

Estudo Regionalizado do Balanço de Cadeias de Isoladores devido à Ação do Vento

M. F. Guimarães¹, C. A. M. Nascimento¹, R. M. Valle², G. A. C. França²,

R. Lima² e G. A. A. Moreira²

Resumo – Este trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento de uma metodologia teórica e experimental para cálculo e monitoramento do ângulo de balanço de cadeias de isoladores em linhas aéreas de transmissão devido à ação do vento. Foi desenvolvido um protótipo de sensor de monitoramento de balanço de cadeias e instalada um sistema de monitoramento com sensores climatológicos numa linha de alta tensão 138 kV da Cemig. 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. Também foi desenvolvido um programa computacional para cálculo teórico do ângulo de balanço, utilizando diferentes condições de entrada e segundo diferentes normas e dados experimentais de vento.

Palavras-chave – Coordenação de Isolamento, Cadeia de Isoladores, Ângulo de Balanço, Camada Limite Atmosférica, Monitoramento em Tempo Real.

I. INTRODUÇÃO

Em linhas aéreas de alta tensão, o nível de isolamento depende, em parte, da ação do vento sobre seus componentes e, sabidamente, de outras variáveis de natureza elétrica, ambiental e climatológica, tais como poluição, umidade relativa do ar, pressão e temperatura ambiente [1], [2]. No projeto desenvolvido buscou-se determinar o ângulo de balanço da cadeia de isoladores em suspensão devido à ação dos ventos em linhas aéreas de transmissão, visando sua aplicação em estudos de coordenação de isolamento.

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 "T", conforme ilustrado na figura 1. 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).



Figura 1. Balanço de cadeias de suspensão devido ao vento.

Atualmente, existe a necessidade de se realizar adaptações nos modelos de cálculo[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 Atmosférica - CLA e o efeito da componente vertical da velocidade do vento.

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

Dentro do contexto ora exposto, foi desenvolvido o projeto P&D-159, onde foi aplicado o conhecimento da CLA na determinação da velocidade do vento e do balanço regionalizados, tendo a região de Acuruí – MG como campo de teste. Outro foco de desenvolvimento do P&D-159 foi o sistema de monitoramento e registro do ângulo de balanço da cadeia de isoladores, o qual deu origem a um pedido de

Informações sobre o projeto de P&D: "Estudo regionalizado da ação do vento no balanço de cadeias de isoladores para projeto de coordenação de isolamento de linhas aéreas de transmissão" - P&D-159 (Código Aneel 0049-113/2005); CEMIG D; UFMG; Ciclo 2004-2005. Em andamento.

¹ CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. (e-mails: mauris@cemig.com.br; camn@cemig.com.br).

² UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – Depto de Engenharia Mecânica (e-mail: ramon@demec.ufmg.br; gacf@demec.ufmg.br; gilbertomoreira@ufmg.br; rlima@cpdee.ufmg.br).

patente [7]. Com o sistema 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.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Sensor de Balanço: funcionamento

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, taxa de giro, o IMU permite 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 celulares.

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, conforme ilustração da figura 2: emissor e receptor.

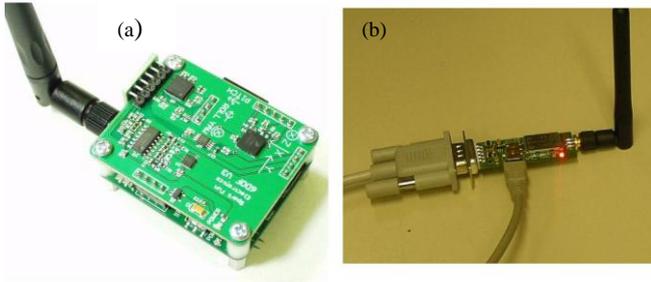


Figura 2. Plataforma inercial Sparkfun (a) circuito transmissor com sensores e (b) circuito receptor

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 figura 3.

