



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
**August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil**

## **CON10-1227 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FORÇAS DE CORIOLIS EM UM MODELO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA UTILIZANDO UM SOFTWARE COMERCIAL DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

**André Leandro Rodrigues Coelho, andreirc.engmec@gmail.com<sup>1</sup>**  
**André Augusto Campagnole dos Santos, acampagnole@yahoo.com.br<sup>1</sup>**  
**Gilberto Augusto Amado Moreira, gilbertomoreira@ufmg.br<sup>1</sup>**  
**Ramon Molina Vale, ramon@demec.ufmg.br<sup>1</sup>**  
**Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br**  
**Carlos Alexandre Meireles Nascimento, caxandre@cemig.com.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento Engenharia Mecânica – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte – MG

<sup>2</sup>Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Av. Barbacena, 1200 – Santo Agostinho - CEP 30190-131 – Belo Horizonte – MG

**Resumo:** *Este trabalho tem como objetivo implementar o efeito da força de Coriolis em um modelo numérico hidrodinâmico já validado. Este efeito é causado pela rotação da Terra e o resultado de sua atuação é que ele altera a direção do vento. Para validação do modelo numérico, utiliza-se dados experimentais obtidos em Askervein, onde foram realizadas medições no ano de 1983 e são amplamente utilizados para avaliar modelos numéricos de Camada Limite Atmosférica (CLA). Com o modelo validado, foi possível realizar um estudo sobre o domínio geofísico situado em uma região do estado de Minas Gerais, com o intuito de conhecer as condições de vento para implantação de Turbinas Eólicas.*

**Palavras-chave:** *CLA, Modelo numérico, Força de Coriolis, Modelo hidrodinâmico.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A camada limite atmosférica (CLA) é normalmente dividida em três subcamadas: a subcamada laminar, a camada de Prandtl e a camada de Ekman (Zdumkowski e Bott, 2003).

A subcamada laminar é uma camada de poucos milímetros, próxima a superfície terrestre, na qual o escoamento é lento e totalmente laminar onde o transporte de quantidade de movimento e calor são regulados por movimentos moleculares.

A camada de Prandtl começa a partir da altura da rugosidade, onde a velocidade do vento média é considerada nula. A extensão dessa camada varia entre 20 e 100m e nela a influência da força de Coriolis pode ser desprezada, sendo a deflexão do vento nessa camada praticamente nula.

A camada de Ekman se encontra sobre a camada de Prandtl e atinge alturas que podem ser superiores a 1000m, o que depende da estabilidade do ar. O fluxo de turbulência diminui até atingir zero no topo da camada de Ekman. Como efeito de atrito é menor nessa camada os efeitos causados pela aceleração de Coriolis fazem com que ocorra uma deflexão no vento, que é maior quanto mais afastado da linha do Equador.

No topo da CLA, a força de Coriolis equilibra o gradiente de pressão, o que inibe o seu crescimento, fenômeno este estudado no trabalho de Stublely e Riopelle (1988).

O estudo do escoamento sobre uma topologia real dentro da CLA sempre foi de interesse em diversas áreas da ciência e tecnologia, entre elas a meteorologia, engenharia, ambiental, militar, esporte, dentre outras, por diversos motivos e aplicações, como por exemplo, posicionamento de turbinas eólicas e efeitos destrutivos em estruturas devido a ação do vento. Entretanto, não se tem uma solução analítica para solução deste tipo de problema e a instalação de aparatos experimentais se torna demorado e dispendioso. Com isso, a fluido-dinâmica computacional (CFD), a partir de simulações numéricas se torna a ferramenta adequada para esse tipo de estudo.

Na modelagem numérica da CLA são encontradas várias dificuldades, devido ao grande número de fenômenos físicos que ocorrem. A implementação de cada novo parâmetro de modelagem envolve uma avaliação de sua influência no escoamento, nas condições de contorno e nas características numéricas. Um fenômeno importante é a força de Coriolis que altera a direção do escoamento atmosférico, devido à rotação da Terra.

Para as regiões de interesse de engenharia, há variações topográficas na altitude de mais de 500m, o que torna muito importante a correta simulação dos ventos na região da camada de Ekman, a qual é altamente influenciada pela aceleração de Coriolis.

O objetivo deste estudo é avaliar a influência da força de Coriolis no comportamento do escoamento em uma microescala da CLA. Um termo para a força de Coriolis foi implementado no modelo CFD para simulação da CLA, em desenvolvimento no laboratório de fluidodinâmica computacional da UFMG (Santos ET AL., 2009 e Valle, 2005), que utiliza o código comercial CFX 12.0 (2009). O modelo alterado foi validado através da comparação com dados experimentais obtidos na região de Askervein Hill (Taylor e Teunissen, 1983 e 1985). Com este modelo validado, foi então realizada a simulação de um estudo de caso real em uma região do estado de Minas Gerais, que compreende o parque da Serra do Rola Moça, na qual existe uma torre do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de medições meteorológicas.

