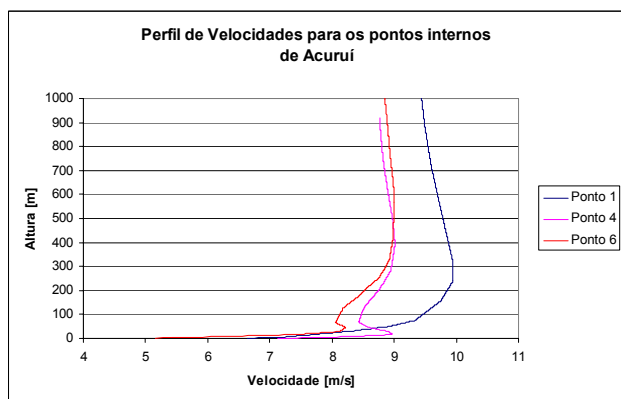


Figura 7. Perfil de velocidade dos pontos 1, 4 e 6 da região de Acuruí-MG.

B. Resultados Experimentais da região de Belo Horizonte-MG

Na região de Belo Horizonte foram instaladas três torres que registram as velocidades dos ventos, conforme ilustra a Figura 8(a). Desta forma, criou-se uma geometria em que a fronteira oeste coincidissem com o ponto 1 e a fronteira leste coincide com o ponto 3. O ponto 2, que é um ponto interno, foi utilizado para a comparação entre o valor numérico e o valor experimental medido em campo. As dimensões da geometria são 7 km no sentido norte-sul, 9 km no sentido leste-oeste e 3.000m de altura. Este domínio é mostrado na Figura 8 (a). Após a análise dos dados coletados, verificou-se que o dia 10 de janeiro de 2002 os três pontos de medição apresentaram ventos moderados e constantes com os valores médios mostrados na Tabela 1, medidos a uma altura de 12 metros acima do solo. Neste caso, os dados de velocidade e direção de vento medidos nos pontos 1 e 3 foram utilizados como condição de contorno do modelo numérico para a reprodução do ponto 2. A Figura 8 (b) mostra o perfil de velocidade obtido numericamente para o ponto 2 e o valor medido experimentalmente em um ponto a 12 metros de altura do solo.

A Figura 9 (a) mostra uma vista ampliada dos vetores de velocidade para a região de Belo Horizonte, mostrando também o único ponto de elevação da topografia (em vermelho). A Figura 9 (b) mostra o campo de velocidades para o ponto de elevação, indicando um aumento de velocidade (aceleração) neste ponto (em vermelho)

TABELA I
DADOS UTILIZADOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Ponto	Velocidade [m/s]	Direção
1	5,1	Leste
2	4,7	Sudeste
3	4,5	Sudeste

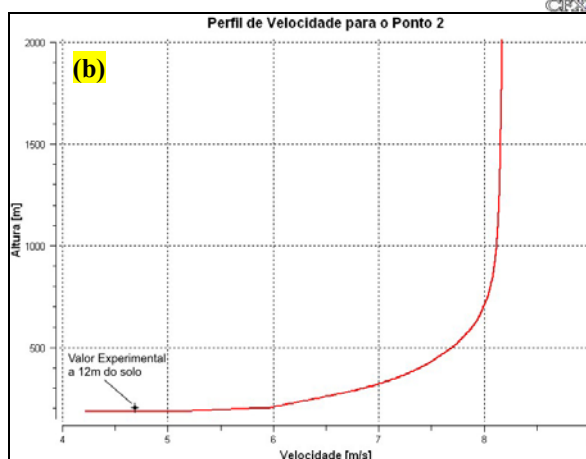
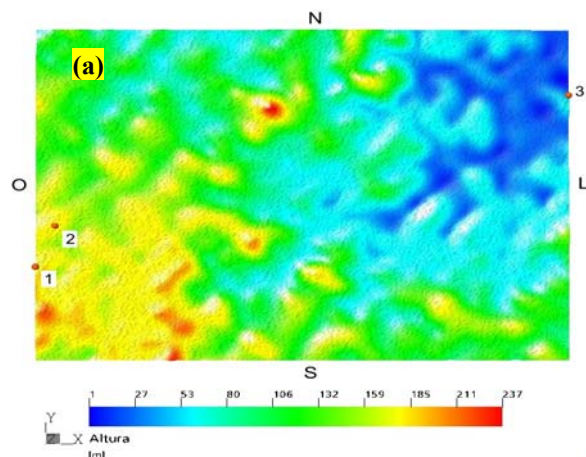


