



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SIGLA GDS

AValiação DO COMPRIMENTO DE ARCOS ELÉTRICOS GERADOS ARTIFICIALMENTE DE TÉCNICAS DE VISÃO COMPUTACIONAL

Gilmário B. Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina

Maria Cristina Tavares^(*)
UNICAMP

Clésio L. Tozzi
UNICAMP

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma abordagem inédita de visão computacional para o rastreamento e medição do comprimento de arcos elétricos artificialmente gerados em torres de alta tensão reais e capturados através de um par de câmeras calibradas. Os arcos elétricos apresentam alongamento expressivo e são produzidos no Laboratório de Alta Tensão do CEPEL a céu aberto utilizando torres reais. Desta forma as técnicas apresentadas em trabalhos anteriores para rastreamento de arcos curtos gerados em ambientes confinados não podem ser aplicadas aos arcos tratados na presente pesquisa. Para fins de avaliação foram realizados experimentos sobre imagens sintéticas obtidas a partir da simulação de um sistema de aquisição de imagens, bem como experimentos com imagens de arcos elétricos reais produzidos artificialmente. Os resultados obtidos foram considerados aceitáveis, demonstrando o potencial da abordagem apresentada.

PALAVRAS-CHAVE

Religamento monopolar, Arco elétrico, Comprimento do arco, Visão computacional

1.0 - INTRODUÇÃO

A manobra de abertura e religamento monopolar para eliminação de defeito monofásico ainda não é utilizada pela grande maioria das empresas de transmissão no Brasil, apesar das características do sistema elétrico brasileiro serem adequadas para este tipo de manobra. A partir do ano 2000 a ANEEL impôs que as novas linhas de transmissão fossem projetadas de modo a que a manobra de religamento monopolar (MRM) tivesse uma alta probabilidade de sucesso. Desde então estudos relacionados à manobra passaram a ser uma preocupação no setor e a forma como os estudos eram rotineiramente realizados passaram a ser questionados.

Quando os projetos de linha são otimizados, estas otimizações são restringidas por critérios conservativos de análise da MRM, cujo fenômeno mais importante corresponde à extinção do arco secundário. Os critérios utilizados indicam se e quais estratégias podem ser utilizadas para assegurar uma MRM bem sucedida, ou, em outras palavras, se ocorrerá a extinção do arco secundário dentro do tempo morto estabelecido. Cálculos imprecisos podem levar não somente a soluções superdimensionadas, mas também a soluções erradas ou inapropriadas.

Em 2003 FURNAS iniciou um projeto P&D ANEEL, ainda em desenvolvimento, coordenado pelo Prof. Carlos Portela da COPPE/UFRJ, cujo objetivo consiste em desenvolver um modelo robusto e confiável para o arco elétrico no ar. A UNICAMP participa das pesquisas e os experimentos são realizados nas instalações do CEPEL de Adrianópolis.

Dentre os parâmetros importantes para a modelagem do arco elétrico pode ser destacado o seu comprimento, que, por exemplo, pode aumentar de 4 a 5 vezes num intervalo de 1 s o seu comprimento inicial em função de

(*) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Av Albert Einstein, 400 – Campinas, SP - 13083-852 – Brasil. Tel: (+55 19) 3521-3738 – Fax: (+55 19) 3521-3866 – Email: cristina@dsce.fee.unicamp.br

condições atmosféricas e da amplitude da corrente do arco. Em [1, 2, 3] é discutida a importância do alongamento no modelo do arco elétrico bem como é apresentado o modelo do arco propriamente dito. Outros trabalhos relacionados à modelagem do arco podem ser encontrados em [4] a [9].

Dentre as várias medidas realizadas durante os experimentos foi feito o registro visual dos arcos através de duas filmadoras localizadas em posições distintas de modo a capturar vistas diferentes do arco. Análises iniciais indicaram que o arco sofria um grande alongamento durante o experimento e iniciou-se uma pesquisa em paralelo para se quantificar o comprimento do arco.

Existem formas de se estimar o alongamento do arco a partir de medições elétricas, especificamente tratando-se a variação da tensão entre os terminais do arco, mas esta técnica não permite quantificar o comprimento, mas sim tão somente identificar a variação do comprimento multiplicado por uma constante desconhecida.

Como no experimento havia disponíveis duas imagens do arco vistas de pontos distintos verificou-se a possibilidade de se aplicar técnicas de tratamento de imagens, mais especificamente de visão computacional, para se identificar a configuração tridimensional do arco, e, como consequência, obter o comprimento do arco. Deste modo iniciou-se uma pesquisa para determinação do comprimento do arco ao longo do experimento aplicando técnicas de visão computacional.