## 2. METODOLOGIA

A avaliação numérica foi realizada utilizando o código comercial de CFD, denominado CFX 12.0 (2009), que se baseia no método dos volumes finitos. As equações RANS para massa, quantidade de movimento e modelo de turbulência foram resolvidas. Foram usados os esquemas de diferenças centradas e híbrido de segunda ordem para discretizar os termos de difusão e de advecção das equações, respectivamente. O modelo de turbulência utilizado foi o BSLRS (Baseline Reynolds Stress), que fornece os melhores resultados para a simulação da CLA, segundo Santos et. al. (2009). Um resíduo alvo RMS foi estipulado com o valor de  $10^{-4}$ . Foram usados até quatro computadores em paralelo para realizar as simulações.

A força de Coriolis,  $f$ , apresentada na Eq. (1), relaciona a velocidade angular da terra ( $\Omega$ ) com a latitude ( $\phi$ ), sendo positiva para o hemisfério norte e negativa para o sul definido por Lesieur (1997).

$$f = 2\Omega \sin(\phi) \quad (1)$$

Os termos de Coriolis foram implementados no código CFX 12.0 (2009) através do artifício de criação de um subdomínio, o qual permite a inserção de um termo fonte volumétrico nas equações de momentum. Este termo fonte é mostrado nas equações (2) a (5):

$$S_c = S_{cx} \cdot i + S_{cy} \cdot j + S_{cz} \cdot k \quad (2)$$

$$S_{cx} = -\rho f u_y \quad (3)$$

$$S_{cy} = \rho f u_x \quad (4)$$

$$S_{cz} = 0 \quad (5)$$

Onde  $S_c$  é o termo fonte no sistema cartesiano,  $S_{cx}$  e  $S_{cy}$  são as componente laterais do termo fonte de Coriolis,  $S_{cz}$  é a componente vertical que foi considerada zero neste estudo. Sabendo a latitude de cada região e a velocidade de rotação da Terra, foram determinados os valores de  $f$  para a região de Askervein e para a região da Serra do Rola Moça. São eles,  $f = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$  para Askervein e  $f = -1,57 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$  para a região de Rola Moça.

Nas subseções seguintes são mostradas as metodologias usadas para a validação da simulação sobre o domínio de Askervein e para o estudo de caso sobre a região da Serra do Rola Moça.

### 2.1. Validação em Askervein

#### 2.1.1. Modelo

Askervein Hill Project (Taylor et. al. 1983 e 1985) foi o principal estudo experimental em campo sobre CLA em baixas colinas e fez parte do programa de P&D da Agência Internacional de Energia (IEA) sobre Sistemas de Conversão de Energia do vento (WECS). A colina de Askervein, mostrada na Fig. (1), fica na costa oeste de South Uist, uma das ilhas de Outer-Hebrides na Escócia. Ela tem uma forma aproximadamente elíptica, com o eixo menor de 1km e o maior de 2km. O topo da colina (HT) se encontra a 116m de altura (126m acima do nível do mar). O domínio modelado compreende a dimensão de 4,5 x 4,5 x 1,5km.

#### 2.1.2. Modelo e Condições de Contorno

No projeto de Askervein Hill obteve-se grande quantidade de dados experimentais para condições de atmosfera neutra (Taylor e Teunissen, 1983 e 1985). Dentre os vários resultados, a condição de maior relevância foi a do dia 03 de outubro de 1983, denominado TU-03B, que é utilizado neste trabalho.

