



CÁLCULO E MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE BALANÇO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

RAMON MOLINA VALLE¹, MAURISSONE F. GUIMARÃES², CARLOS ALEXANDRE MEIRELES NASCIMENTO², GERALDO AUGUSTO CAMPOLINA FRANÇA¹, GILBERTO AUGUSTO AMADO MOREIRA¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brasil

²Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG

Av. Barbacena, 1200 – Santo Agostinho - CEP 30190-131 – Belo Horizonte – MG, Brasil

(Recibido 8 de diciembre de 2011, para publicación 16 de mayo de 2012)

Resumo – Em linhas aéreas de alta tensão, o nível de isolamento depende da ação do vento sobre seus componentes e de outras variáveis elétricas, ambientais e climatológicas, tais como poluição, umidade relativa do ar, pressão e temperatura ambiente. No presente trabalho busca-se obter o ângulo de balanço da cadeia de isoladores devido à ação dos ventos em linhas aéreas de transmissão utilizando vários procedimentos e visando sua aplicação em estudos de coordenação de isolamento. São apresentados resultados da aplicação de várias metodologias teóricas e do desenvolvimento de uma metodologia experimental para cálculo e monitoramento do ângulo de balanço de cadeias de isoladores em linha aérea de transmissão devido à ação do vento. Na metodologia experimental foi desenvolvido um protótipo de sensor de monitoramento de balanço de cadeias e instalado um sistema de monitoramento com sensores climatológicos numa linha de alta tensão de 138 kV da Companhia Energética de Minas Gerais, Brasil. Em paralelo foi desenvolvido um modelo teórico para estudo da camada limite atmosférica, utilizando o software ANSYS CFX, capaz de modelar o comportamento do vento para estudo de coordenação de isolamento de linhas aéreas de transmissão. Foi também desenvolvido um programa computacional para cálculo teórico do ângulo de balanço, utilizando diferentes metodologias de cálculo do ângulo de balanço e diferentes condições de entrada, incluindo dados de Normas Técnicas e dados experimentais de vento.

Palavras-chave – Coordenação de isolamento, cadeia de isoladores, ângulo de balanço, camada limite atmosférica, monitoramento em tempo real.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da CLA é de grande importância para projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, na medida em que permite a obtenção dos campos de velocidade e direção do vento sobre terrenos complexos. Com a crescente capacidade de processamento computacional, as pesquisas numéricas de CLA, amparadas em dados experimentais, tornaram-se promissoras ferramentas para estudos aplicados a linhas de transmissão de energia [6].

O cálculo do balanço é baseado atualmente em metodologia experimental desenvolvida por *Hornisgrinde* em uma pesquisa de campo em *Schwarzwald*, Alemanha (1971-73) [3], [4]. O nome da pesquisa "*Teste de Hornisgrinde*" ficou largamente conhecido e utilizado pelos projetistas de linhas aéreas de todo o mundo. O cálculo do balanço consiste na determinação de um dado vento, que aplicado numa correlação estatística, permite obtenção dos ângulos de balanço máximo e médio da cadeia de isoladores de suspensão, também chamadas cadeias em "I". O ângulo máximo define a distância de isolamento em ar para frequência industrial, enquanto o ângulo médio define a distância de isolamento em ar para sobretensões de frentes rápidas (descargas atmosféricas) ou lentas (chaveamentos) [1], [2].

Atualmente, existe a necessidade de se realizar adaptações nos modelos de cálculo deste ângulo [5]. A metodologia de *Hornisgrinde* foi baseada em dados estatísticos da velocidade do vento de uma única

estação climatológica, chamada *U.S. Weather Bureau Station* e, naquela época, não foi considerado o tratamento regionalizado da Camada Limite Atmosférico - CLA e nem o efeito da componente vertical da velocidade do vento.

Atualmente, utilizando sistemas de monitoramento, está sendo criada uma base de dados experimentais inédita em solo brasileiro sobre balanço de cadeias de isoladores e dados climatológicos, a qual se traduzirá em benefícios para melhores práticas de projeto.

2. METODOLOGIA

2.1. Cálculo do ângulo de balanço

O balanço da cadeia de isoladores é resultado da ação de uma carga de vento atuando sobre o comprimento total de um dado vão [10]. O ângulo formado é dado pela resultante das forças verticais e horizontais que atuam na cadeia, podendo ser calculado pela expressão simplificada dada pela equação (1).

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{(\rho V_R^2 / 2) \cdot C_c \cdot V_v \cdot D + (\rho V_R^2 / 2) \cdot C_i \cdot S_i / 2}{p V_p + P_i / 2} \right) \quad (1)$$

onde:

ϕ = ângulo de balanço da cadeia

ρ = massa específica do ar (kg/m^3)

V_R = velocidade do vento (m/s)

C_c = coeficiente de arrasto para cabos, geralmente igual a 1

D = diâmetro do condutor (m)

P = peso unitário do condutor (N/m)

S_i = área da envoltória da cadeia de isoladores (m^2)

C_i = coeficiente de arrasto para isoladores, geralmente igual a 1,2

P_i = peso da cadeia de isolares (N)

V_v = vão de vento (m)

V_p = vão de peso (m)

Nos casos em que é pequena a influência das dimensões da cadeia de isolares, a equação (1) pode ser simplificada para:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(K \frac{\rho V_R^2 / 2 \cdot D}{p V_p / V_v} \right) \quad (2)$$

A equação (2) aparece corrigida pelo fator de efetividade do vento K para compensar o fato de o vento não atuar uniformemente sobre todo o vão, o que acarreta flutuações significativas no ângulo de balanço da cadeia em relação aos dados medidos [5]. O fator K proposto na revisão da norma NBR 5422 [10] é reproduzido na Fig. 1.

Foi desenvolvido um programa computacional para calcular o ângulo de balanço de cadeias de isoladores a partir da utilização de dados experimentais obtidos de bancos de dados de vento medidos em campo, ou a partir da utilização de dados teóricos, provenientes do programa de modelagem de CLA (Ansys CFX). Desta forma, as expressões teóricas utilizadas por várias normas técnicas podem utilizar dados teóricos ou experimentais para cálculo do ângulo de balanço, permitindo a comparação de resultados entre as diferentes normas e diferentes origens dos dados fornecidos. Em paralelo com o desenvolvimento do programa de cálculo do ângulo de balanço, foi desenvolvido também um protótipo para medição em tempo real desse ângulo, permitindo que estes resultados experimentais sejam comparados com os resultados teóricos dados pelas diferentes normas.