Na próxima seção é feita a descrição resumida do modelo matemático utilizado e são analisados alguns trabalhos anteriores. Na Seção 3 são apresentadas as etapas de validação do processamento de imagens utilizadas na presente pesquisa. Na Seção 4 o experimento analisado é descrito e na seção 5 são apresentados os resultados obtidos com os experimentos realizados no CEPEL e as principais conclusões da pesquisa são resumidos na seção 6.

2.0 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

2.1 2. – Análise de Pesquisas Anteriores

Apesar de não se voltarem ao problema da medição do comprimento de arcos elétricos, os trabalhos [10] a [14] apresentam alguns resultados importantes no campo da análise de arcos elétricos com base em imagens. Porém, devido às características específicas das técnicas de tratamento de imagens destes trabalhos não foi possível aplicar as metodologias aos arcos tratados na presente pesquisa. Em [10] – [14] os trabalhos são voltados basicamente ao estudo de trajetórias de descargas elétricas curtas, de comprimento não superior a 1,0 m, predominantemente longilíneas, produzidas em ambiente confinado e controlado. Desta forma os arcos são gerados dentro de um laboratório e os equipamentos de medição são posicionados em locais especificados para facilitar a reconstrução tridimensional dos arcos.

Por exemplo, em [10], [11] e [12], um prisma é utilizado no sistema de aquisição; em [13] três câmeras são posicionadas a 120° entre si, com o mesmo ângulo em relação à vertical, e [14] considera a existência de características de arcos que não são verificadas nos arcos analisados nesta pesquisa.

A abordagem proposta neste trabalho foi motivada pela falta de estratégias eficientes para o tratamento do problema de medição do comprimento de arcos elétricos longos (comprimento inicial de 4,0 m) gerados em ambiente a céu aberto. Desta forma os arcos aqui tratados não são longilíneos, apresentam formas anoveladas que se desprendem do corpo principal do arco, sendo gerados no alto de torres de 500 kV especialmente construídas para os ensaios. As imagens são capturadas tendo como fundo o céu, muitas vezes nublados, o que implica num tratamento inicial do objeto a ser analisado. Além disto, os arcos se movem de modo aleatório, muitas vezes se posicionando atrás das estruturas das torres, dificultando a análise das imagens.

3.0 - METODOLOGIA PROPOSTA – SNAKE-3D

A metodologia aplicada [15] – [17] é baseada no modelo bidimensional proposto em [18], chamada de Snake-2D, que consiste em utilizar técnicas de minimização de erros para se identificar uma silhueta, como, por exemplo, a silhueta da costa de um país.

No caso da aplicação desta técnica para objetos tridimensionais conhece-se no mínimo um par de imagens 2D do objeto e o sistema de coordenadas para cada vista. Alguns pontos do objeto devem ser identificados nas duas vistas (pontos homólogos) e projetados no espaço através da matriz de coordenadas conhecida. O método irá deslocar os pontos homólogos no espaço de modo que as imagens geradas em cada plano coincidam com as vistas (quadros) capturadas. Quando isto ocorrer o objeto 3D terá sido obtido Figura 1.

A primeira imagem do arco tem a forma de uma reta, sendo facilmente identificados os pontos extremos do arco, os primeiros pontos homólogos. O arco é então dividido em pequenos trechos e cada extremo dos trechos passam a ser pontos homólogos. Na nova imagem capturada estes pontos homólogos sofrem um pequeno deslocamento e podem ser facilmente rastreados, principalmente se a taxa de amostragem da filmagem for elevada, ou se o objeto não sofrer grandes variações no tempo, sendo que esta última característica não ocorre para os arcos analisados no estudo. Novamente se projetam os homólogos no espaço e superpõem-se no espaço os pontos conhecidos e retroprojetam-se as imagens do objeto em cada vista 2D. Caso necessário novas curvas 3D são geradas até que

as imagens obtidas pela projeção do objeto e as imagens capturadas coincidam. Este processo se repete para cada par de imagens obtidas na filmagem.

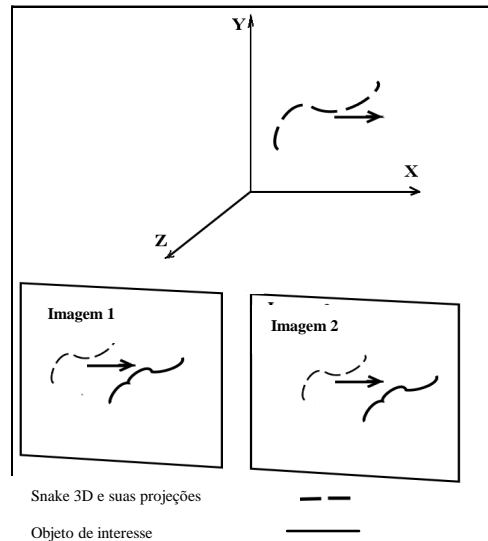


Figura 1 - A 3D-snake é deslocada/deformada no espaço 3D para que suas projeções coincidam com as imagens 2D (os quadros das filmagens).