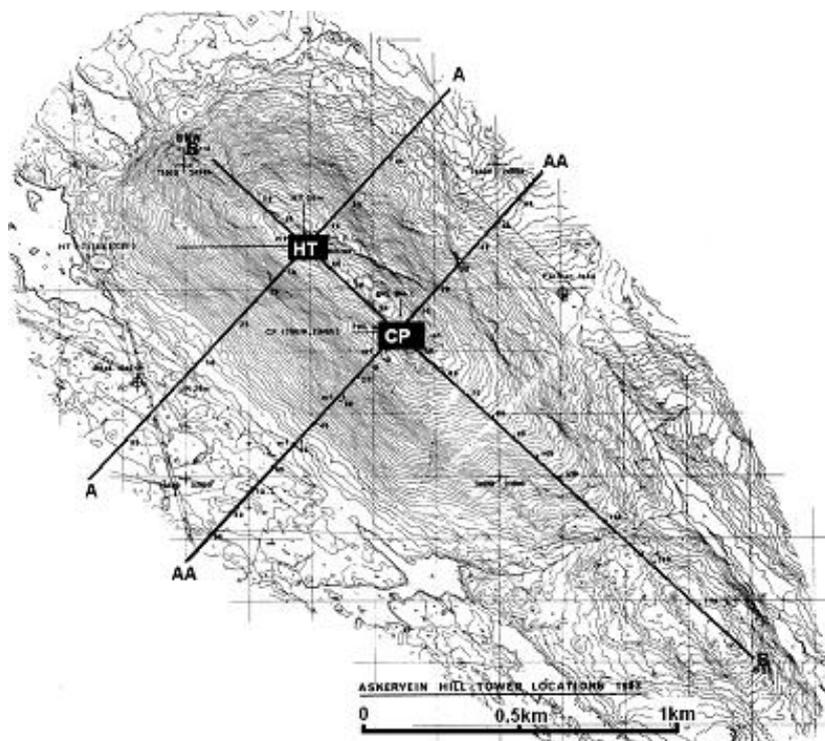


Figura 1. Detalhes da topografia de Askervein (Fonte: Taylor and Teunissen, 1983).

As condições de contorno utilizadas neste trabalho são as mesmas implementadas por Valle et al. (2005). Neste modelo o perfil de velocidade é logarítmico, dado pela Eq. (6). O perfil de velocidade logarítmico é considerado o mais apropriado para condições de atmosfera neutra e seca, Forthofer (2007).

$$u(z) = u_{ref} \ln(z/z_0) / \ln(z_{ref}/z_0) \quad (6)$$

Onde  $u(z)$  é o perfil de velocidade na entrada do domínio,  $u_{ref}$  é a velocidade de referência,  $z$  é a altura a partir da superfície do solo,  $z_{ref}$  é a altura de referência e  $z_0$  é o comprimento aerodinâmico da rugosidade. Em Askervein, a partir dos dados experimentais TU-03B,  $u_{ref} = 8,9$  m/s (Taylor et al., 1983 e 1985),  $z_{ref} = 10$  m e o comprimento aerodinâmico da rugosidade é considerado constante ao longo de todo o domínio com valor de  $z_0 = 0,03$  m.

### 2.1.3. Malha

O estudo de malha foi realizado para o domínio de interesse e diversos parâmetros mostraram ser relevantes nas características finais da malha. No estudo foi avaliado o impacto do comprimento de elemento, fator de expansão e raio de influência de um refinamento no solo do domínio de simulação, além do tamanho do elemento volumétrico afastado do solo, do número de camadas, fator de expansão e altura da primeira camada vertical de elementos de inflation (prismático) junto ao solo. Os fatores de expansão usados foram especificados para garantir uma transição suave entre as regiões da malha, o que garantiu uma boa convergência numérica da simulação. A Figura (2) mostra detalhes da malha.

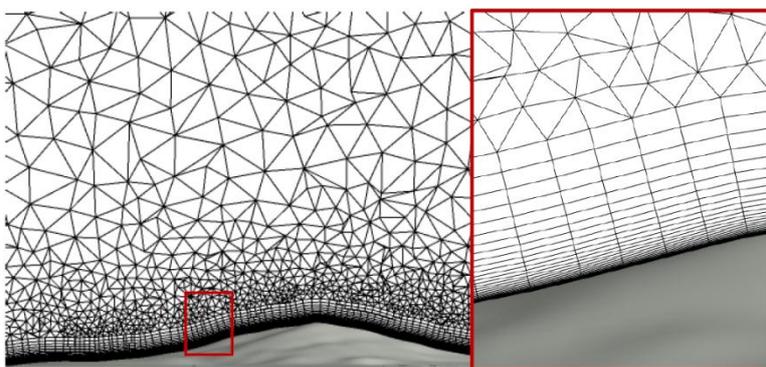


Figura 2. Detalhes da malha utilizada na simulação de Askervein.

A malha obtida através desse estudo e que foi, posteriormente, utilizada na simulação para o domínio de Askervein apresenta, apresentou  $\sim 9,95 \times 10^5$  nós e  $2,64 \times 10^6$  elementos. Desta forma foi possível realizar uma simulação de alto desempenho, obtendo resultados satisfatórios com um recurso computacional viável.

## 2.2. Estudo de Caso Real em Rola Moça

### 2.2.1. Modelo

A região da serra do Rola Moça modelada, compreende um domínio com dimensões 13 x 13 x 2km de topografia altamente irregular, contendo a região onde está localizada uma torre para medições meteorológicas e onde esta planejada a instalação de um gerador eólico. A Fig.(3) mostra o mapa topográfico da região e a posição da torre.