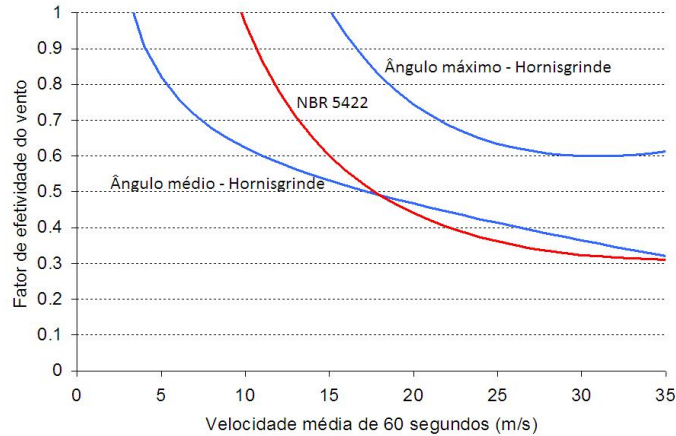


Fig. 1. Fator de efetividade do vento.



Fig. 2. Plataforma inercial Sparkfun constituída de circuito transmissor com sensores (esquerda) e circuito receptor (direita).

2.2. Desenvolvimento do sistema de medição em tempo real do ângulo de balanço

O sensor de medição de ângulo desenvolvido tem seu funcionamento baseado na aplicação de plataforma inercial ou IMU (*Inertial Measurement Unit*). Por meio da combinação de informações tridimensionais de aceleração e taxa de giro, o IMU permite a determinação do estado inercial de qualquer sistema ao qual esteja acoplado. Plataformas inerciais são normalmente utilizadas em sistemas de navegação de aeronaves, satélites, automóveis e até mesmo em telefonia celular.

A plataforma inercial empregada (*Sparkfun*) possui seis graus de liberdade (aceleração e taxa de giro em três eixos direcionais, além de dados do campo magnético bidimensional), sendo composto de duas unidades complementares, emissor e receptor, conforme ilustrado da Fig. 2

O sensor emissor da IMU realiza as medições das grandezas inerciais e vai acoplado à cadeia de isoladores. A unidade receptora fica conectada a um *datalogger*. A disposição geral do sensor e demais componentes do sistema de monitoramento no corpo da estrutura está ilustrado na Fig. 3.

O sensor emissor possui dispositivos para medição de aceleração e taxa de giro angular com 10 bits de resolução, comunicando-se via wireless Bluetooth com o receptor. A frequência de amostragem do IMU foi fixada em 10 Hz, suficiente para evitar *aliasing* na medição do balanço de uma cadeia de isoladores.

Para a obtenção dos ângulos de inclinação da cadeia de isoladores, se assume que a cadeia se comporta como um corpo rígido, sendo necessário conhecer apenas os ângulos ϕ e θ , apresentados na Fig. 3, pois constituem os graus de liberdade.

O ângulo de balanço ϕ é ortogonal ao posicionamento do condutor; o ângulo θ tem valor diferente de zero quando há um deslocamento longitudinal da cadeia, situação hipotética em que há rompimento do cabo condutor. Os ângulos ϕ , θ e ψ são denominados, respectivamente, de *Pitch*, *Roll* e *Yaw*.

O comportamento dos ângulos de balanço no tempo pode ser descrito pelas equações de cinemática de corpo rígido, dado pela equação (3), e pela projeção de aceleração da gravidade, dadas pelas equações (4) e (5):

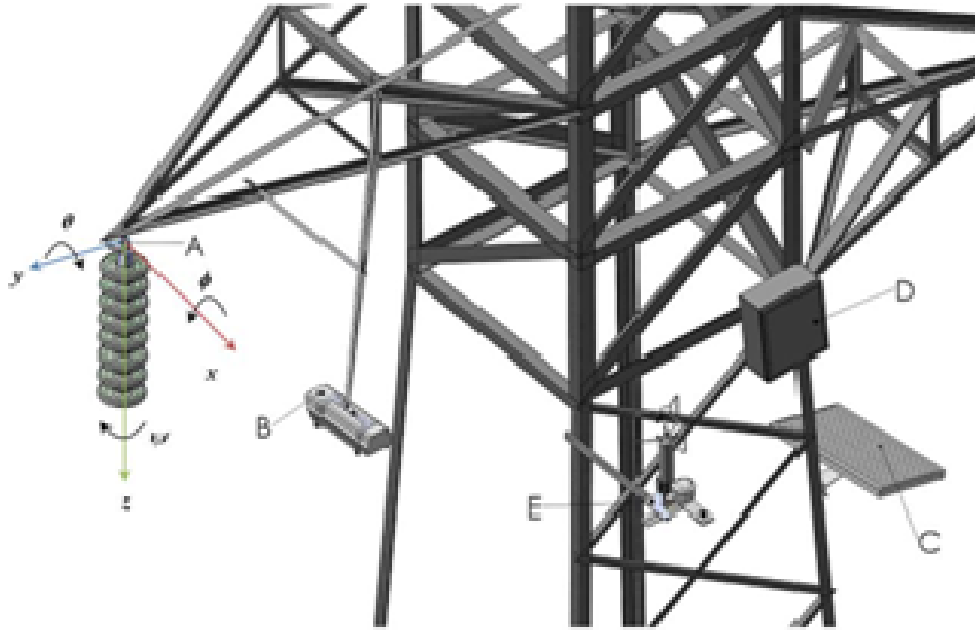


Fig. 3. Plataforma inercial e grandezas medidas. (A) sensor de ângulo de balanço/emissor IMU na cadeia de suspensão; (B) câmera digital; (C) painel solar; (D) caixa metálica contendo *datalogger*, receptor IMU, bateria e modem; (E) sensores de radiação solar, temperatura, velocidade de vento 3D e pressão atmosférica.

$$\begin{cases} \dot{\phi} = p + q \tan(\theta) \sin(\phi) + r \tan(\theta) \cos(\phi) \\ \dot{\theta} = q \cos(\phi) - r \sin(\phi) \\ \dot{\psi} = q \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} + r \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_x = g \sin(\theta) \\ A_y = -g \sin(\phi) \cos(\theta) \\ A_z = -g \cos(\phi) \cos(\theta) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \theta_a = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right) \\ \phi_a = \arcsin\left(\frac{A_y}{-g \cos(\theta)}\right) \end{cases} \quad (5)$$

onde $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$ e $\dot{\psi}$ são as derivadas no tempo do deslocamento angular (ϕ , θ e ψ); p , q e r são as velocidades angulares dos girômetros da IMU, em *rad/s*; A_x e A_y são componentes da aceleração linear medidas, dadas pela IMU; e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade.