Conhecendo-se o objeto para cada par de quadros da filmagem é possível, por exemplo, medir o comprimento do objeto. Este comprimento será tão mais próximo do valor real se as seguintes condições forem plenamente atendidas:

- A matriz de coordenadas for conhecida;
- As imagens forem obtidas numa taxa de amostragem tal que o deslocamento dos homólogos entre duas imagens não implique em erros de posicionamento acentuado;
- As imagens correspondam ao mesmo instante de tempo, ou seja, que as filmagens estejam sincronizadas e tenham se iniciado no mesmo instante de tempo.

3.1 – Validando a metodologia proposta

Para verificar a validade da metodologia quando as condições ideais fossem atendidas o método foi aplicado a um sistema sintético. Neste sistema um conjunto de objetos representados por curvas matemáticas no espaço foi gerado e as projeções das curvas analisadas (Figura 2).

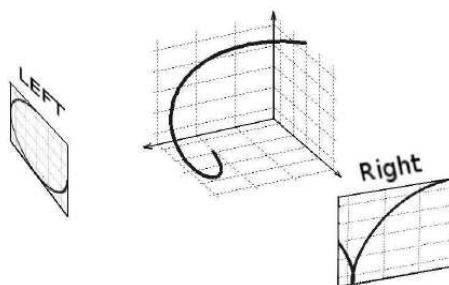


Figura 2 – Curva no espaço 3D projetada nas vistas esquerda - direita

O objeto inicial tinha uma forma longilínea que se tornava mais complexa ao longo do tempo, de modo a incorporar algumas das características observadas nos arcos, como ondulações no espaço e formação de laços (ou novelos).

Os comprimentos destas curvas foram obtidos e comparados com os comprimentos reais dos objetos, tendo sido encontrados erros da ordem de 3 %, sendo maiores para objetos mais ondulados.

Novos experimentos foram realizados em condições bem controladas, mas neste estágio com objetos reais e filmagens. Estes experimentos consistiram na filmagem do movimento de uma fita de néon através de duas filmadoras com alta taxa de amostragem (1000 quadros/s) no laboratório da UNICAMP. Placa com uma grade com coordenadas conhecidas foram posicionadas atrás do objeto de interesse. Neste experimento foram introduzidas a obtenção da matriz de coordenadas e a aplicação da metodologia a um objeto real. Nestes casos as filmadoras foram disparadas no mesmo instante e se encontravam sincronizadas. Além disto o objeto movia-se lentamente frente à taxa de amostragem das filmadoras, sendo baixo o erro devido ao deslocamento dos pontos homólogos.

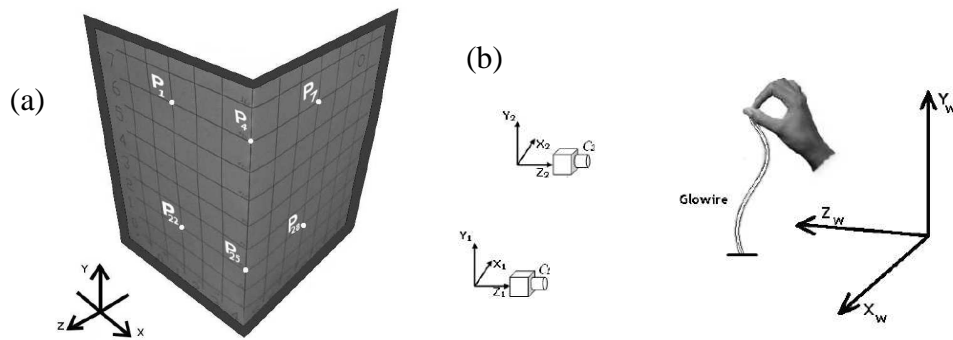


Figura 3 – (a) Padrão de calibração; (b) Par de câmeras posicionadas e exemplificação do fio néon.

O comprimento do objeto foi medido segundo a metodologia desenvolvida (Snake-3D: $146,2 \pm 0,5$) mm e através de medição física ($151,1 \pm 0,5$) mm.

Finalmente a metodologia proposta foi aplicada à medição do comprimento do arco elétrico gerado artificialmente.