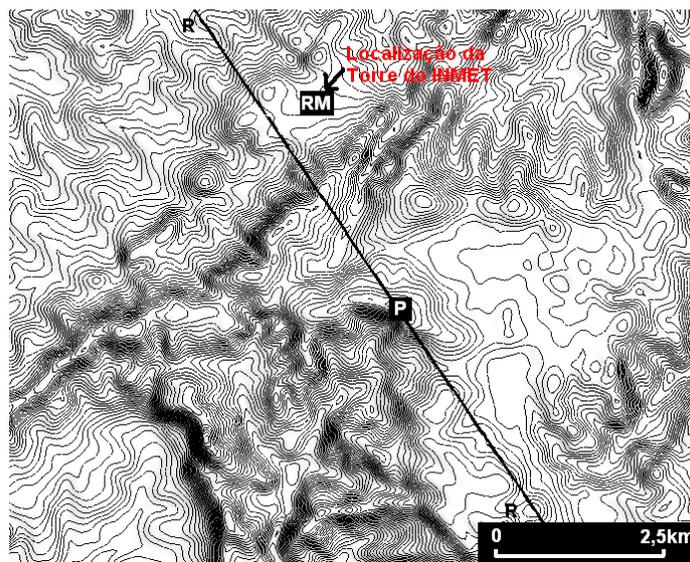


Figura 3. Detalhes da topografia da região da Serra do Rola Moça.

### 2.2.2. Condições de Contorno

A formulação utilizada para determinar as condições de contorno para a simulação no domínio de Rola Moça foi a mesma utilizada para a de Askervein, com diferenças nos valores dos dados de entrada. Para este estudo utiliza-se a condição de vento máxima, observada entre novembro de 2008 e fevereiro de 2009. Os dados utilizados na simulação são:  $u_{ref} = 12,34\text{m/s}$ ,  $z_{ref} = 10\text{m}$  e o comprimento aerodinâmico da rugosidade é considerado constante ao longo de todo o domínio com valor de  $z_0 = 0,03\text{m}$ . A direção preferencial do vento nesse caso é de  $111^\circ$ .

### 2.2.3. Malha

A malha obtida através do estudo de malha, referenciado na subseção 2.1.3, e que foi, utilizada na simulação para o domínio da Serra do Rola Moça apresenta, aproximadamente,  $2,69 \times 10^6$  nós e  $6,98 \times 10^6$  elementos. Desta forma foi possível realizar uma simulação de alto desempenho, obtendo resultados satisfatórios com um recurso computacional viável.

A malha gerada para o domínio de Rola Moça apresenta características semelhantes à utilizada no domínio de Askervein, que pode ser observada na Figura (2).

## 3. RESULTADOS

Os resultados de velocidade das simulações são apresentados de forma adimensional  $\Delta S$ , segundo a relação mostrada pela Eq. (7).

