



**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 ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**PESQUISA EM VÃO EXPERIMENTAL DE 500 kV :
MODELO DO ARCO ELÉTRICO PARA ESTUDOS DE RELIGAMENTO MONOFÁSICO**

**Carlos Portela
(In Memoriam)**

COPPE/UFRJ

**Alessandra Câmara (*)
Ricardo André Gonçalves**

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS

**Marcelo Guimarães
Orsino Oliveira F^o
José Carlos da Rocha**

CEPEL

M. Cristina Tavares

UNICAMP

RESUMO

O arco elétrico é importante elemento dos transitórios de manobra em sistemas de potência. Observa-se um grande número de tentativas de modelá-lo para fins de engenharia, no entanto, ainda não se chegou a um modelo que atenda aos requisitos de um processo de chaveamento genérico, principalmente no que tange os estudos de regime transitório relacionados ao religamento monofásico, onde se destaca a extinção do arco secundário.

O presente trabalho aborda um modelo de arco elétrico no ar para aplicação em estudos de transmissão para implementação de religamento monofásico, ajustado a partir de dados experimentais, complementando informações apresentadas em trabalho anterior [1].

PALAVRAS-CHAVE

Arco Elétrico, Arco Secundário, Religamento Monofásico, Religamento Monopolar, Linhas de Transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

O arco elétrico está presente em uma grande parte de temas relacionados à coordenação de isolamento que determinam condições limítrofes na Engenharia Elétrica, seja para o dimensionamento de equipamentos, seja para operação de sistemas elétricos de transmissão.

Até alguns anos atrás, a quase totalidade das publicações disponíveis tinha como foco de interesse a modelagem do arco elétrico para estudos relacionados a dimensionamento de equipamentos, como disjuntores e chaves de aterramento. Nos últimos anos, entretanto, observa-se um interesse crescente na modelagem do arco elétrico em linhas de transmissão estreitamente associado ao emprego do religamento monofásico – manobra que comprovadamente melhora o desempenho dos sistemas elétricos, indicada, principalmente, para sistemas radiais, com linhas longas, características facilmente identificadas no cenário brasileiro [1].

Em linhas gerais, observa-se que os instrumentos e metodologias comumente disponíveis na literatura quanto à modelagem do arco elétrico para estudos de religamento monofásico possuem dois tipos de abordagem, quais sejam, critérios de extinção associados a um “gap” ou modelos físicos matemáticos.

Pela dificuldade de se caracterizar adequadamente, principalmente, o comportamento dinâmico do arco, os critérios tradicionais de análise da extinção do arco secundário (condição que determina o sucesso da manobra), tendem a ser conservativos e com isso têm seu uso comprometido para situações em que as condições de arco (corrente e tensão) se aproximam ou mesmo extrapolam as condições previstas em tais critérios. Ressalta-se ainda a importância da interação arco-rede, muitas vezes negligenciada.

Apresenta-se, a seguir, o estudo de um modelo para o comportamento dinâmico do arco elétrico do tipo “caixa-cinzenta” cujo ajuste e definição dos parâmetros têm por base dados obtidos de uma pesquisa em vãos de linha

de 500 kV, especialmente construídos para esse propósito.

2.0 - MODELAGEM DO ARCO ELÉTRICO

Os modelos de arco elétrico, na grande maioria da literatura disponível, têm seu desenvolvimento associado à ocorrência do fenômeno em disjuntores. Segundo classificação do CIGRÉ, eles podem ser agrupados em três famílias principais [2]: modelos físicos (modelos complexos baseados nas leis de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, e as propriedades dos gases e plasmas com relativo detalhe); Modelos Empíricos, com diagramas e fórmulas que indicam a dependência dos parâmetros e as leis de crescimento com os parâmetros e variáveis independentes.