4.0 - DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE ARCO SECUNDÁRIO

Em 2003 deu-se início a um projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico”, detalhado em [1], que tem como parceiros tecnológicos FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., da qual a pesquisa integra a carteira de P&D no segmento geração, coordenada pela COPPE/UFRJ, com participação da UNICAMP – atuante no desenvolvimento teórico e suporte técnico, e o CEPEL, responsável pela execução da parte experimental, que vem sendo realizada em instalações especialmente construídas para essa pesquisa na unidade de Adrianópolis (Figura 4) .

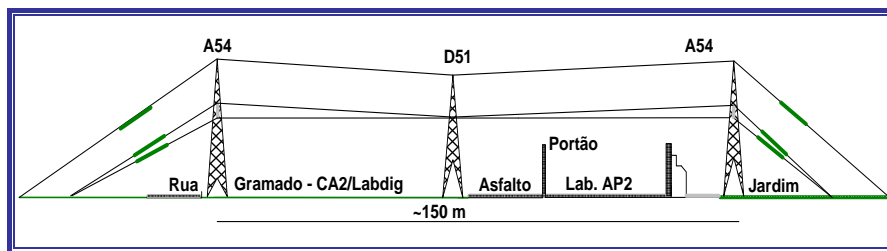


Figura 4 – Representação simplificada dos vãos experimentais de 500 kV.

Nos ensaios deseja-se reproduzir um número significativo de arcos elétricos, envolvendo uma grande gama de correntes de polaridade e amplitude distintas, dentre outras variáveis, para estudo e desenvolvimento do modelo de arco elétrico no ar que retrate diversas condições relacionadas a LT's de 500 kV, mas cobrindo também os aspectos físicos gerais de linhas de transmissão, tal que permita a extrapolação dos resultados para outros níveis de tensão e para concepções não convencionais de LT's, incluindo soluções provavelmente adequadas para a evolução futura da rede elétrica brasileira. Nos ensaios foram utilizados fonte de tensão de 60 Hz mais gerador de impulsos de corrente.

Parte do arranjo experimental destinado ao projeto (Figura 4) é composto por basicamente três torres, cabos fase e pára-raios, cadeias de isoladores e demais equipamentos necessários para formar um trecho de linha de transmissão característico do sistema classe 500 kV de FURNAS. A montagem dos vãos experimentais foi realizada por FURNAS. Outras partes utilizadas no arranjo pertencem à infra-estrutura laboratorial do CEPEL, sendo que o gerador de impulsos de corrente foi especialmente construído no local, tendo inclusive sofrido diversas modificações ao longo do desenvolvimento do projeto. Os sistemas de medição de corrente e tensão elétrica em corrente alternada e de impulso que foram instalados demandaram condições inéditas para aplicação externa em meio a campos eletromagnéticos intensos, com altas taxas de variação no tempo.

Em cada ensaio, a corrente de arco é obtida por sobreposição de uma corrente “sustentada” (i_s) e impulsos de corrente (i_i). A corrente “sustentada” (i_s) é aproximadamente sinusoidal e de amplitude constante, com duração de 1 s. Para arcos na vizinhança de cadeias de suspensão em I, cadeias de ancoragem e entre cabo pára-raios e cabo de fase, determinou-se a execução de ensaios para onze valores de i_s , na faixa entre 10 A e 10 kA. Para arcos na vizinhança de cadeias de suspensão em V, são seis valores de i_s , na mesma faixa de corrente (10 A e 10 kA).

4.1 Processamento de Imagens

A partir das duas filmagens dos arcos foi aplicada a metodologia desenvolvida para reconstrução 3D do arco.

O primeiro passo do processo consistiu na separação dos quadros do par de vídeos do arco elétrico determinando uma sequência de pares de imagens em tons de cinza. Estas imagens são processadas para a determinação do respectivo eixo-médio longitudinal, separando o objeto de brilho intenso do restante das imagens (Figura 5).