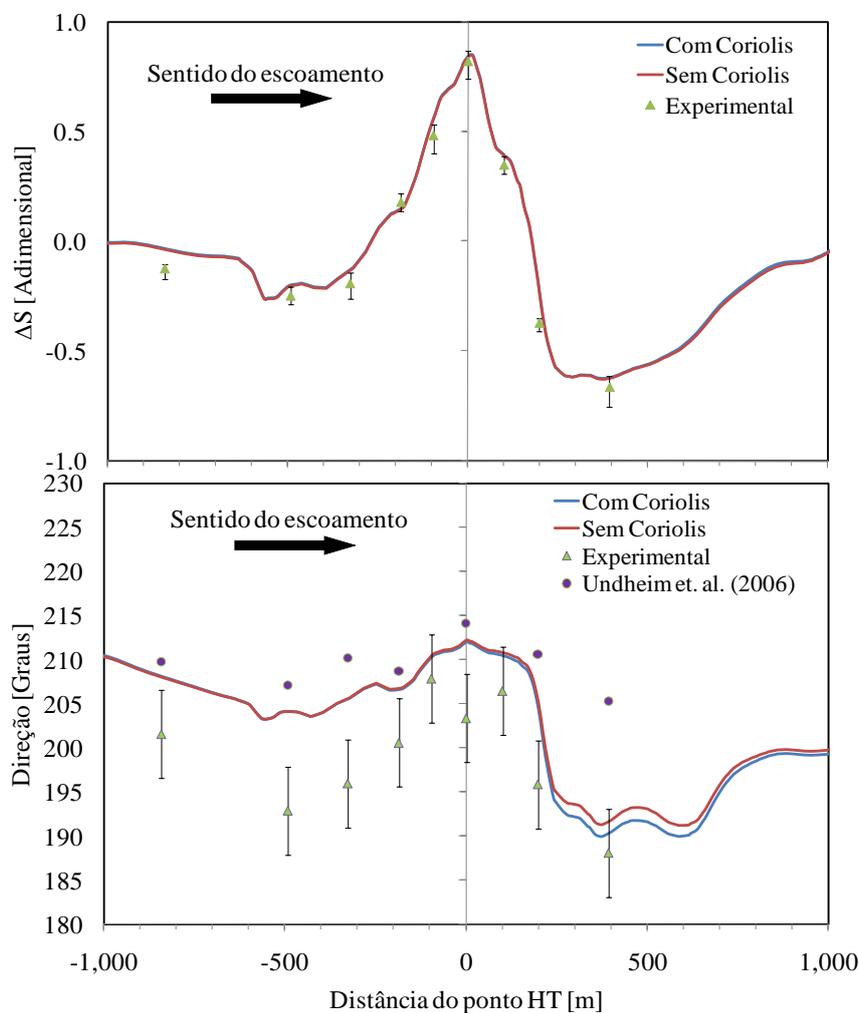
$$\Delta S = u/u_{ref} - 1 \quad (6)$$

Onde  $u$  é a velocidade horizontal em cada ponto,  $u_{ref}$  é a velocidade horizontal de referência. Para Askervein  $u_{ref} = 8,9 \text{ m/s}$  e para a região de Rola Moça  $u_{ref} = 12,34 \text{ m/s}$ .

### 3.1. Validação

Os resultados das simulações numéricas no domínio de Askervein, com e sem a consideração do termo fonte de Coriolis, são comparados com os dados experimentais, TU-03B, de Askervein (Taylor e Teunissen, 1983 e 1985) e também com resultados numéricos obtidos por Undheim, que realizou simulações no domínio de Askervein, também considerando o termo fonte de Coriolis, utilizando o software 3DWind (Undheim et. al., 2006).

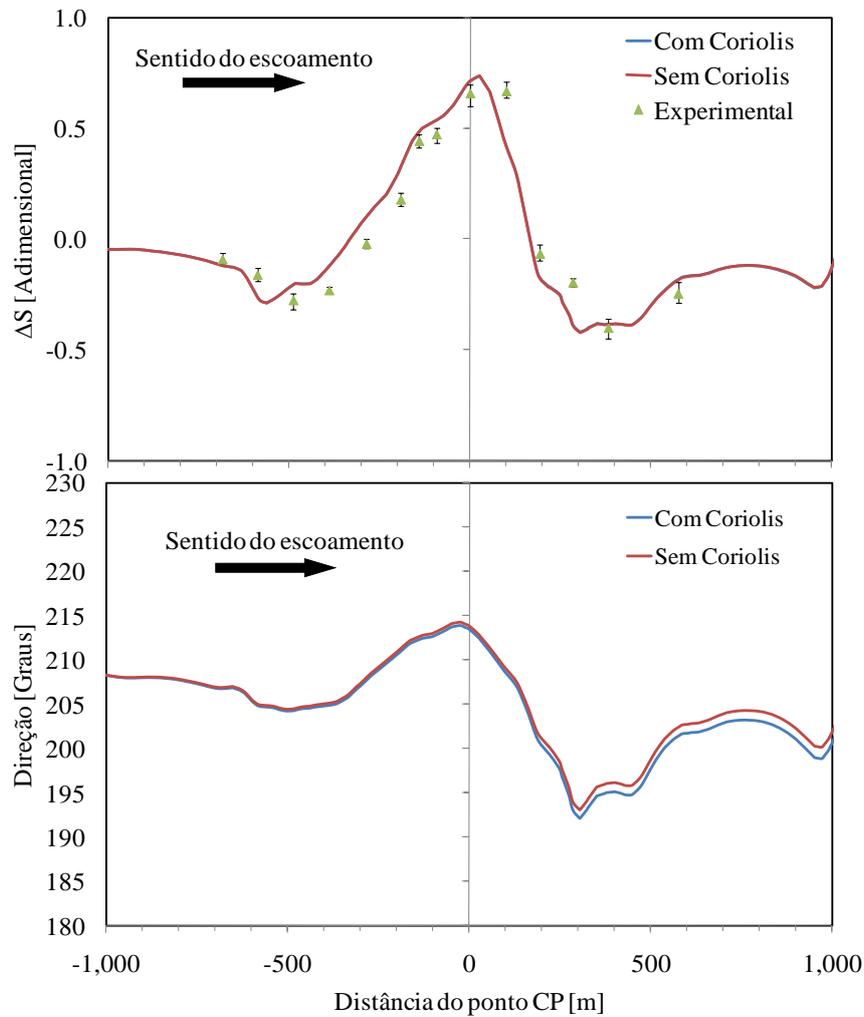
A Figura (5) mostra resultados obtidos ao longo da linha A-A, que passa a 10 m da superfície do terreno, mostrada na Fig.1.