A partir da equação (3), os ângulos de balanço em função do tempo, $\phi_g(t)$ e $\theta_g(t)$, são calculados via integração numérica das taxas de giro com condições iniciais definidas por $\phi(0) = \phi_a$ e $\theta(0) = \theta_a$, calculadas previamente a partir da equação (4).

Na condição de velocidade angular constante ou nula, os ângulos θ e ϕ podem ser obtidos diretamente da equação (4). Entretanto, para obter medição numa ampla faixa é necessária uma fusão de dados dos

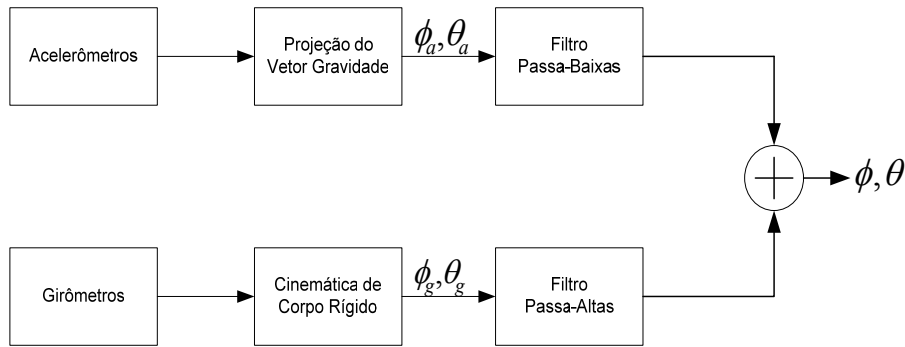


Fig. 4. Diagrama de blocos do esquema de filtragem complementar.

Fig. 5. Plataformas *Crossbow* e *Sparkfun* fixadas para calibração.

girômetros e acelerômetros por meio de filtragem complementar, conforme indicado no diagrama de blocos da Fig. 4. Os sinais provenientes dos acelerômetros passam por um filtro digital passa-baixa e os sinais provenientes dos girômetros passam por um filtro digital passa-alta.

2.3. Calibração do sensor de balanço

A calibração da plataforma inercial para medição em tempo real do ângulo de balanço de cadeia de isoladores foi realizada comparando os resultados das medições de desempenho da plataforma inercial de calibração *Crossbow*. Para realizar a calibração é necessário que as duas plataformas, *Crossbow* e *Sparkfun*, estejam acopladas fisicamente uma à outra, de forma tal que os sensores de aceleração fiquem alinhados em relação aos eixos x , y e z das duas plataformas, conforme apresentado na Fig. 5. Um computador com duas portas seriais permite a conexão e a aquisição simultânea de dados das duas plataformas.

A sensibilidade dos acelerômetros da Sparkfun foi ajustada para $\pm 2g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$). Isto significa que os acelerômetros são capazes de medir valores de aceleração numa faixa de $-2g$ a $+2g$ sem ocorrer saturação na medição. Outras faixas de aceleração são possíveis, mas os movimentos da cadeia são relativamente lentos.

Nas figuras 6 e 7 são apresentados os dados das plataformas para o eixo x e o erro relativo da medição, respectivamente. A linha vermelha representa os dados da plataforma *Crossbow* e a linha azul representa os dados da plataforma *Sparkfun*.

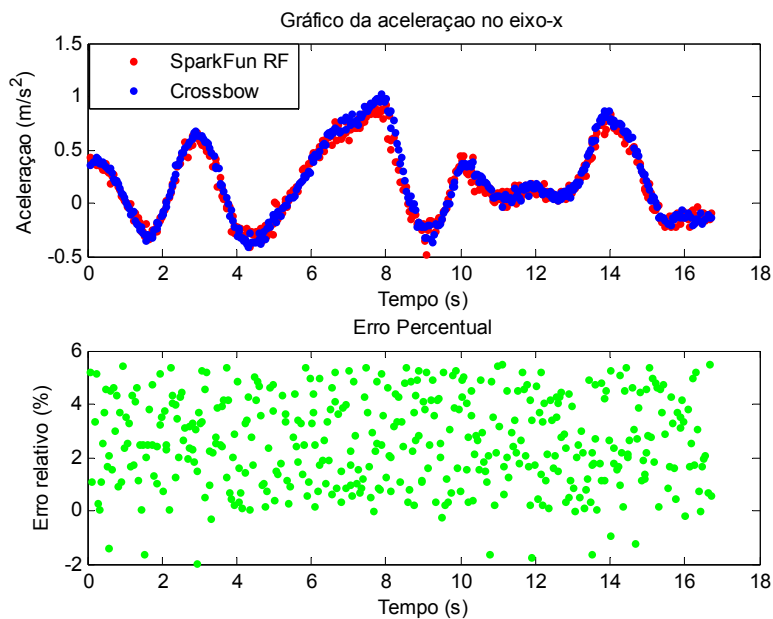


Fig. 6. Curva de calibração e erro obtido para a aceleração.