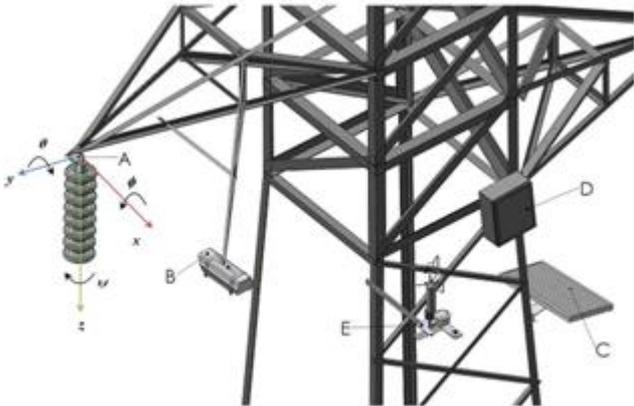


Figura 3. Plataforma inercial e grandezas medidas. (A) sensor ângulo de balanço/emissor IMU na cadeia de suspensão; (B) câmera digital; (C) painel solar; (D) *datalogger*, receptor IMU, bateria e modem; (E) sensores de radiação solar, temperatura, velocidade de vento 3D e pressão atmosférica.

O sensor emissor possui unidades tridimensionais 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, para a qual se assume comporta-se como um corpo rígido, é necessário conhecer apenas os ângulos ϕ e θ apresentados da figura 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 em (1), e pela projeção de aceleração da gravidade, dado em (2) e (3):

$$\begin{cases} \dot{\phi} = p + q \tan \theta \sin \phi + r \tan \theta \cos \phi \\ \dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} = q \frac{\sin \phi}{\cos \theta} + r \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} A_x = g \sin \theta \\ A_y = -g \sin \phi \cos \theta \\ A_z = -g \cos \phi \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \theta_a = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right) \\ \phi_a = \arcsin\left(\frac{A_y}{-g \cos \theta}\right) \end{cases} \quad (3)$$

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 medida dadas pela IMU; e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade.

A partir de (1), 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 de (2).

Na condição de velocidade angular constante ou nula, os ângulos θ e ϕ podem ser obtidos diretamente de (2). Entretanto, para obter medição numa ampla faixa é necessária uma fusão de dados dos girômetros e acelerômetros por meio de filtragem complementar, conforme indicado no diagrama de blocos da

figura 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.

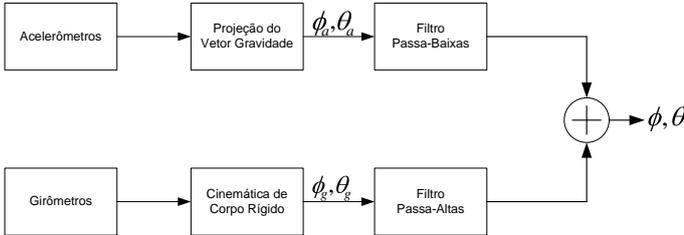


Figura 4. Diagrama de blocos do esquema de filtragem complementar.

B. Sensor de Balanço: calibração

A calibração da plataforma inercial para medição em tempo real do ângulo de balanço de cadeia de isoladores foi realizada comparando resultados das medições o desempenho 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 figura 5. Um computador com duas portas seriais permite a conexão e a aquisição simultânea de dados das duas plataformas.



Figura 5. Plataformas Crossbow e Sparkfun fixadas para calibração.

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 estão apresentados os dados das plataformas para o eixo x e o erro relativo da medição. A linha vermelha representa os dados da plataforma *Crossbow* e a linha verde representa os dados da plataforma *Sparkfun*. 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%.

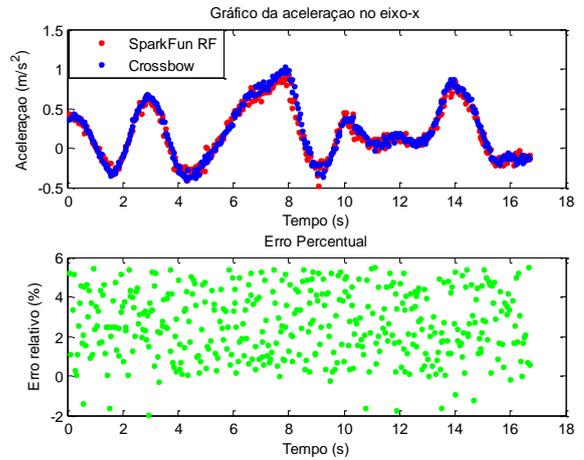


Figura 6. Erro obtido para a aceleração.