Figura 8. Localização dos pontos de medição (a) e perfil de velocidade obtido numericamente para o ponto 2, com indicação do valor experimental (b)

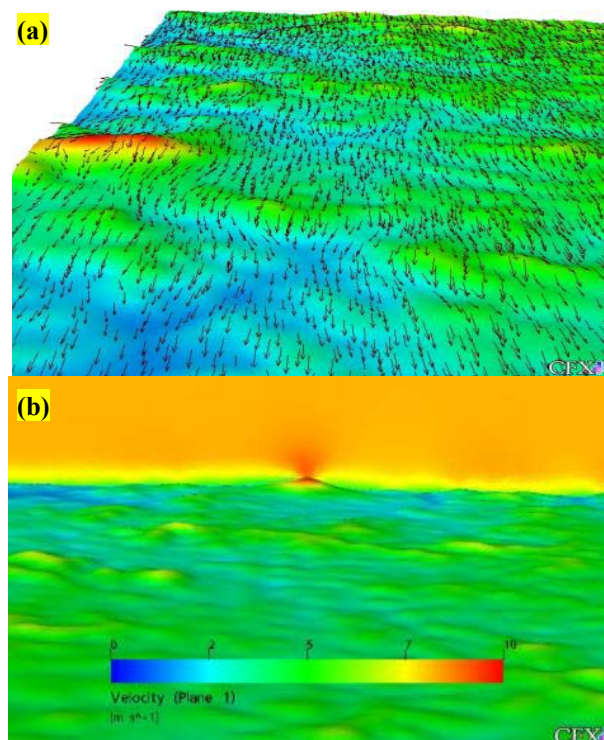


Figura 9. Resposta gráfica dos vetores de velocidade e direção do vento para a região de Belo Horizonte (a) e um corte para visualização da formação da camada limite atmosférica do vento (b).

C. Resultados Experimentais do Monitoramento dos Esforços Mecânicos em Estrutura Estática de 500 kV

Até o presente momento, as informações experimentais dos esforços mecânicos nos estais com medição simultânea da velocidade do vento nas três dimensões, conforme mostrado na Figura 4, estão em fase de aquisição e análise. Em uma análise preliminar, através dessas informações, foi observada uma grande discrepância entre os valores de projeto e as informações monitoradas em tempo real. Isto é, os valores dos esforços transferidos dos estais para as fundações dessa estrutura estão bem inferiores à expectativa de projeto. Se esses valores se confirmarem, abre-se um enorme campo para otimização das fundações e do cálculo estrutural das linhas, através do desenvolvimento de um critério de projeto diferenciado a partir de dados obtidos do modelo devidamente validado.

V. APLICAÇÕES FUTURAS DO ESTUDO DA CLA EM PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Os resultados obtidos e analisados até o presente momento referem-se apenas a campos de velocidade e direção de vento. No entanto, campos de temperatura e pressão serão posteriormente analisados de forma a obter uma análise completa das camadas limites hidrodinâmica e térmica, visando a sua aplicação para melhoria do projeto de linhas aéreas de transmissão. Várias são as aplicações práticas dos modelos da CLA em projetos de linhas, que podem ser aplicadas em todo o percurso da linha e das quais podem ser destacadas as seguintes áreas potenciais de aplicação: aumentar a confiabilidade nas informações climatológicas nas fases de projeto e operação de linhas Aéreas, estudo da ampacidade, auxiliar no projeto de balanço lateral de cabos, melhorar a confiabilidade de linhas novas e em operação, otimizar o projeto civil e estrutural de forma efetiva e buscar o aprimoramento profissional dos projetistas e engenheiros de linhas. Existe uma gama de aplicações do estudo da CLA em projeto de linhas aéreas conforme foi mostrado neste trabalho técnico. A Tabela 2 demonstra o plano estratégico de intenções para continuidade da parceria Cemig e UFMG no tema.

VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De uma forma geral, o projeto foi ambicioso na questão experimental uma vez que os sistemas e equipamentos de aquisição e medição tiveram que ser desenvolvidos ou adaptados em um curto espaço de tempo. Mas foi de grande valor técnico e científico para o desenvolvimento do estudo da CLA no Brasil, principalmente no setor elétrico mundial, onde não foi encontrada nenhuma referência bibliográfica sobre a correlação da CLA e dos esforços mecânicos nas instalações em campo. Dessa forma, a Cemig e UFMG concluíram que a opção pela análise numérica e validação experimental é a melhor forma de desenvolvimento do tema.

Algumas informações experimentais obtidas nesse projeto são incompatíveis com a prática atual dos critérios de projeto de linhas aéreas, o que motiva a continuidade das pesquisas e desenvolvimentos na busca do conhecimento regionalizado do perfil do vento, variável fundamental para a defi-

nição dimensional do projeto eletromecânico dessas linhas. Dessa forma, atualmente a única maneira viável de se obter a correlação entre a CLA e o perfil de vento regionalizado é através da análise numérica via validação experimental, conforme a metodologia adotada neste projeto de p&d.

Os sistemas de monitoramento dos esforços mecânicos e da velocidade do vento foram instalados em campo para monitorar a principal variável de interesse que é velocidade e direção de vento. Muitos problemas foram detectados até a estabilidade das informações. Essa instalação possibilita ter uma base experimental com várias aplicações, estudos e pesquisas a serem desenvolvidas, conforme mencionado na Tabela 2.

O modelo de CLA proposto pode ser aplicado a uma diversidade de problemas geofísicos e de engenharia, sendo capaz de resolver variações de densidade do ar, resultantes dos efeitos térmicos e de altitude.

As validações dos resultados numéricos obtidos para Acuruí-MG mostraram o estado da arte na simulação dos perfis de velocidade do vento. A precisão dos resultados está basicamente ligada à implementação correta das condições de contorno e ao refino de malha, resultando em elevado custo computacional. Dessa forma, um grande obstáculo a ser vencido nos estudos e simulações da CLA é obter correlações viáveis entre as variáveis implícitas do problema para tentar simplificar as equações e reduzir o custo computacional associado. Atualmente, o processamento da CLA na UFMG está usando um servidor com duplo processador e mesmo assim os casos processam com várias horas, o que restringe muito as simulações. O modelo numérico utilizado é capaz de reproduzir valores experimentais de campos de velocidade de vento com incertezas relativamente baixas para várias características da CLA.

VII. AGRADECIMENTOS

Citar todos nomes e entidades que participaram dessas pesquisas é uma tarefa árdua, mas recordar de todos que contribuíram é um fato histórico, inesquecível e gratificante para minha formação profissional e pessoal.