**Figura 5 - Resultados de  $\Delta S$  e direção do vento a 10 m da superfície seguindo a linha A-A que passa sobre a colina de Askervein.**

É possível notar que  $\Delta S$  não sofreu alteração significativa com a implementação do termo de Coriolis ao longo da linha A-A, o que é consistente com a teoria, pois a interferência do fenômeno é de causar apenas deflexão na direção do vento. Percebe-se também que a direção do vento não sofre alterações consistentes antes de HT, mas após passar pelo topo da colina pode-se notar uma deflexão na direção do vento, o que leva a curva conseguida com a implementação do termo de Coriolis a se aproximar ainda mais dos dados experimentais. Comparando-se os resultados obtidos com a implementação do termo de Coriolis aos resultados de Undheim et. al. (2006), nota-se uma melhor representação do fenômeno físico, principalmente após se passar do topo da colina, onde os resultados se aproximaram fielmente aos resultados de direção experimentais.

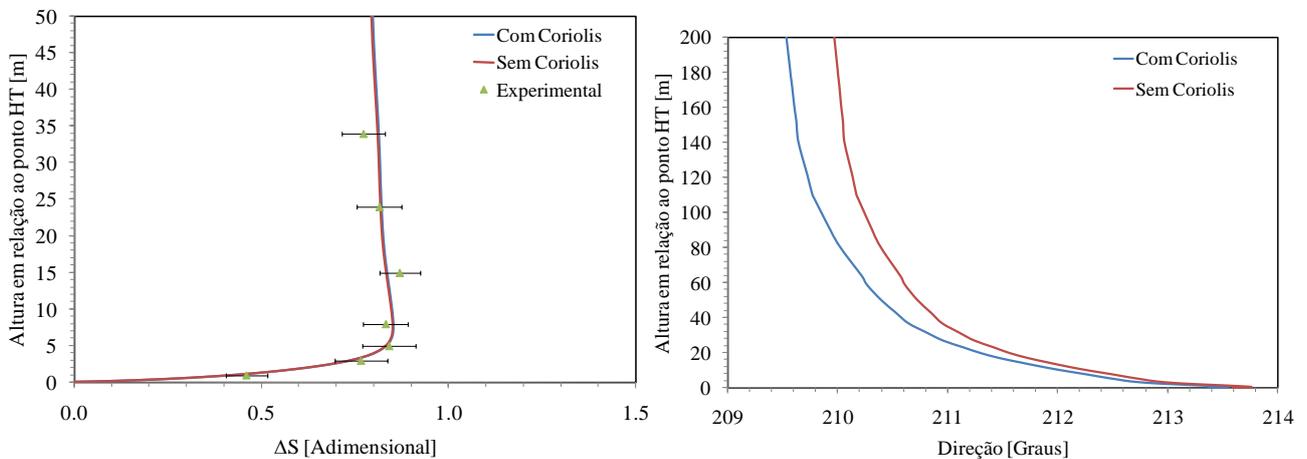
A Figura (6) mostra os resultados obtidos ao longo da linha AA-AA, que passa a 10 m da superfície do terreno, mostrado na Fig.(1).



**Figura 6 - Resultados de  $\Delta S$  e direção do vento a 10 m da superfície seguindo a linha AA-AA que passa sobre a colina de Askervein**

Verifica-se com esses resultados o mesmo fato ocorrido ao longo da linha A-A, onde a curva  $\Delta S$  conseguida nas simulações numéricas com e sem o termo de Coriolis não se diferenciam de forma considerável e que descrevem muito bem o fenômeno físico se comparando com os dados experimentais. Na direção, ocorre interferência semelhante à ocorrida ao longo da linha A-A, onde o vento sofre uma deflexão maior após se passar pela colina, neste caso, ao se passar pelo ponto CP.

A Figura (8) mostra resultados obtidos no Perfil HT, que é uma linha que parte do solo no topo da colina e, verticalmente, vai até o topo do domínio.



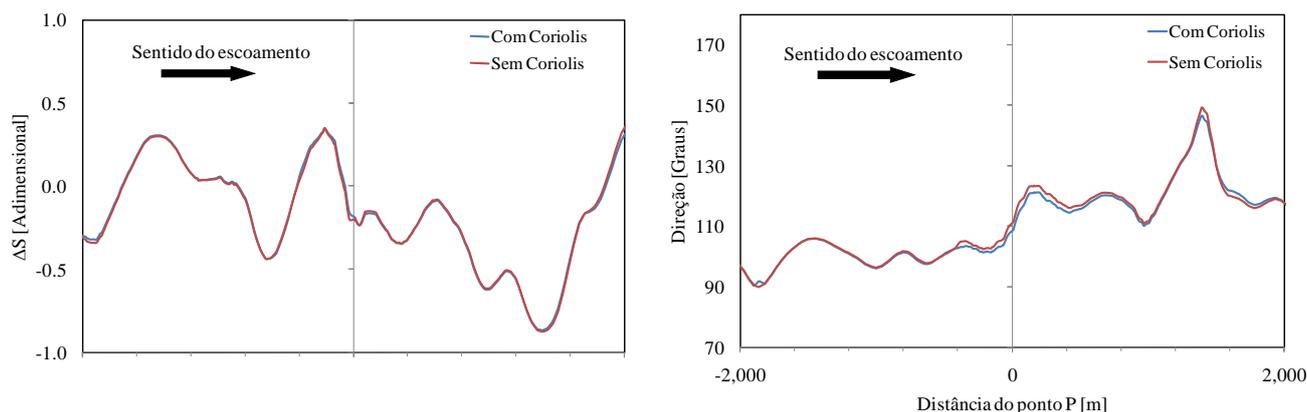
**Figura 7 - Resultados de velocidade e direção do vento no Perfil HT.**