Embora represente uma ferramenta de análise prática relativamente difundida para o estudo de disjuntores, o emprego de tais filosofias de "modelos" na análise da extinção do arco secundário pode levar à utilização de critérios equivocados de análise. Devido às particularidades do fenômeno de extinção do arco secundário, a generalização de determinados resultados traz o risco de distorcer conclusões, uma vez que as condições em que tais características foram obtidas podem divergir substancialmente das inerentes à aplicação em questão.

Há ainda modelos que não se restringem à classificação mencionada, conhecidos como tipo "Caixa-Cinzenta", que associam características dos modelos caixa-preta a fenômenos físicos e/ou características empíricas, ou ainda, consideram determinados parâmetros originalmente constantes como variáveis. Tais modelos representam uma evolução dos apresentados acima e foi o tipo de modelo adotado para desenvolvimento e ajuste [3].

2.1. Modelo Utilizado

Para determinação do modelo de arco a ser adotado deve se considerar critérios com consistência física, nomeadamente parâmetros do arco independentes da amplitude e forma de pequenos distúrbios, e modelo dinâmico que satisfaça à característica estática.

Deve ser enfatizado que, para um ponto de operação em particular, muitos dos modelos largamente utilizados são, de fato, equivalentes, a partir de um ajuste das respectivas constantes envolvidas, e é inútil tentar escolher um modelo caracterizado como do tipo "caixa-preta", dentro das limitações dos dados experimentais. A melhor atitude é adotar uma abordagem de um modelo tipo "caixa-cinzenta", procurando modelos consistentes com os fenômenos físicos dominantes, com um mínimo de parâmetros independentes, evitando parâmetros com forte dependência do ponto de operação, e com o uso de resultados experimentais cobrindo uma grande faixa de distúrbios.

Na vizinhança de um ponto de operação, a restrição básica na adoção de um dos modelos caixa-preta está associada ao fato de considerarem apenas uma constante de tempo para o comportamento dinâmico. Tanto ensaios de tipo em laboratórios, como análises detalhadas de testes de disjuntores de diferentes fabricantes, sob condições distintas de manobra, apontam para a existência de pelo menos duas constantes de tempo, com ordens de grandeza diferentes. Um modelo apresentado em [3] e descrito a seguir, representa uma tentativa de, a partir da associação de dois "sub-arcos" com constantes de tempo distintas, representar um arco "equivalente" com duas constantes de tempo. De acordo com o modelo proposto, o arco pode ser representado por dois sub-arcos, cada um com seus respectivos parâmetros, além de um termo que representa a interação entre eles. A associação dos sub-arcos pode ser série ou paralela, sendo equivalentes, conforme o ajuste das variáveis envolvidas. Fisicamente, a representação de dois sub-arcos ligados em série ou paralelo visa descrever basicamente a diferença de comportamento entre a região central do canal do arco e as regiões anódica e catódica, ou ainda, a diferença entre o comportamento térmico das regiões central e mais externa do canal do arco.

2.2. Característica Estacionária do Arco Elétrico no Ar

Para definição das características estacionárias do arco, utilizou-se uma curva proveniente de ensaios para arcos no ar [3]. A região de correntes menos intensas corresponde ao comportamento caracterizado basicamente por Mayr, enquanto a região de correntes mais elevadas por Cassie conforme ilustrado na Fig.1.

Para análise do arco secundário, na maioria das vezes, a região de interesse pode ser considerada como aproximadamente uma reta (em escala logarítmica), por se tratar do trecho da curva de correntes mais baixas, definindo-se então a tensão (u_{0e}) em função da corrente de equilíbrio (i_{0e}). Assim, para um dado i_0 , obtido a partir das condições de simulação, imposto pela rede, é possível calcular u_0 , e conseqüentemente, a potência de equilíbrio ($P_0 = u_0 \cdot i_0$) e a condutância inicial do arco ($g_0 = i_0/u_0$).

A partir do estabelecimento de $u_{0e} = f[i_{0e}]$, ou seja, das características estacionárias do arco, é possível fazer uma análise de sua estabilidade, em bases incrementais, ou ainda, iniciar o processo de avaliação do seu comportamento dinâmico, em bases transitórias.