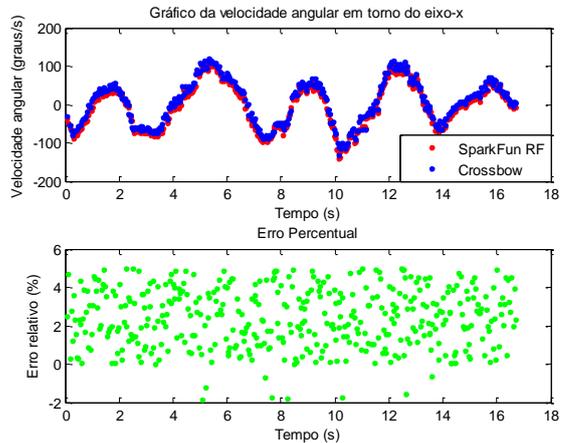


Figura 7. Erro obtido para a velocidade angular.

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.

C. Sistema de monitoramento de Balanço e Dados Climatológicos

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 unidade de aquisição e comunicação de dados, sensor de balanço, sensores climatológicos, câmara de registro de imagem e sistema de alimentação. O diagrama simplificado da figura 8 apresenta o sensor de balanço integrado 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 lógi-

co do *datalogger* dispara a câmera, iniciando uma sequência 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.

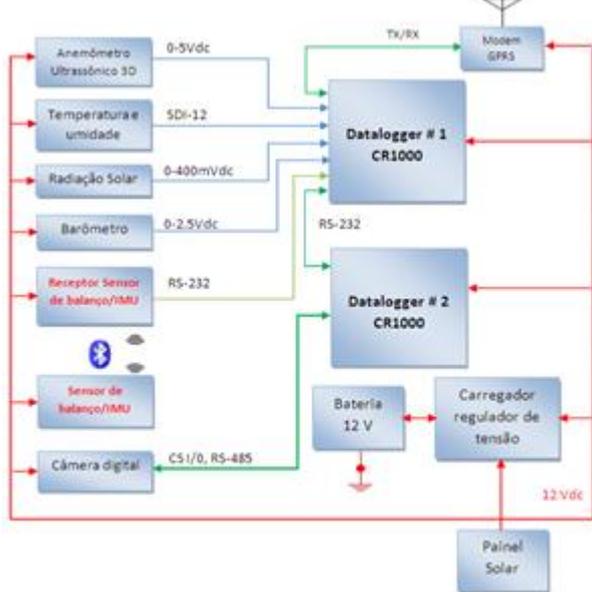


Figura 8. Arquitetura do sistema de monitoramento de balanço.

A montagem dos componentes do sistema em laboratório está apresentada na figura 9.