É notável, observando a Fig. (7), que as curvas  $\Delta S$  não se diferenciam de forma significativa entre as simulações com e sem o termo de Coriolis, o que é justificado também pelo fato deste fenômeno causar deflexões no vento. A deflexão da direção do vento, aumenta com a altura em relação ao solo, até se chegar ao o topo da CLA, onde a força de Coriolis se equilibra com o gradiente de pressão. A força de Coriolis na Terra aumenta também com o distanciamento da linha do equador, ou seja, com o aumento da latitude. Nota-se que a curva obtida nas simulações descrevem de forma adequada o fenômeno físico da CLA, como observado na comparação com os dados experimentais.

### 3.2. Estudo de Caso Real na Serra do Rola Moça

A seguir, é realizada uma comparação dos resultados das simulações numéricas com e sem a consideração do termo fonte de Coriolis no domínio da Serra do Rola Moça.

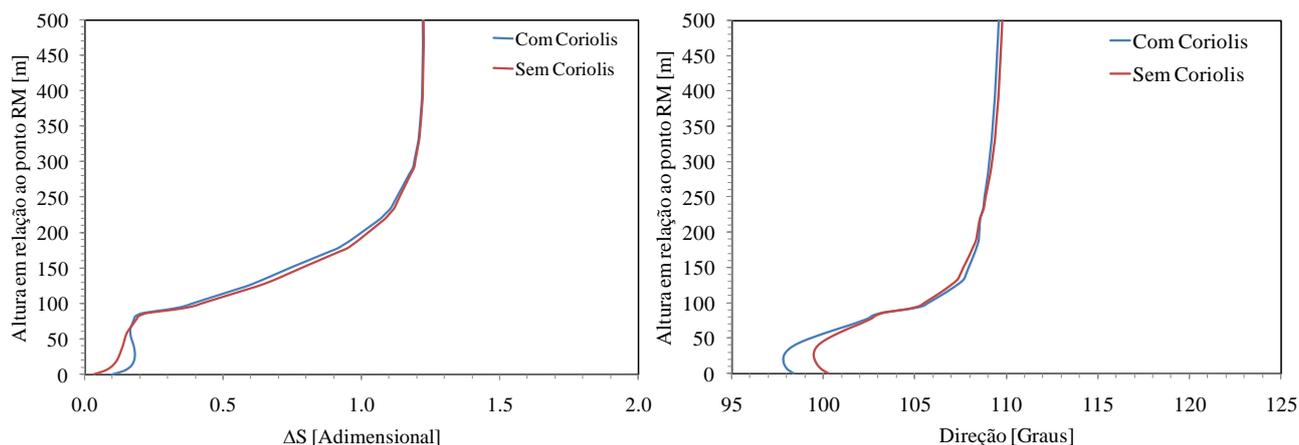
A Figura (8) mostra resultados obtidos ao longo da linha R-R, que passa a 10 m da superfície do terreno, mostrada na Fig.3. Esses resultados comparam  $\Delta S$  e a direção do vento, ao longo da linha R-R, obtidos na simulação da região da Serra do Rola Moça com e sem o termo fonte de Coriolis.



**Figura 8 - Resultados de  $\Delta S$  e direção do vento a 10 m da superfície seguindo a linha R-R que passa sobre a região da Serra do Rola Moça**

É possível notar que  $\Delta S$  não sofreu alterações significativas com a implementação do termo de Coriolis ao longo da linha R-R, como era esperado. Percebe-se também que a direção do vento sofre alterações consideráveis ao longo de toda linha.

A Figura (9) mostra resultados obtidos no Perfil RM, que é uma linha que parte do solo no ponto RM, mostrado na Fig.(3), e, verticalmente, vai até o topo do domínio.



**Figura 9 - Resultados de  $\Delta S$  e direção do vento no Perfil RM que parte do ponto RM mostrado na Fig.(3)**

Observa-se na figura acima, que as curvas  $\Delta S$  têm o mesmo tipo de comportamento com e sem o termo de Coriolis, se diferenciando na camada de Prandtl, onde, suspeita-se que seja devido a alta irregularidade do terreno. A deflexão da direção do vento, na camada de Ekman, aumenta com a altura em relação ao solo, até atingir seu valor máximo no topo da CLA, onde a força de Coriolis se equilibra com o gradiente de pressão. A deflexão da direção do vento no caso da Serra do Rola Moça, na camada de Ekman, é menor em relação a ocorrida em Askervein, fato que se deve a diferença de latitude das regiões, a região da Serra do Rola Moça se encontra mais próxima da linha do Equador.