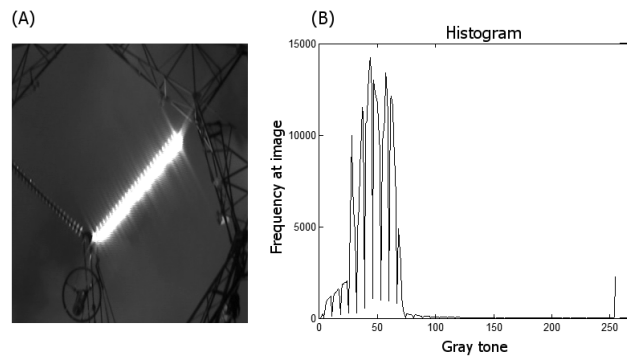


Figura 5 - Descarga inicial (A) e seu histograma de brilho (B)

Para obter o eixo-médio é necessário segmentar a região do arco elétrico na imagem, o que é facilitado pelas características fotométricas do mesmo. Como se trata de um plasma de alta temperatura, o arco corresponde ao objeto mais brilhante na imagem, o que viabiliza uma segmentação por limiarização seguida de filtragem por área [19], para eliminação de possíveis objetos selecionados erroneamente. A imagem resultante da segmentação/filtragem é processada por afinamento e poda [20] produzindo uma imagem resultante binária que contém o eixo-médio longitudinal do arco.

4.1.1 Inicialização da Snake-3D

A inicialização do modelo consiste em determinar a primeira B-Spline a partir de um conjunto de pontos tridimensionais recuperados do primeiro par de imagens, para esse fim, tira-se proveito da geometria inicial do arco. Neste trabalho os arcos são gerados através da aplicação de tensão elétrica nos extremos de um fio fusível instalado ao longo da cadeia de isoladores. Por conta disso, nos seus primeiros instantes o arco é um objeto brilhante retilíneo cujas projeções também são retilíneas. Tal aspecto facilita a determinação de homólogos/correspondentes.

Aplicando a restrição imposta, como descrito em [15], a partir do conjunto de pares de pontos correspondentes basta retroprojetá-los [21] para obtenção do conjunto inicial de pontos 3D sobre os quais deve ser aplicada uma B-spline aproximadora, determinando a inicialização da snake-3D.

Considerando a inicialização do modelo para o primeiro par e a disponibilidade da sequência de pares de imagens, é possível utilizar a saída de um estágio como entrada do seguinte e, desta forma, capturar a evolução do arco no decorrer do tempo, bem como as medições ao final de cada estágio de evolução.

Uma vez obtida a configuração final na saída do estágio, basta executar uma medição da Snake-3D. Para tanto, pode-se gerar a curva tridimensional equivalente a Snake-3D (Algoritmo de D'Boor) e, em seguida, realizar o somatório das distâncias euclidianas entre pontos consecutivos dessa curva.

4.2 Calibração das Câmeras

Conforme já foi explicado, a aplicação da metodologia necessita do conhecimento das matrizes de projeção das câmeras e para tanto é preciso executar uma operação de calibração para cada câmera do sistema. Foram posicionados marcos, cujas coordenadas 3D foram pré-determinadas, nas torres de 500 kV. Ao se capturar uma imagem destes marcos com as câmeras as matrizes de calibração podem ser geradas. É necessário que um número mínimo de marcos não co-planares seja visto por cada câmera. Deve-se, então, determinar as coordenadas de imagem desses pontos, o que é feito manualmente (Figura 6). Uma vez obtidas tais coordenadas a correspondência de cada ponto 3D com sua projeção fornece o sistema de equações cuja solução consiste na matriz de projeção da câmera procurada.

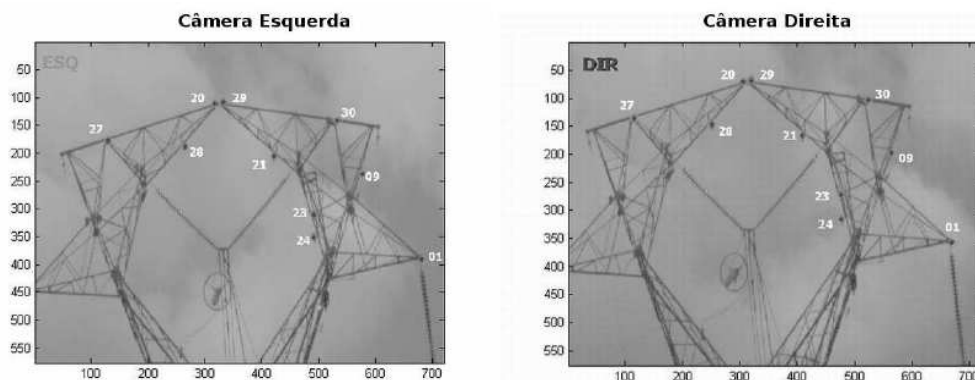


Figura 6 – Marcos vistos pelas duas câmeras

Sob pena de comprometer a calibração e conseqüentemente as medições de comprimento realizadas, as posições de calibração e os ajustes de parâmetros internos determinadas para as câmeras (distância focal, por exemplo) devem ser mantidos constantes no transcorrer da captura das imagens de ensaios.