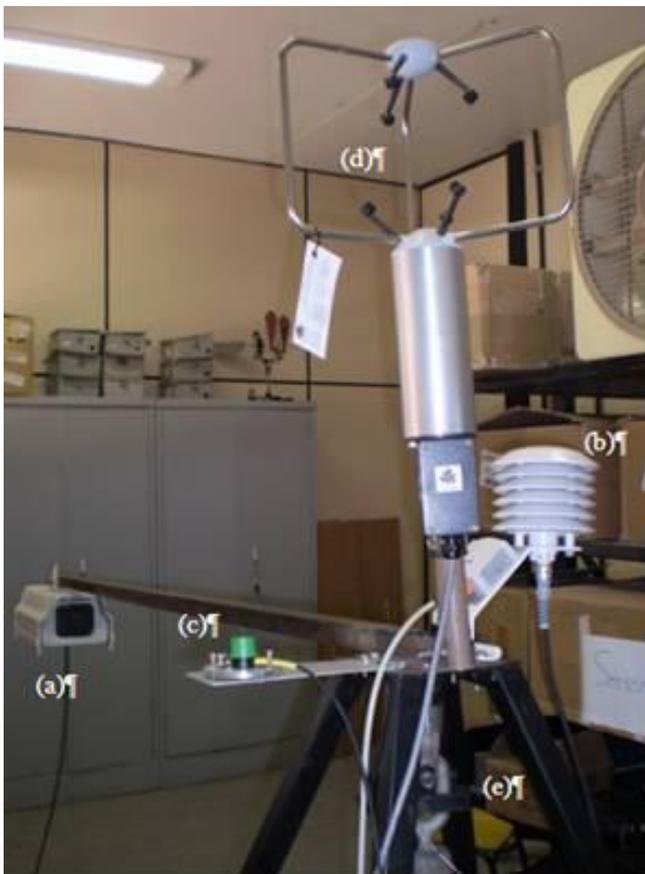


Figura 9. Montagem experimental em laboratório: (a) câmera digital; (b) sensor de umidade e temperatura; (c) sensor de radiação solar; (d) sensor de velocidade de vento; (e) sensor ângulo de balanço junto à cadeia de isoladores.

As figuras 10 e 11 mostram o comportamento das acelerações e das velocidades angulares da cadeia obtidas em laboratório. Um pequeno impulso foi fornecido à cadeia durante a aquisição de sinais por um certo período de tempo. Na figura 11 está apresentado o sinal de valores dos ângulos de inclinação após filtragem do conjunto de dados (ϕ_a , θ_a) e (ϕ_g , θ_g).

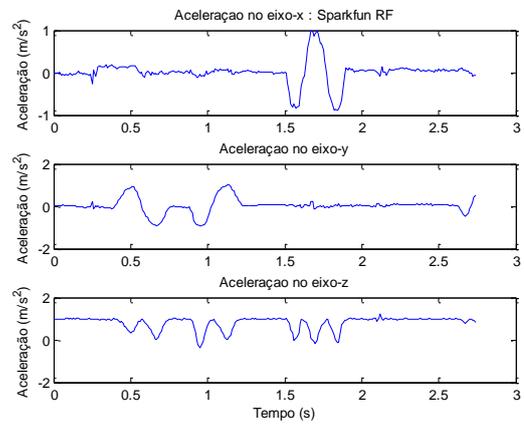


Figura 10. Acelerações calculadas para cadeia de isoladores nas três direções.

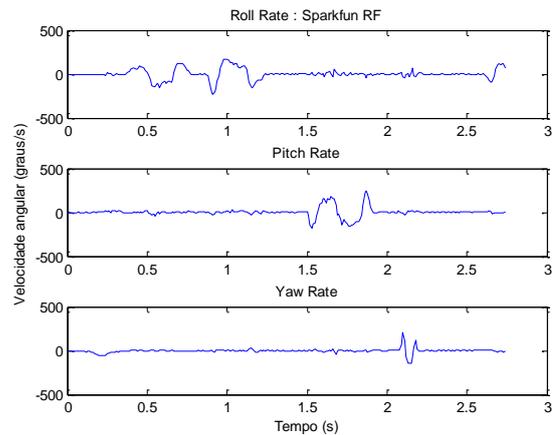


Figura 11. Velocidades angulares calculadas para a cadeia de isoladores.

D. 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 (figura 12). Foi instalada, a 10 m de altura, uma estação climatológica (Figura 13). Alguns ajustes são necessários na montagem piloto para garantir funcionamento adequado ao ambiente eletromagnético agressivo da linha.



Figura 12. Instalação do sistema de medição de balanço.



Figura 13. Sensores climatológicos instalados na estrutura 138 kV

E. Cálculo 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 a seguir:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\left(\frac{\rho V_R^2}{2} \right) \cdot C_c \cdot V_v \cdot D + \left(\frac{\rho V_R^2}{2} \right) \cdot C_i \cdot S_i / 2}{p V_p + P_i / 2} \right) \quad (4)$$

onde:

ϕ é ângulo de balanço da cadeia;
 ρ é massa específica do ar (kg/m^3);
 V_R é a velocidade do vento (m/s);
 C_c é o coeficiente de arrasto para cabos, geralmente igual a 1;
 D é o diâmetro do condutor (m);
 p é o peso unitário do condutor (N/m);
 S_i é a área da envoltória da cadeia de isoladores (m^2);
 C_i é o coeficiente de arrasto para isoladores, geralmente igual a 1,2;
 P_i é o peso da cadeia de isolares (N);
 V_v é vão de vento (m);
 V_p é o vão de peso (m)

Nos casos em que é pequena a influência das dimensões da cadeia de isolares, (4) pode ser simplificada para:

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

A expressão acima 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] aparece reproduzido na figura 14.