#### 4. CONCLUSÕES

A influência da força de Coriolis no comportamento da CLA foi avaliada para simulações numéricas de fluxo-fluido sobre topologias complexas com um código comercial de CFD, CFX 12.0 (2009). Esse estudo é parte do programa de pesquisa de simulações e medições atmosféricas que está em andamento atualmente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

A região da colina de Askervein (Taylor e Teunissen, 1983, 1985 e 1985), foi escolhida como uma das regiões modeladas devido a grande disponibilidade de dados experimentais. Nesta região foi possível realizar a validação da simulação numérica, onde foram obtidos resultados bastante compatíveis com o fenômeno físico real. Foi possível perceber que a influência da força de Coriolis sobre escoamentos atmosféricos se torna importante na determinação da direção do vento.

Na região da Serra do Rola Moça, que possui um relevo bastante irregular, foi possível perceber que a força de Coriolis atinge a direção do escoamento de forma mais significativa, tendo influência menor na camada de Ekman, em relação a relação a região de Askervein, devido a maior proximidade da região de Rola Moça à linha do Equador.

O modelo utilizado, implementando o termo fonte de Coriolis obteve resultados satisfatórios, que são compatíveis com o fenômeno físico real da CLA.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos toda a equipe do CTM-UFMG (Centro da Tecnologia da Mobilidade da Universidade Federal de Minas Gerais e a CEMIG pelo o apoio e financiamento do projeto.

#### 6. REFERÊNCIAS

- CFX 12.0 (2010). "CFX-12 Solver and Solver Manager Guide", AEA Technology Engineering Software Ltd, UK.
- Forthofer, J. M., 2007, "Modeling wind in complex terrain for use in fire spread prediction", Theses for the degree of master of science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, pp. 46-47.
- Taylor P.A., Teunissen, H.W., 1983, "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.
- Taylor P.A., Teunissen, H.W., 1985, "The Askervein Hill Project: Report on the September/October 1983 main field experiment". In: Internal Report MSRB-84-6. Downsview. Ontario, Canada.
- Undheim, O., Andersson, H. I., Berge, E., 2006, "Non-linear, microscale modelling of the flow over Askervein hill", Boundary-Layer Meteorology, vol. 120, pp. 477 – 495.
- Santos, A.A.C., Lima, S.M.L., de Paula, G.A.R., Moreira, F.A.A., Valle, R.M., 2009, "RANS turbulence model evaluation for neutral atmospheric boundary layer simulation over complex terrain", COBEM.
- Zdunkowski, W., Bott, A., 2003, "Dynamics of the atmosphere: A course in theoretical meteorology", Cambridge University Press.
- Vallis, G.K., 2005, "Atmospheric and oceanic fluid dynamics. Fundamentals and Large-scale Circulation".
- Stubley, G. D., Riopelle, G. (1988). "The influence of the Earth's rotation on planetary boundary layer turbulence." Boundary Layer Meteorology. Vol. 45, pp. 307-324.
- Lesieur, M. (1997) "Turbulence in fluids." 3rd edition, Kluwer Academic Publishers.

#### 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## CON10-1227 – INFLUENCE OF CORIOLIS FORCES ON THE MODEL OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER USING A COMMERCIAL SOFTWARE

Stella Marys Silva Pinheiro, stella\_marys\_@hotmail.com<sup>1</sup>

André Augusto Campagnole dos Santos, acampagnole@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Gilberto Augusto Amado Moreira, gilbertomoreira@ufmg.br<sup>1</sup>

Ramon Molina Vale, ramon@demec.ufmg.br<sup>1</sup>

Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br

Carlos Alexandre Meireles Nascimento, caxandre@cemig.com.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento Engenharia Mecânica – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte – MG

<sup>2</sup>Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Av. Barbacena, 1200 – Santo Agostinho - CEP 30190-131 – Belo Horizonte – MG

**Abstract:** *The objective of this work is to implement the effect of the Coriolis force in a hydrodynamic numerical model that has been validated. The effect is caused by Earth's rotation and the result of his performance is that it changes the direction of the wind. To validate the numerical model, were used experimental data obtained in Askervein, where measurements were made in 1983 and are widely used to evaluate numerical models of ABL. With the validated model, we could conduct a study of the geophysical domain located in a region of Minas Gerais, in order to meet the conditions for deployment of wind turbines.*

**Palavras-chave:** ABL; Numerical Model; CFX

### RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.