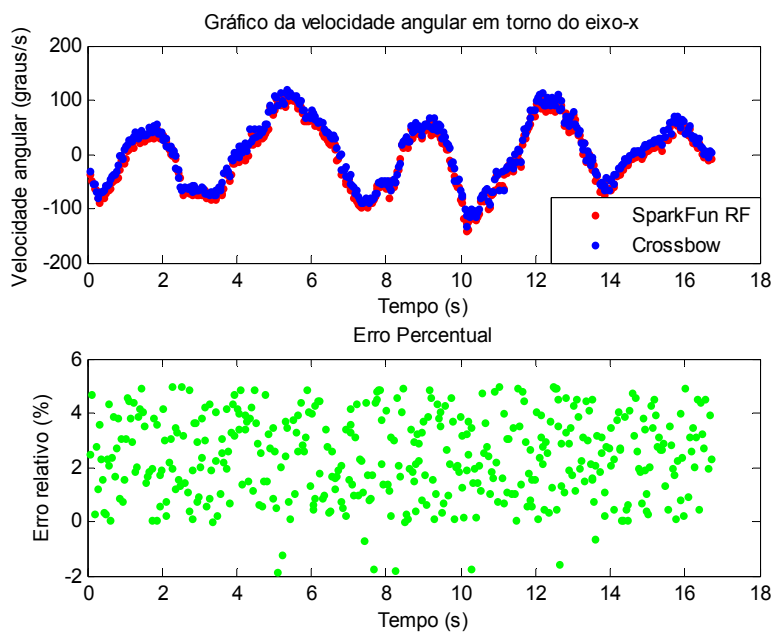


Fig. 7. Curva de calibração e erro obtido para a velocidade angular.

As figuras mostram que o erro relativo máximo da plataforma inercial *Sparkfun*, tanto para a aceleração como para a velocidade angular, se localiza em torno de 6%, podendo-se considerar um erro relativo médio em torno de 3%.

As calibrações da plataforma inercial para medição do ângulo apresentaram resultados satisfatórios, com margem de erros aceitáveis. Deste modo, as curvas obtidas para as acelerações e velocidades angulares em x , y e z garantem boa qualidade das medições do ângulo de balanço em campo.

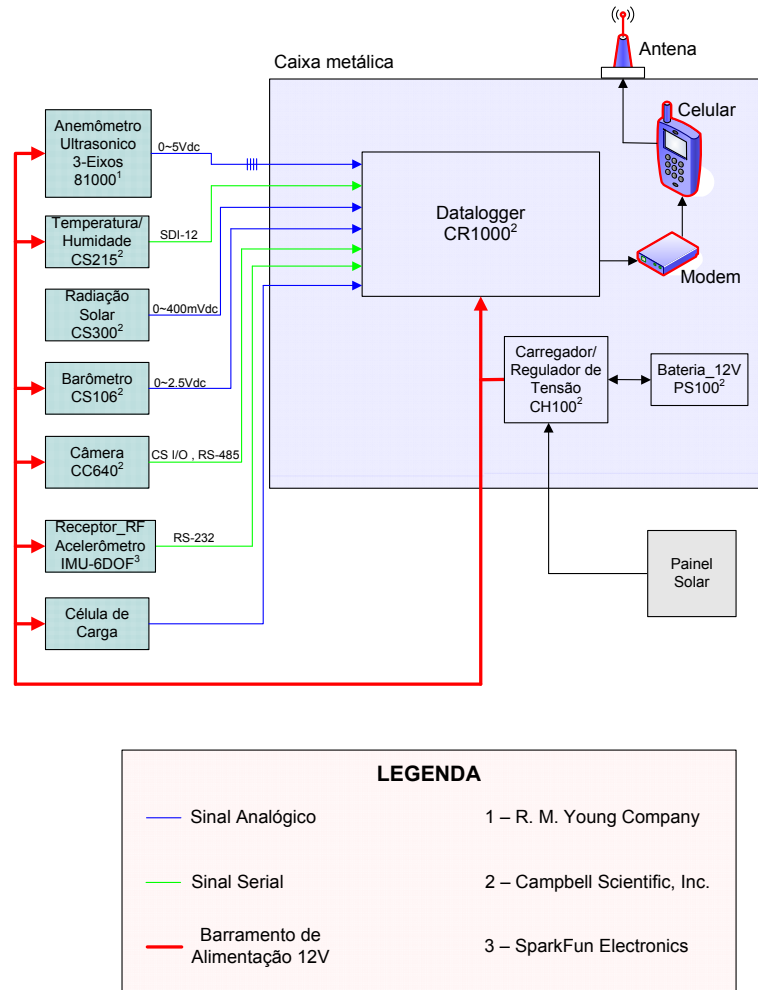


Fig. 8. Arquitetura do sistema de monitoramento do ângulo de balanço e demais grandezas.

2.4. Sistema de monitoramento do ângulo de balanço e de outras grandezas

Para obtenção das informações experimentais de balanço de cadeia foi utilizada a tecnologia de monitoramento em tempo real [9], adaptada para medição do balanço de cadeia de isoladores e outras grandezas. O sistema é constituído de uma unidade de aquisição e comunicação de dados, sensor de balanço, sensor de velocidade e direção do vento, sensor de temperatura e umidade do ar, sensor de radiação solar, sensor de pressão, câmara de registro de imagem e sistema de alimentação. O diagrama simplificado da Fig. 8 apresenta o esquema de integração de monitoramento de todas as variáveis com os demais componentes do sistema e o padrão de comunicação de dados adotado.

O deslocamento da cadeia é captado visualmente por uma câmera disparada por um pulso lógico do *datalogger*, a partir de um determinado valor de velocidade de vento ou um determinado valor de ângulo de balanço. Um pulso lógico do *datalogger* dispara a câmera, iniciando uma seqüência de fotos. A aquisição remota de dados do sistema de medição e registro do ângulo de balanço instalados em campo é realizada por meio de um PC equipado com modem GPRS.

As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento das acelerações e das velocidades angulares da cadeia obtidas em laboratório. Um pequeno impulso foi fornecido à cadeia durante um certo período de tempo. Na Fig. 10 são apresentadas as acelerações calculadas para a cadeia de isoladores nas três direções. Na Fig. 11 é apresentado o sinal de valores dos ângulos de inclinação após filtragem do conjunto de dados (ϕ_a , θ_a) e (ϕ_g , θ_g).