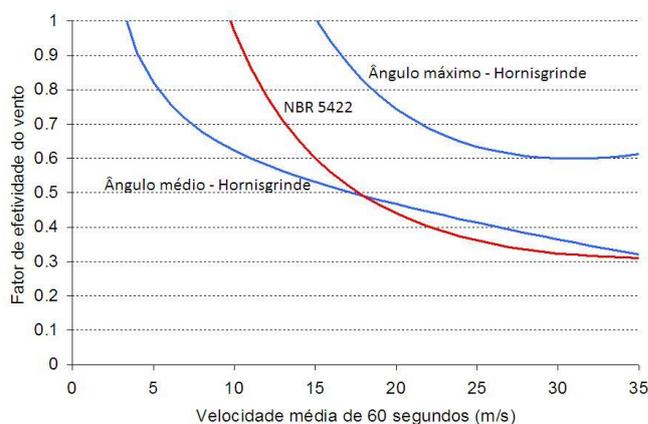


Figura 14. Fator de efetividade do vento.

Foi desenvolvido um programa computacional para simular o ângulo de balanço de cadeias de isoladores que permite a utilização de dados experimentais, lidos a partir de bancos de dados de vento medidos em campo, ou a utilização de dados teóricos, provenientes da saída de dados do programa de modelagem de CLA (Ansys CFX), conforme explicitado a seguir.

F. Metodologia CLA aplicada ao cálculo do 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 localizados geometricamente por estes volumes. Os campos de velocidade e direção do vento obtidos da simulação numérica podem ser utilizados diretamente para o cálculo do ângulo de balanço de cadeias de isoladores, permitindo comparar estes valores com os calculados pelas normas.

A região de Acuruí – MG foi escolhida como domínio de estudo, por contar com estações climatológicas, a partir das quais foram estabelecidas as condições de contorno [12]. A figura 15 apresenta a região de estudo com localização com posição relativas das linhas de transmissão 138 kV e estações climatológicas.

A malha de elementos finitos utilizada na simulação é apresentada nas figuras 14 e 15. A figura 17 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 constituída de 1.332.439 nós e 4.395.712 elementos.



Figura 15. Região de Acuruí e domínio de estudo e ponto com medição de dados climatológicos.



Figura 16. Malha final utilizada na simulação numérica.

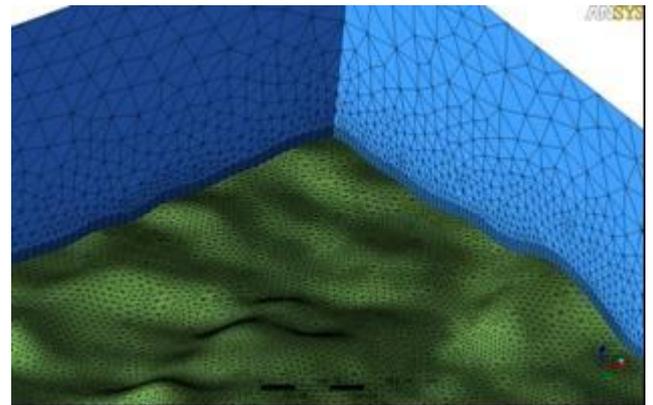


Figura 17. Detalhe da malha no solo e a sua progressão no plano vertical.

A figura 18 apresenta o mapa com dados de altura do relevo e, em destaque, três pontos aleatórios com 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, de menor altitude, a 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.