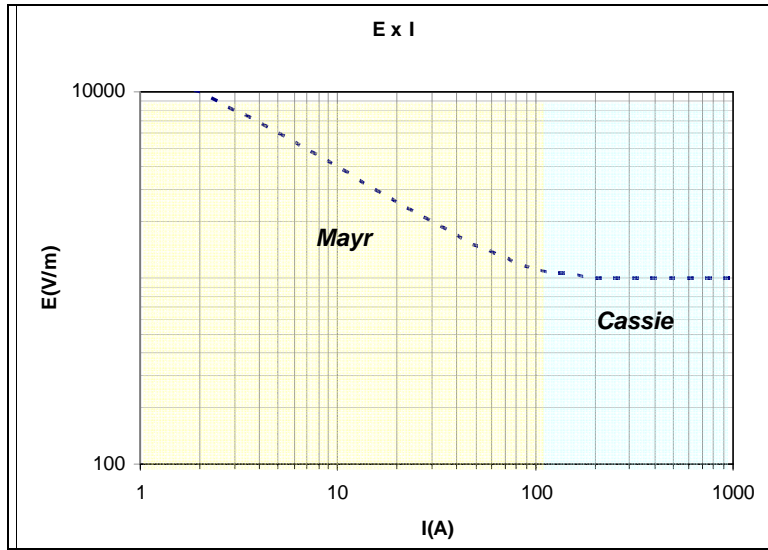


FIGURA 1 – Característica Estacionária do Arco no Ar (E (campo elétrico), I (corrente) – Regiões de Cassie e Mayr

2.3. Comportamento Dinâmico do Arco Elétrico

Para representação do comportamento dinâmico do arco secundário, adotou-se o modelo com duas constantes de tempo proposto em [3]. Considerando como exemplo a conjugação de dois sub-arcos do tipo Thiel [3], conforme Fig. 2, o arco pode ter seu comportamento descrito por:

$$-\frac{d(\text{Log } r_2)}{dt} = \frac{d(\text{Log } g_2)}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \left(\frac{p_2 - J \text{Log} \left(\frac{g_2^\varepsilon}{g_1} \right)}{\eta P_0} - 1 \right) \quad (1), \quad -\frac{d(\text{Log } \eta)}{dt} = \frac{d(\text{Log } g_1)}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \left(\frac{p_1 + J \text{Log} \left(\frac{g_2^\varepsilon}{g_1} \right)}{\xi P_0} - 1 \right) \quad (2)$$

onde

$\eta = 1 - \xi$, $\varepsilon = \xi / \eta$, $p_1 = u_1 \cdot i_1$, $\theta_1 = A_1 \cdot g^\alpha$, $\theta_2 = A_2 \cdot g^\alpha$, $p = p_1 + p_2$, $P_0 = B \cdot g^\beta$, $J_r = J / P_0 = \text{constante}$, $p_2 = u_2 \cdot i_2$, $r_1 = 1 / g_1 = u_1 / i_1$, $r_2 = 1 / g_2 = u_2 / i_2$.

Para arcos em série, $u = u_1 + u_2$, $i = i_1 = i_2$, $r = 1 / g = r_1 + r_2$, $p_1 = (g_1 / (g_1 + g_2)) \cdot p$, $p_2 = (g_2 / (g_1 + g_2)) \cdot p$, e, para arcos em paralelo, $u = u_1 = u_2$, $i = i_1 + i_2$, $g = g_1 + g_2$, $r = 1 / g$, $p_1 = (r_1 / (r_1 + r_2)) \cdot p$, $p_2 = (r_2 / (r_1 + r_2)) \cdot p$.

Os parâmetros B e β ($P_0 = B \cdot g^\beta$) são calculados a partir da característica estática do arco (Fig.1). Destaca-se que a referida curva relaciona campo elétrico e corrente de arco, portanto, para se contabilizar o valor de u deve ser considerado o comprimento da distância de isolamento.