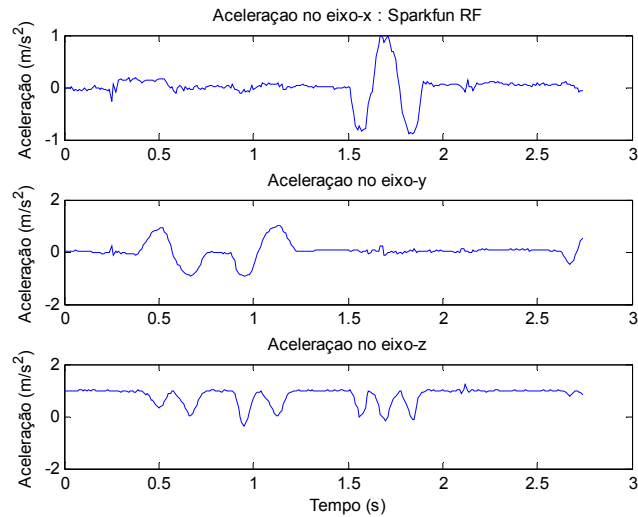


Fig. 9. Acelerações calculadas para cadeia de isoladores nas três direções.

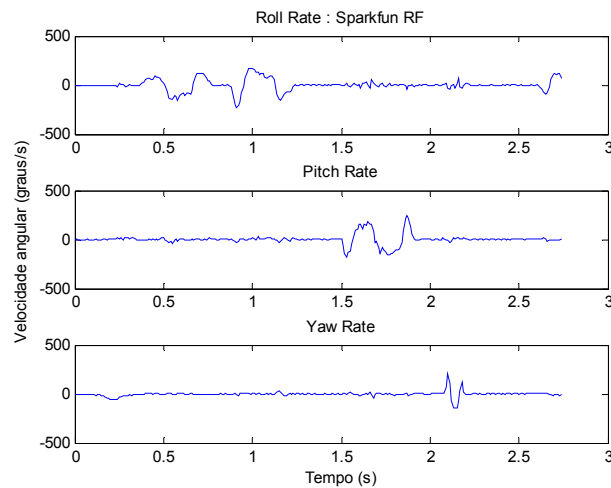


Fig. 10. Velocidades angulares calculadas para a cadeia de isoladores.

2.5. Instalação do sistema em campo

O sistema de monitoramento de balanço piloto foi instalado em uma linha de 138 kV da Cemig na região de Acuruí (Fig. 11). Foi instalada na mesma torre, a 10 m de altura, uma estação climatológica (Fig. 12) com os demais sensores. Alguns ajustes foram necessários na montagem piloto para garantir funcionamento adequado ao ambiente eletromagnético agressivo da linha.

2.6. Modelo de CLA para o cálculo do ângulo de balanço

No cálculo do ângulo de balanço com utilização da metodologia baseada em CLA, campos de velocidade e direção do vento são obtidos a partir da simulação numérica com o *software Ansys CFX* [11]. Esse programa computacional resolve de forma conservativa as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, em conjunto com as equações do modelo de turbulência. A solução destas equações permite, para uma dada topografia, a predição do comportamento atmosférico. As principais variáveis de interesse são a velocidade e a direção do vento. A discretização destas equações é realizada pelo método de volumes finitos e o armazenamento das variáveis é realizado em pontos



Fig. 11. Instalação do sistema de medição do ângulo de balanço.



Fig. 12. Estação climatológica com os demais sensores instalados na mesma estrutura 138 kV.

localizados geometricamente por estes volumes. Os campos de velocidade e direção do vento obtidos da simulação numérica são utilizados diretamente para o cálculo do ângulo de balanço de cadeias de isoladores, permitindo comparar estes valores com os calculados pelas normas e com os valores obtidos diretamente do monitoramento desse ângulo em campo..

A região de Acuruí – MG foi escolhida como domínio de estudo, onde a partir de estações climatológicas instaladas na região foram estabelecidas as condições de contorno [12] para o modelo numérico da CLA. A Fig. 13 apresenta a região de estudo com a localização das linhas de transmissão 138 kV e as estações climatológicas que servirão de condição de contorno para o modelo.

A malha utilizada na simulação é apresentada nas figuras 14 e 15. A Fig. 14 mostra a malha final, depois de um intenso teste de malha, utilizada para a modelagem. A Fig. 15 mostra detalhes da malha no plano vertical e na superfície do solo. No plano vertical nota-se claramente uma concentração de elementos próximo do solo, uma transição suave e uma expansão de forma coerente. Estas características são muito importantes, pois garantem a solução das equações governantes de forma harmônica, evitando assim divergência nos seus resultados. Diversas malhas foram testadas, sendo a sua configuração final constituída de 1.332.439 nós e 4.395.712 elementos.



Fig. 13. Região de Acuruí modelada, com os pontos de medição de dados climatológicos.

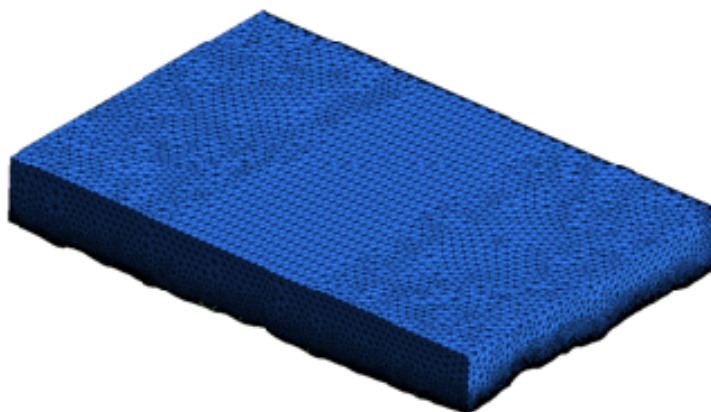


Fig. 14. Malha final utilizada na simulação numérica.

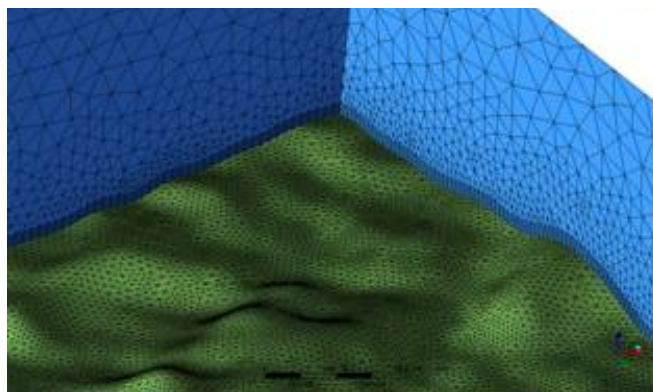


Fig. 15. Detalhe da malha no solo e sua progressão no plano vertical.