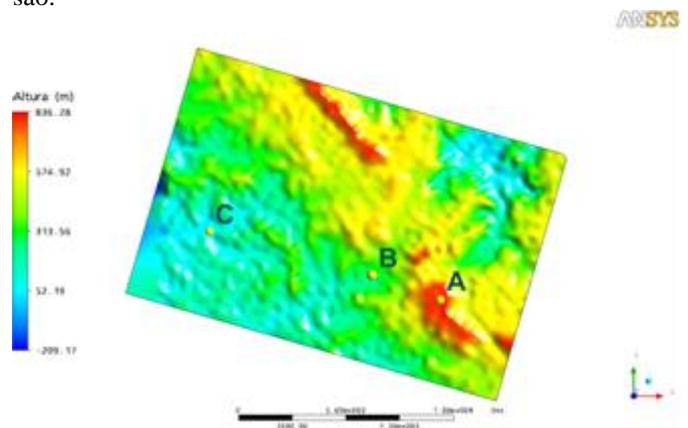


Figura 18. Topografia digitalizada de Acuruí contendo três pontos com altitudes diferentes.

A figura 19 mostra os perfis de velocidade em função da altura da atmosfera para os pontos A, B e C, localizados em locais topográficos e alturas do solo diferentes. O perfil ob-

tido 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 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.

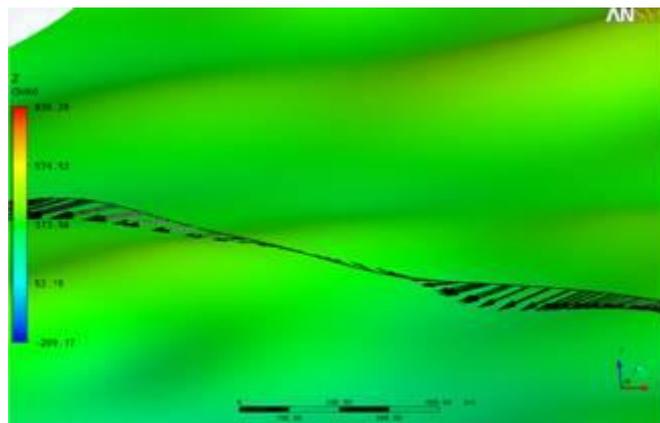


Figura 21. Vetor resultante da velocidade de vento

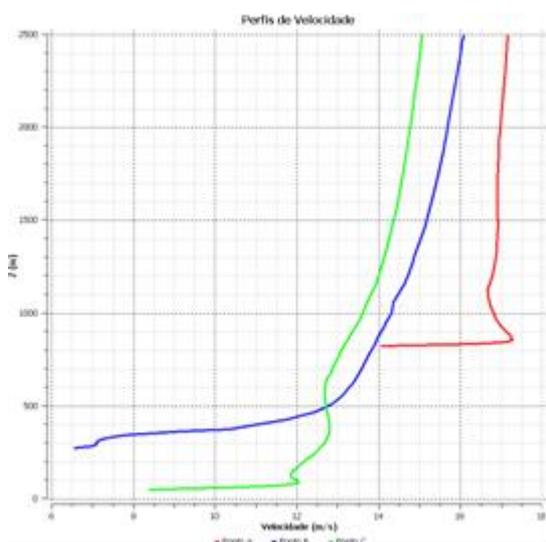


Figura 19. Perfis de velocidade apresentados nos Pontos A, B e C.

A figura 20 representa a topografia digitalizada de Acuruí com a resultante da velocidade do vento calculada via CFX, seguindo uma linha hipotética, obtida a partir das três componentes da velocidade do vento. A figura 21 apresenta em detalhes os vetores da resultante da velocidade. Nota-se claramente a mudança de direção do vetor em função da topografia do terreno, devido aos efeitos de superfície do solo.

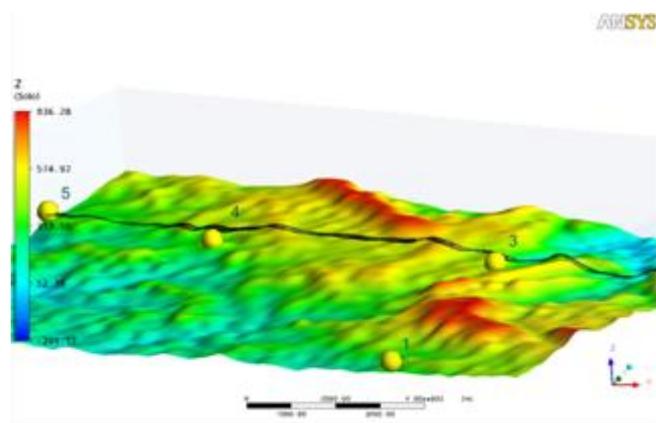


Figura 20. Topografia digitalizada de Acuruí. Com resultante da velocidade do vento para uma linha hipotética.