TABELA II
 PLANO DE AÇÕES E ESTRATÉGIA DE NOVAS PESQUISAS E
 DESENVOLVIMENTO DA CLA NA CEMIG E UFMG

Etapa	Projeto	Resultados/Ações	Produto
1 – Capacitação técnica e desenvolvimento experimental no estudo da CLA	Aneel p&d-063 – “Estudo da Camada Limite Atmosférica do Vento – Acidentes com LTs”	Aquisição da licença temporária do CFX, aquisição de equipamentos e montagem de equipe técnica especializada no estudo da CLA	Projetos de Linhas Aéreas com alta confiabilidade nas informações climatológicas.
2 – Aplicar o estudo da CLA em outras áreas de conhecimento do projeto de linhas aéreas	a) Proposta de p&d submetida à Aneel para o ciclo 2004/2005 no tema de Ampacidade	Fase de Viabilidade. Parceria já iniciada com os departamentos de Engenharia Elétrica e Mecânica da UFMG	Projeto de Ampacidade considerando o estudo da CLA para todo o percurso da linha.
	b) Proposta de p&d submetida à Aneel para o ciclo 2004/2005 no tema de Balanço de Cabos		Projeto de balanço lateral de cabos de transmissão considerando o estudo da CLA para todo o percurso da linha.
3 – Desenvolver novas propostas de estudos e projetos em CLA	Análise estrutural do projeto mecânico de estruturas de linhas aéreas	Explicitação da oportunidade do tema para a comunidade técnica e científica no Brasil	Melhorar as análises de confiabilidade de linhas novas e em operação.
	Análise do projeto civil de fundações de linhas aéreas		Otimizar o projeto civil de fundações de linhas aéreas.
4 – Treinamento técnico e profissional através de parcerias tecnológicas	Desenvolver um plano de intenções para criar um centro de referencia técnica em Belo Horizonte sobre a otimização e revitalização do sistema elétrico	Buscar a formação de alunos de engenharia para o ramo de linhas aéreas de transmissão e aprimorar o desempenho técnico dos profissionais da Cemig, UFMG e sociedade.	Formação técnica e profissional dos novos engenheiros de linhas advindos das parcerias de p&d.

VIII.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Patentes:

- [1] AEA Technology plc. CFX-5.5 Documentation. AEA Technology Engineering Software Ltd, United Kingdom, 2002.

Artigos em Anais de Conferências:

- [2] Albertson, J.D. and Parlange, M.B., Natural Integration of Scalar Fluxes from Complex Terrain, *Advances in Water Resources*, vol. 23, p. 239-252, 1999.
- [3] Andreas, E.L., The atmospheric boundary layer over polar marine surfaces, US Army Corps of Engineers, 1996.
- [4] Camilla, G., Griff, J., Michel, O., and Vincent, D., Transport and Mixing in the Atmospheric Boundary Layer, *Lecture Notes, Aosta Summer School*, 1999.
- [5] Huser, A., Nilsen, P.J., and Skatun, H., Application of k- ϵ model to the stable ABL: pollution in complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67-68, pp. 425-436, 1997.
- [6] Kim, H.G, Lee, C.M., and Noh, Y.J., Numerical prediction of the wind flow over hilly terrain.
- [7] Martins, M.A., Estimativa de erro e adaptatividade para métodos de volumes finitos em malhas triangulares não estruturadas, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, 2002.
- [8] Montavon, C., Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, 1998, pp. 273-282., 1998.
- [9] Raithby, G.D. and Stuble, G. D., Prediction and Comparison with Experiment of Three-Dimensional Flow over the Askervein Hill. Rep. Thermal Science Ltd., Waterloo, Ont. Canada. 1985.
- [10] Rhie, C.M., and Chow, W.L., A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation, *AIAA J.*, vol. 21, 1982.
- [11] Taylor P.A. and Teunissen, H.W., Askervein 82: an initial report on the September/October 1982 experiment to study boundary layer flow over Askervein, South Uist, Scotland. In: *Internal Report MSRB-83-8*. Downsview. Ontario, Canada. 1983.
- [12] Taylor P.A. and Teunissen, H.W., The Askervein Hill Project: Report on the September/October 1983 main field experiment. In: *Internal Report MSRB-84-6*. Downsview. Ontario, Canada. 1985.
- [13] Taylor P.A. and Teunissen, H.W., The Askervein Hill Project: Overview and Background data. *Boundary Layer Meteorology*, v.39. pp.15-39. 1987.
- [14] Uchida, T. and Onya, Y, Numerical Simulation of Atmospheric Flow Over Complex Terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 81, p. 283-293, 1999.
- [15] Zhang, Y.Q., Arya, S.P., and Snyder, W.H., A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building, *Atmospheric Environment*, vol. 30, n. 8, pp. 1327-1345, 1996.