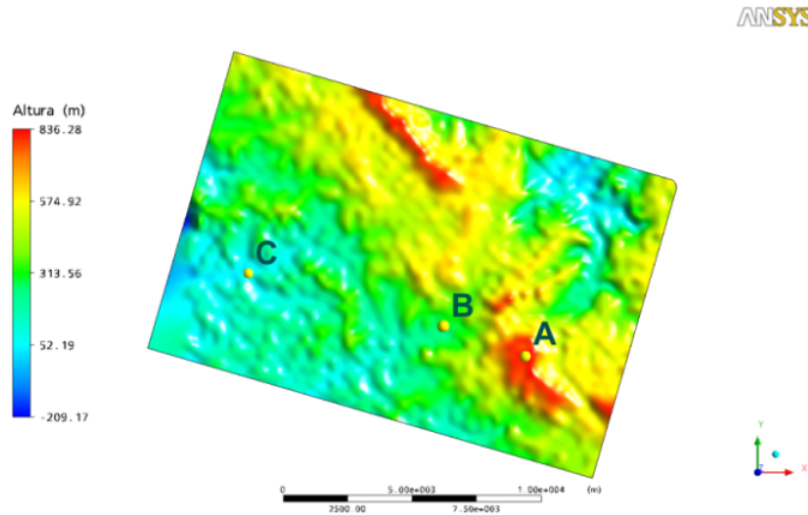


Fig. 16. Topografia digitalizada de Acuruí contendo três pontos com altitudes diferentes e o relevo do terreno.

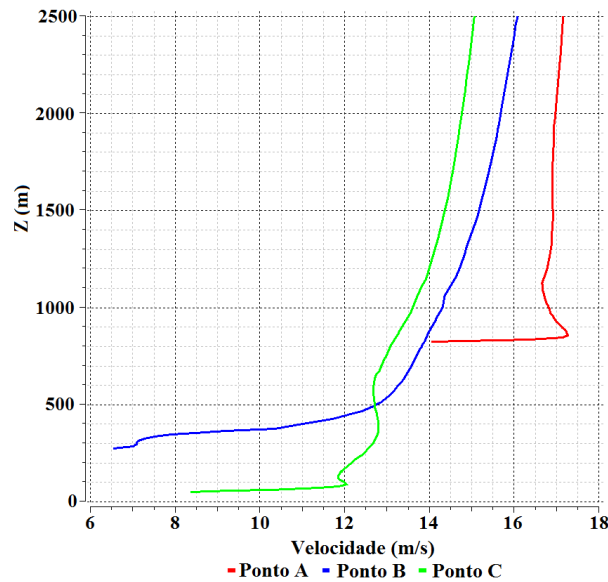


Fig. 17. Perfis de velocidade apresentados nos Pontos A, B e C.

3. RESULTADOS

A Fig. 16 apresenta o mapa com a altura do relevo, destacando três pontos aleatórios localizados em altitudes diferentes acima do nível do mar para a análise dos perfis de velocidade. O ponto A está localizado a uma altitude de 834 m, no pico da colina, o ponto B, em uma região mais plana, a uma altitude média de 334 m e o ponto C a uma altitude de 78 m localizado em um canal entre colinas. Estas características topográficas diferentes dos três pontos geram perfis diferentes de velocidade, responsáveis por esforços mecânicos nas torres e cabos das linhas de transmissão.

A Fig. 17 mostra os perfis de velocidade em função da altura para os pontos A, B e C, localizados em locais topográficos e alturas do solo diferentes. O perfil obtido para o ponto A, pelo fato de estar localizado no pico da colina, a uma altura de 834 metros, apresenta uma aceleração perto da superfície da terra, como registrado em outros estudos experimentais. Isto se deve ao fato das camadas superiores da atmosfera comprimir as camadas inferiores perto do solo, produzindo um aumento de velocidade nas

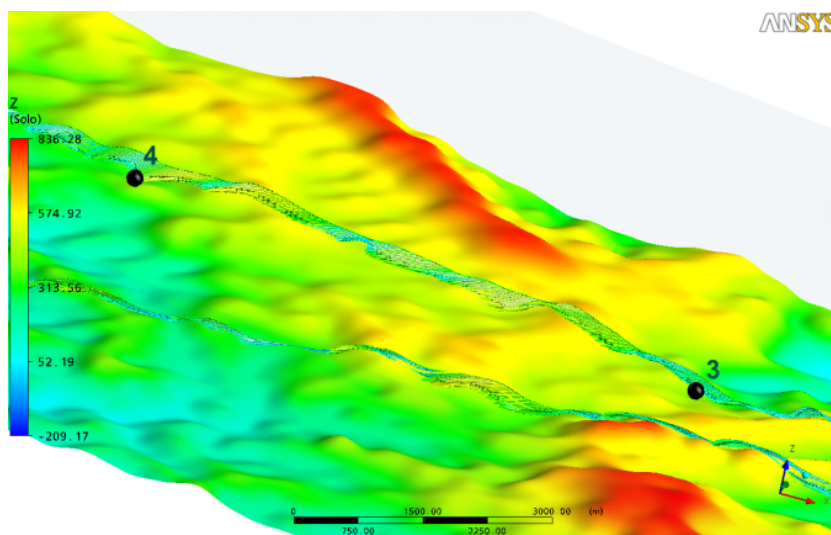


Fig. 18. Resultante da velocidade do vento para uma linha hipotética.