O programa computacional desenvolvido para simular o ângulo de balanço de cadeias de isoladores utiliza os valores dos campos de velocidade do vento, provenientes da saída de dados do programa de modelagem de CLA (*Ansys CFX*).

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 18 e 19 apresentam resultados do cálculo do ângulo de balanço segundo diferentes tipos de cabo condutor e diversas categorias de terreno definida em norma [10]. Esses resultados foram obtidos com dados da simulação da CLA e utilizando o programa computacional desenvolvido para cálculo teórico do ângulo de balanço. Os valores calculados são coerentes segundo diferentes metodologias [13].

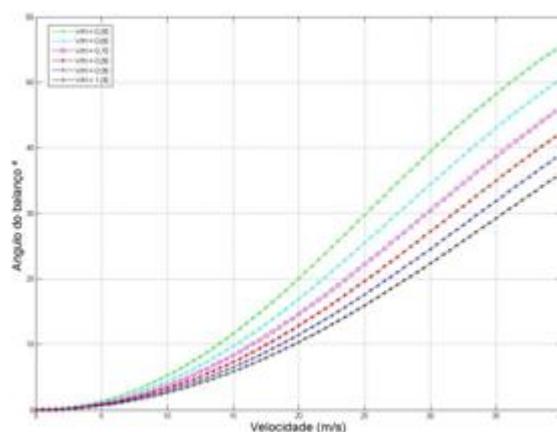


Figura 22. Ângulo de balanço em função da relação V_p/V_v

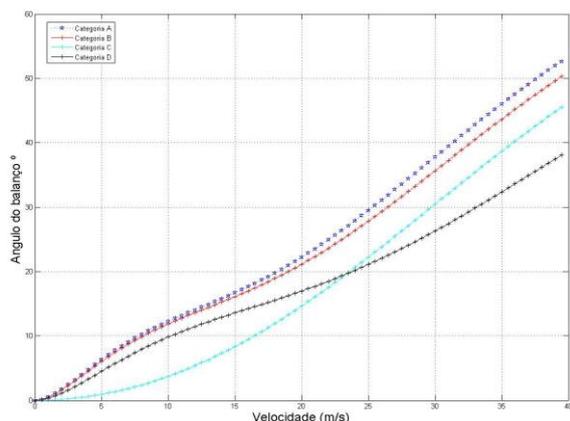


Figura 23. Ângulo de balanço em função da relação da categoria de terreno

III. 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. Foi desenvolvido um novo sensor e uma 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 mais adequados 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 ordenação 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.

IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do corpo técnico da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) recebidas durante todo o desenvolvimento da pesquisa e, também, ao apoio financeiro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. J. Liolyd, L. E. Zaffanella, *Insulation for switching surges*. In: EPRI - Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*, Sec. Edition, Palo Alto: 1975, p. 535.
- [2] P. Pettersson, J. I. Gidlund, L. Söderberg, "The effect of wind on flashover probability for transmission line". Cigre Report 22-03, 1988.
- [3] K. W. Priest, General basis for computation of swing angle distributions. General Electric Company, Schenectady, New York (1969).
- [4] H. Mors, Wind pressure on overhead transmission lines conductors - Hornsgrinde Testing Station, Paris (1956).

- [5] F. Pavel, F. Koji, K. Friedrich, R. Jan, Tower top geometry and mid span clearances. Technical Brochure, CIGRE, 2007. Cigre Working Group B2.06, 2007.
- [6] G. A. A. Moreira, "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] M. F. Guimarães, C. A. M. Nascimento, R. M. Vale, "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] M. F. Guimarães, C. A. M. Nascimento, R. M. Vale, G. A. A. Moreira, G. A. C. França, R. Lima, "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] C. A. M. Nascimento, "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] M. F. Guimarães, C. A. M. Nascimento, R. M. Vale, G. A. A. Moreira, G. A. C. França, R. Lima, "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] R. M. Vale, "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.