5.0 - EXPERIMENTOS COM ARCOS ELÉTRICOS REAIS

No experimento com fio néon flexível o comprimento do objeto era constante e podia ser determinado por medição direta, contudo o mesmo não ocorre para os casos envolvendo arcos elétricos tratados no presente trabalho. A determinação do comprimento por medição não é possível, sendo utilizadas técnicas auxiliares que permitem somente identificar a variação do comprimento ao longo do tempo através da análise da primeira pseudo-harmônica de tensão entre os terminais do arco e da primeira pseudo-harmônica da corrente do arco [1] a [3].

Dois arcos gerados durante o projeto foram tratados com a metodologia desenvolvida e serão analisados a seguir. Os arcos foram gerados pelo estabelecimento da tensão adequada nos terminais de um fio de prova localizado junto à cadeia de isoladores de 4,05 m (Figura 7).

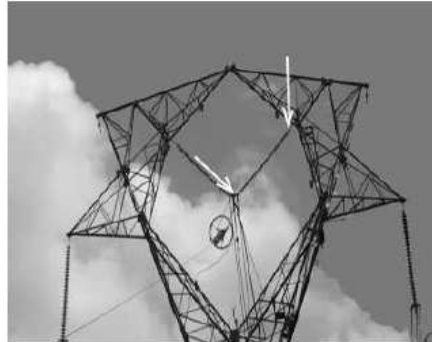


Figura 7 – Detalhe da torre de 500 kV exibindo o fio de prova.

5.1 Procedimento de captura das imagens do arco elétrico

Uma sirene sinaliza a preparação para a geração do arco elétrico durante os ensaios e em alguns minutos o arco é iniciado. Como não há dispositivo eletrônico para o disparo simultâneo das câmeras, este protocolo permite aos operadores dispararem cada câmera individualmente. Após a aquisição dos vídeos são extraídas as duas seqüências assíncronas de imagens e, através de identificação visual do primeiro quadro a apresentar o arco, as seqüências são colocadas em fase. É importante destacar que este procedimento não garante o sincronismo.

A captura de imagens foi realizada por um par de câmeras “domésticas” do tipo handycam, modelo Sony HDRSR10, com velocidade de 30 quadros/s, provendo imagens com resolução final de 720 x 570 pixels. Pela análise das medidas elétricas é possível estimar a variação do comprimento do arco e foi verificado que ocorre uma variação importante num curto intervalo de tempo. Especificamente, foi identificado que seria necessário filmar os arcos com filmadoras com taxa de aquisição da ordem de 1000 quadros/s, porém estes equipamentos não estavam disponíveis nesta etapa do projeto. A pesquisa foi, então, desenvolvida com as filmadoras com baixa taxa de aquisição disponíveis, sendo esperado que isto acarrete em erros nos resultados.

Os pares de seqüências de quadros foram sincronizados a partir da inspeção do primeiro quadro que exhibe o arco (Figura 8), pois não havia sido desenvolvido um sistema de sincronismo nem de disparo automático das filmadoras. À medida que falta sincronismo e a cena se altera no decorrer do tempo, cada câmera inicia a captura em um instante diferente durante a evolução da cena. Cada par de quadros assíncronos captura a cena em evoluções distintas. O grau de diferenciação entre os pares de quadros depende da velocidade de codificação da evolução do arco em relação da taxa de amostragem do arco. Isto acarreta em erro na obtenção do comprimento do arco.



Figura 8 – Seqüências de imagens capturadas por duas câmeras

Foram determinadas as matrizes de coordenadas das câmeras e separados os pares de imagens. A variação do comprimento do arco ao longo de sua evolução é calculada via snake-3D e apresentado em gráfico comparativo. Não existe uma maneira direta para a medição do comprimento do arco elétrico, bem como não há disponibilidade do valor verdadeiro do seu comprimento. Porém, a partir das medições de tensão e corrente de arco pode-se estimar uma função ao longo do tempo para o alongamento do arco ($l(t)$) baseada na análise de harmônicos [1, 2, 3]. Não sendo baseada na reconstrução 3D do arco, esta técnica não é capaz de estabelecer o valor métrico do comprimento (ou da variação do comprimento). Desta forma, a menos de um fator de escala, a curva de medições dos comprimentos do arco via reconstrução tridimensional tem um perfil semelhante ao perfil da curva de medições da primeira pseudo-harmônica da tensão V_{1ef} .

A seguir os resultados obtidos dos ensaios realizados em 08 e 09 de janeiro de 2009 em arcos de 200 A_{ef} são descritos.

5.2 Ensaio 1899 e 1906

Na Figura 9 é apresentado o posicionamento das filmadoras para os ensaios tratados.