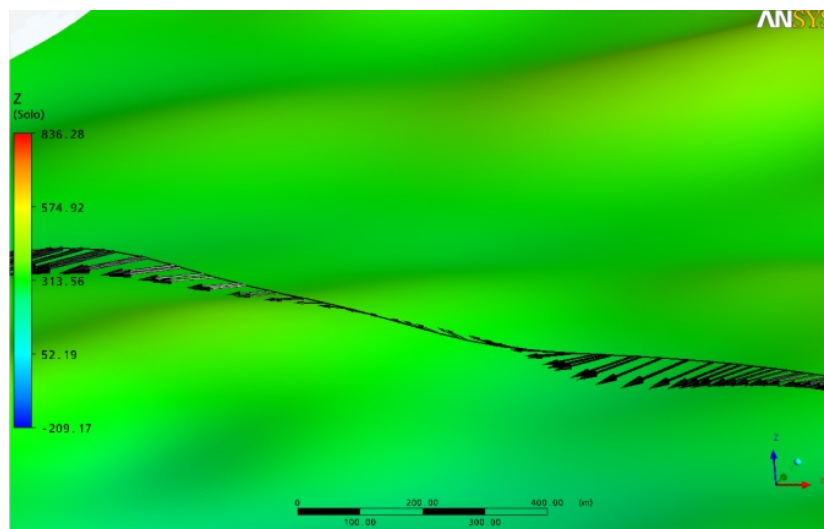


Fig. 19. Vetor resultante da velocidade de vento a 10 m de altura do solo ao longo da linha.

regiões mais altas do terreno. O ponto B apresenta um perfil bem comportado, bem próximo de um perfil parabólico. Este ponto, embora esteja a uma altura de 334 metros acima do mar, está localizado numa região mais plana, de forma que o perfil é pouco perturbado nas proximidades do solo. O ponto C está localizado em um canal de vento entre duas colinas e a uma altitude de 78 metros, apresentando um perfil de velocidade diferente, com um aumento de velocidade no canal e uma velocidade praticamente constante a partir de certa altura da atmosfera.

A Fig. 18 representa a topografia digitalizada de Acuruí com a resultante da velocidade do vento calculada via CFX para duas linhas localizadas a 50 metros de altura na mesma região. Os números 3 e 4 representam os pontos onde se encontram instaladas as estações climatológicas. A Fig. 19 apresenta em detalhes os vetores da resultante da velocidade ao longo de uma das linhas. Nota-se claramente a mudança de direção e intensidade da resultante da velocidade em função da topografia do terreno, devido aos efeitos de superfície do solo.

A Fig. 20 mostra os perfis de velocidade do vento no plano vertical (altitude) ao longo do domínio em estudo. Nota-se claramente que uma linha de transmissão seguindo esta trajetória, estaria sujeita à

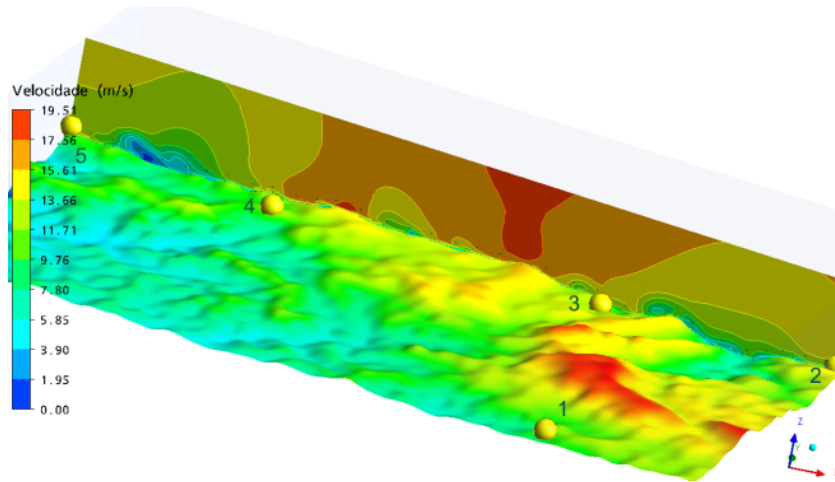


Fig. 20. Perfis de vento no plano vertical para a região perto do solo.

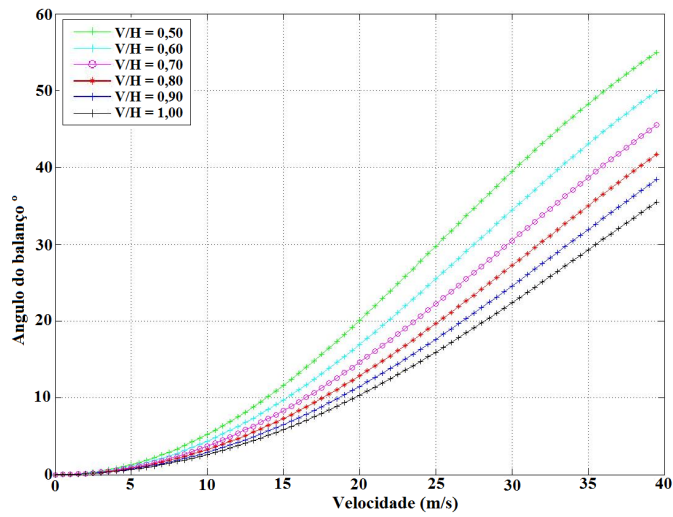


Fig. 21. Resultados obtidos para várias relações de vão de vento (V_p/V_v).

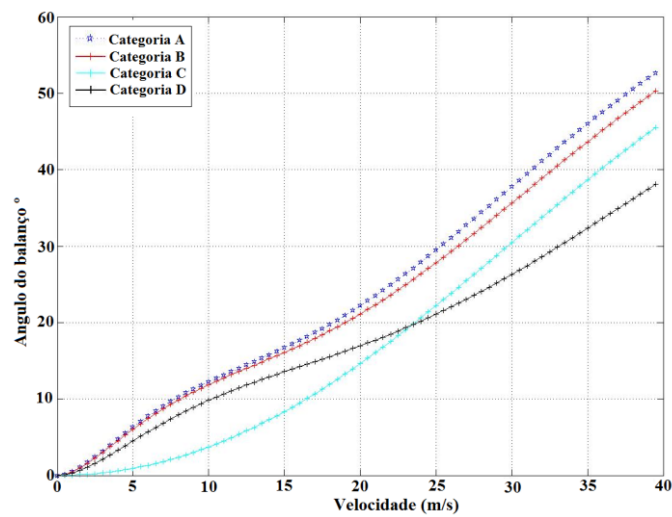


Fig. 22. Resultados obtidos para diversas categorias de terreno (rugosidades).

diferentes gradientes de velocidade, provocando vibrações e balanços nos cabos e, conseqüentemente, esforços nas torres de transmissão, que podem acarretar problemas sérios de transmissão. Os pontos indicam a localização das estações climatológicas instaladas na região.