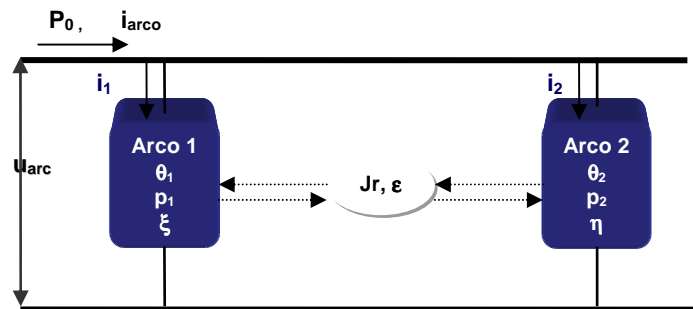


FIGURA 2 – Representação esquemática do modelo de arco elétrico com dois sub-arcos de Thiel em paralelo

A referência [3] indicou, a partir de resultados de ensaios para arcos no ar, valores aproximados, que fornecem uma estimativa razoável da ordem de grandeza das seguintes constantes : $\alpha \sim 0,1$, $\beta \sim 0,2$, $\xi \sim 0,4$, $J_r \sim 0,05$.

Uma estimativa dos demais parâmetros é apresentada adiante, feita a partir de cálculos com base nos resultados experimentais de ensaios no âmbito da pesquisa “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico”, onde destaca-se, dentre esses valores, as constantes de tempo por estarem diretamente associadas ao tempo de extinção do arco.

3.0 - UTILIZAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

A utilização de dados experimentais é ferramenta essencial não só para ajuste como para validação de qualquer modelo que pretenda ser considerado fisicamente robusto.

Dessa forma, em 2003 deu-se início a um projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico”, que tem como parceiros tecnológicos FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., da qual a pesquisa integra a carteira de P&D no segmento geração, COPPE/UFRJ – atuante no desenvolvimento teórico e suporte técnico em parceria com a UNICAMP, e o CEPEL, responsável pela execução da parte experimental, que vem sendo realizada em instalações especialmente construídas para essa pesquisa na unidade de Adrianópolis (Fig. 3).

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 (Fig. 3)), compõe-se basicamente por 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.