Figura 9 – Posicionamento das filmadoras a 50 m da torre.

Na Figura 10 são exibidas a estimativa feita da variação do comprimento do arco a partir das medidas de tensão entre os terminais do arco e o comprimento do arco obtido pelo método de reconstrução 3D proposto. Os valores da pseudo-primeira harmônica da tensão entre os terminais do arco foram calculados a cada 40 ms, portanto, numa taxa de amostragem muito superior à das câmeras de vídeo, da ordem de 30 ms. Tal diferença resulta numa menor acurácia da curva obtida pelo tratamento de imagens. Além disto, o fato de não haver sincronismo entre as imagens também acarreta em erro nos resultados.

O ensaio 1899 foi realizado em 08/01/2009 às 11:34 h e o ensaio 1906 foi realizado em 09/01/2009 às 11:45 h. Os arcos correspondem à classe 200 A_{ef} e os valores eficazes máximos da tensão entre os terminais do arco foram 19,9 kV e 34 kV, respectivamente.

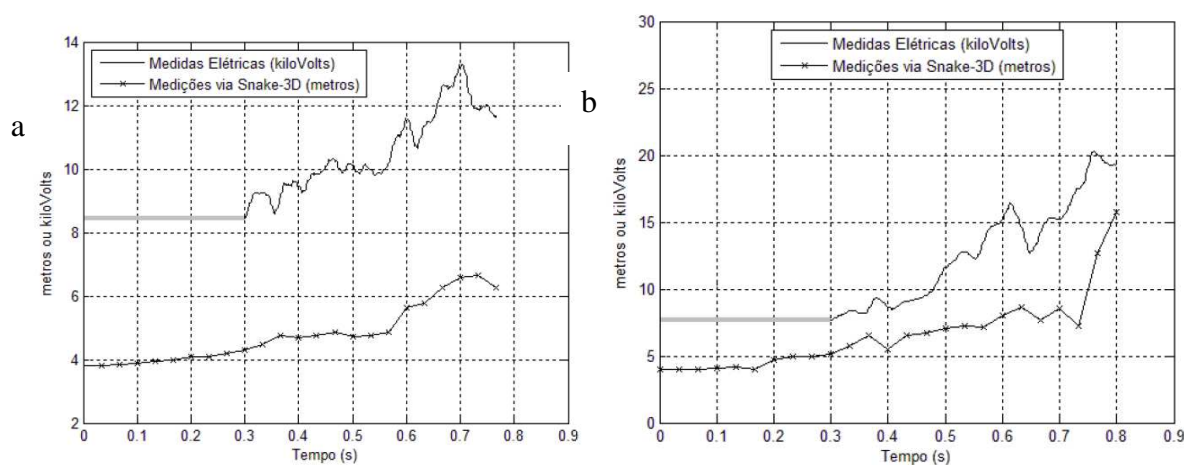


Figura 10 – Ensaio 1899 (a) e 1906 (b) – Valores da primeira pseudo-harmônica da tensão entre os terminais do arco e da estimativa do comprimento obtida através de reconstrução 3D.

Apesar das diferenças observadas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível notar que os perfis das duas medições são semelhantes dentro do intervalo de 300 a 800 ms. Nos primeiros 300 ms do ensaio do arco este não se encontra estabilizado e a primeira-harmônica de tensão não representa a variação do comprimento. Os valores iniciais da tensão do arco não podem ser utilizados.

6.0 - CONCLUSÕES

No caso das curvas analíticas o método proposto apresentou medições com desvios considerados aceitáveis em relação aos valores verdadeiros dos comprimentos das curvas.

No que se refere ao caso dos arcos reais, apesar do uso de câmeras domésticas de baixa velocidade e sem sincronismo automático (eletrônico), os resultados se mostraram consistentes com estudos encontrados na literatura que são baseados na análise de dados elétricos.

A abordagem descrita neste trabalho demonstra ser promissora e pode servir como ferramenta importante na medição de arcos para fins da modelagem matemática desejada.

Ademais, considerando que a qualidade do sistema de aquisição de imagens tem influência significativa sobre os resultados da aplicação da abordagem proposta, por exemplo, no refinamento das forças externas que guiam a snake-3D, a utilização de um sistema que atenda aos requisitos necessários (sincronismo e alta taxa de amostragem na aquisição de imagens, alta resolução espacial e fotométrica dos sensores) propiciará melhores resultados nas medições.