O programa computacional desenvolvido para simular o ângulo de balanço de cadeias de isoladores pode utilizar tanto os valores dos campos de velocidade do vento provenientes do programa de modelagem de CLA (*Ansys CFX*), como também pode utilizar os dados experimentais provenientes de medições em campo. Os valores do ângulo de balanço calculados por norma a partir dos dados do modelo ou dos dados experimentais podem agora ser comparados com o ângulo medido experimentalmente em tempo real através do seu monitoramento em campo, para as várias condições de vento locais.

A entrada de dados experimentais no programa de cálculo do ângulo de balanço é realizada diretamente através da formulação de normas e métodos da literatura. A utilização de dados teóricos obtidos a partir das simulações da CLA deve ser feita a partir da leitura dos campos de direção e velocidade do vento para uma linha de transmissão, podendo-se calcular o ângulo de balanço das cadeias de isoladores.

As Figuras 21 e 22 apresentam resultados do cálculo do ângulo de balanço segundo diferentes tipos de cabo condutor e diversas categorias de terreno, respectivamente, definida em norma [10]. Esses resultados foram obtidos com dados da simulação da CLA, utilizando o programa computacional desenvolvido para cálculo teórico do ângulo de balanço. Os valores calculados podem ser obtidos segundo diferentes metodologias [13], como descrito anteriormente.

Os resultados obtidos para várias categorias de terreno são mostrados na Fig. 22.

Não foi possível ainda obter dados experimentais através do monitoramento do ângulo de balanço, pois algumas interferências geradas pelo campo elétrico da linha tem que ser eliminadas.

4. CONCLUSÕES

Diante da necessidade de melhorar os critérios atuais para cálculo do ângulo de balanço das linhas de transmissão de energia, a proposta deste trabalho mostrou-se inovadora no que diz respeito ao desenvolvimento do novo sensor e à metodologia computacional para tratamento regionalizado do ângulo de balanço.

A simulação via CLA se apresenta como ferramenta robusta para auxiliar o desenvolvimento de projetos de linhas ao possibilitar simular o comportamento de campos de velocidade de vento.

Num futuro próximo, os resultados das medições de ângulo de balanço e dados climatológicos constituir-se-ão num importante banco de dados para auxiliar nos estudos de coordenação de linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão e características.

São esperados melhorias nos estudos de linha com a aplicação de novas ferramentas computacionais, amparados numa base de dados experimentais. Em particular, os conceitos de CLA constitui-se campo de estudo promissor para otimização do projeto de linhas aéreas de transmissão.

REFERÊNCIAS

- [1] Liolyd, K.J., Zaffanella, L.E., *Insulation for switching surges*. In: EPRI - Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*, Sec. Edition, Palo Alto (1975)
- [2] Pettersson, P., Gidlund, J.I., Söderberg, L., "The effect of wind on flashover probability for transmission line". Cigre Report 22-03 (1988)
- [3] Priest, K.W., *General basis for computation of swing angle distributions*, General Electric Company, Schenectady, New York (1969)
- [4] Mors, H., *Wind pressure on overhead transmission lines conductors* - Hornisgrinde Testing Station, Paris (1956)
- [5] Pavel, F., Koji, F., Friedrich, K., Jan, R., Tower top geometry and mid span clearances. Technical Brochure, CIGRE, 2007. Cigre Working Group B2.06 (2007)

- [6] Moreira, G.A.A., “Modelagem numérica da camada limite atmosférica com validação experimental”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Maio (2007)
- [7] Guimarães, M.F., Nascimento, C.A.M., Valle, R.M., “Sistema de medição e registro em tempo real do ângulo de balanço de cadeia de isoladores de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica”. INPI. Pedido de patente N° 014090004080, 31 de agosto, 2009
- [8] Guimarães, M.F., Nascimento, C.A.M., Valle, R.M., Moreira, G.A.A., França, G.A.C., Lima, R., “Estudo do balanço de cadeias de isoladores de linhas aéreas - Parte I: Metodologia experimental para monitoramento em tempo real,” in Proc. 2010: I Seminário Nacional sobre Engenharia do Vento- SENEV, Belo Horizonte- MG.
- [9] Nascimento, C.A.M., “Aplicação de tecnologias de monitoramento em tempo real para aumentar a capacidade de transmissão em LTs Aéreas,” in Proc.2001: XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas – SP
- [10] Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, NBR 5422, ABNT, proposta de revisão da norma, Rio de Janeiro (2005)
- [11] CFX-12, Solver and Solver Manager Guide, AEA Technology Engineering Software Ltd, UK, 2009.
- [12] Guimarães, M.F., Nascimento, C.A.M., Valle, R.M., Moreira, G.A.A., França, G.A.C., Lima, R., “Estudo do balanço de cadeias de isoladores de linhas aéreas - Parte II: Cálculo via modelo de camada limite atmosférica,” in Proc. 2010: I SENEV - Seminário Nacional sobre Engenharia do Vento, Belo Horizonte – MG
- [13] Valle, R.M., "Simulação do ângulo de balanço utilizando dados experimentais existentes na literatura," Departamento de Eng. Mecânica- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, CA, Relatório Técnico. DEMEC P&D159_15, Nov. (2009)

CALCULATION AND MEASURING OF THE BALANCE ANGLE OF INSULATORS STRINGS FROM OVERHEAD TRANSMISSION

Abstract – In high voltage overhead lines, the isolation level depends on climatological and electrical parameters, such as the action of the wind over its components, air pollution and humidity, environmental temperature and pressure, etc. The goal of this work is to calculate the swing angle of the insulators chain due to the wind action, which is an important parameter on the study of the isolation level of high voltage overhead lines. Several theoretical methodologies were applied to calculate the swing angle and results are presented. An experimental methodology is also developed for the calculus and monitoring of the swing angle due to the wind action. A prototype sensor to monitoring the swing angle of the insulators chain was built and installed in the high voltage overhead line. In parallel, a commercial computational fluid dynamic (CFD) software was used to model the atmospheric boundary layer to obtain the wind field. It was also developed a computer code to determine the theoretical swing angle. Experimental data were used to implement the boundary conditions.

Keywords – Insulators, Swing angle, Atmospheric Boundary Layer, Real Time Monitoring.