Uma outra contribuição do presente trabalho é demonstrar o potencial de aplicações de visão por computador no campo da eletrotécnica, uma área ainda pouco explorada por soluções baseadas em visão computacional e processamento de imagens.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os resultados referentes aos ensaios de arco elétrico são resultados parciais do projeto P&D ANEEL dos anos 2001/2002 financiado por FURNAS Centrais Elétricas S.A. . O projeto foi coordenado pela COPPE/UFRJ com a participação da UNICAMP. Os trabalhos de laboratório foram realizados pelo CEPEL na linha experimental construída nas suas dependências.

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), à CAPES bem como ao CNPq e à FAPESP.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] A. Câmara, C. Portela, M. Tavares. Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Some Basic Aspects on Main Elements Representation. International Conference on High Voltage Engineering and Application, pages 482-485, 2008.
- [2] A. Câmara, C. Portela, M. C. Tavares. Single-Phase Auto-Reclosure Studies Considering a Robust and Reliable Secondary Arc Model Based on a Gray-Box Model. International Conference on High Voltage Engineering and Application, pages 486-489, 2008.
- [3] A. Câmara, R. Gonçalves, C. Portela, M. Tavares. Arc Model for Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Research in an Experimental 500 kV Line. International Conference on High Voltage Engineering and Application, pages 490-493, 2008.
- [4] C. Portela. Study of Problems Related to Switching of Relatively Small Currents. In CIGRÉ Proceedings, pages 1-14, 1980.
- [5] E. Anke et al. Practical Applications of Arc Physics in Circuit Breakers. Survey of Calculation Methods and Application Guide. In CIGRÉ - ELECTRA, volume 118, pages 63-79, num. 0, 1988.
- [6] C. Portela, C. Dupont, M. Meirelles. Deterministic and Statistic Arc Modeling. In CIGRÉ Proceedings, pages 1-6, 1994.
- [7] C. Portela, N. Santiago, J. Mourente. Modelling of Dynamic Arc Behaviour for Small Currents. In CIGRÉ Proceedings - Colloquium of CIGRÉ Study Committee 13, pages 1-28, 1989.
- [8] C. Portela, N. Santiago, O. Oliveira, C. Dupont. Modelling of Arc Extinction in Air Insulation. In Third International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials - ICPADM, pages 381-384, 1991.
- [9] M. Tavares, C. Portela. Transmission System Parameters Optimization – Sensitivity Analysis of Secondary Arc Current and Recovery Voltage. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(3):1464-1471, 2004.
- [10] J. M. K. MacAlpine, D. H. Qiu, and Z. Y. Li. An analysis of spark paths in air using 3-dimensional image processing. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 6(3):331-336, 1999.
- [11] D. H. Qiu and J. M. K. MacAlpine. An incremental analysis of spark paths in air using 3-dimensional image processing. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 7(6):758-763, 2000.
- [12] D. H. Qiu, J. M. K. MacAlpine, and Z. Y. Li. An incremental 3-dimensional analysis of spark paths in air. In Conference on Electrical Insulation and dielectric Phenomena, volume 2, pages 646-649, 1999.
- [13] D. Amarasinghe, U. Sonnadara, M. Berg, and V. Cooray. Correlation between brightness and channel currents of electrical discharges. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 14(5):1154-1160, 2007.
- [14] M. Sellathurai. A binocular stereo technique for 3-d reconstruction of electrical discharges. In Proceedings of International Conference on Image Processing, volume 3, pages 284-287, 1997.
- [15] G. B. Santos, S. P. Cunha, C. Tozzi. Rastreamento de Curvas 3D através de Biplane Snakes. Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (XXIX CILAMCE 2008), Macéio, Brasil, Nov. 2008.
- [16] G. Santos, S. Cunha, C. Tozzi. A New Application for 3D-Snakes – Modelling Electrical Discharges. 4th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2009), Lisboa, Portugal, pg. 546-553, Fev. 2009.

- [17] G. Santos, C. Tozzi, M. Tavares. Visual Evaluation of the Length of Artificially Generated Electrical Discharges By 3D-snakes. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, Issue 1, pp. 200-210, February 2011.
- [18] M. Kass, A. Witkin and D. Terzopoulos. Snakes: Active contours models. Second International Conference in Computer Vision, 1(4):321-331, 1988.
- [19] R. Gonzalez and R. Woods. Processamento de Imagens Digitais., chapter Segmentação de Imagens., pages 295-341. Edgar Blücher, 2000.
- [20] P. Soille. Morphological Image Analysis – Principles and Application., chapter Hit-or- Miss and Skeletons., pages 129-151. Springer, 1999.
- [21] N. Ayache. Artificial Vision for Mobile Robots., chapter Calibration, pages 13-42. MIT Press, 1991.