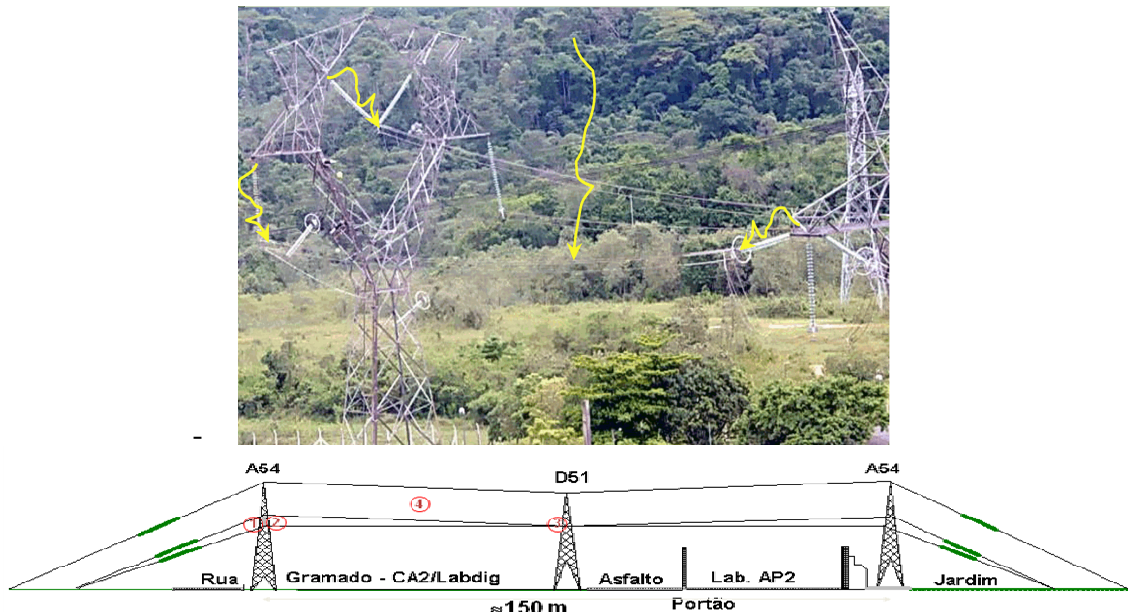


FIGURA 3 – Localização dos Ensaios

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.

3.1. Descrição dos Ensaios

Foram determinadas quatro “condições de ensaios”, a saber (Fig. 3) :

1. arcos na vizinhança da cadeia de suspensão em “I” ;
2. arcos na vizinhança da cadeia de suspensão em “V”
3. arcos na vizinhança da cadeia de ancoragem
4. arcos entre cabo pára-raios e cabo de fase.

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).

Destacam-se alguns aspectos críticos de execução dos ensaios, tais como : distância da fonte ao local do arco, altura das cadeias e vãos (> 25 m), ignição do arco (fio fusível), arcos entre cabo fase e cabo Pára-raios, geração e injeção dos impulsos, distribuição dos impulsos, medições de vento e filmagem.

3.3. Análise do Comportamento do Arco Elétrico em Regime Quasi-Estacionário

3.3.1. Alongamento do Arco

A variação do comprimento do arco, fenômeno relativamente lento e passível de visualização, tem seu comportamento intrinsecamente relacionado ao processo de extinção do arco, uma vez que reflete a influência de diversos fatores ambientais macroscópicos como vento, umidade do ar, pressão e etc, nos processos de ionização e recombinação das moléculas do plasma que compõe o arco, sendo por isso uma forma, ainda que indireta e aproximada, de se registrar tais influências na dinâmica do comportamento do arco.

Ter a informação da variação do comprimento do arco ao longo do tempo é de extrema valia tanto nos processos de análise da resposta dinâmica como transitória do arco, uma vez que nos permite trabalhar com determinadas simplificações ou aproximações, coerentes com o modelo adotado em cálculos com variação incremental, seja da condutância do arco, seja da corrente e tensão entre seus terminais, ou ainda, campo elétrico. A partir das medições de tensão e corrente de arco, pode se estimar uma função ao longo do tempo para o alongamento do arco ($\ell(t)$).

Outros dados importantes para assessorar tal análise encontram-se nas filmagens e medições de vento.

Como para as grandezas elétricas (tensão e corrente de arco) medidas observou-se um nível elevado de ruído, e o fenômeno em causa é de origem lenta, não associado ao impulso mas apenas às grandezas de origem sustentada, tal problema foi contornado pela utilização direta de suas “pseudo” primeiro-harmônicas na avaliação da relação de tais grandezas com o comportamento do alongamento ($\ell(t)$). O termo “pseudo” se refere ao fato da tensão entre os terminais do arco e sua corrente não serem exatamente funções periódicas de menos a mais infinito ($-\infty < t < +\infty$).

As filmagens disponíveis foram geradas por duas câmeras posicionadas em locais distintos, fornecendo assim dois ângulos para visualização do arco. Embora não se tenha, apenas com essas duas câmeras, visão de 360° do arco elétrico, as imagens disponíveis colaboram significativamente na verificação do comportamento estimado do arco quanto à sua variação de comprimento a partir das grandezas elétricas de tensão entre seus terminais e corrente.

3.3.1.(a) Procedimentos para cálculo do alongamento do arco

Para definição das características estacionárias do arco, utilizou-se a curva apresentada na Fig. 1. Da observação da referida curva, podemos aproximar a relação entre campo elétrico (e_a) e corrente (i_a), para cada região de corrente por uma função do tipo : $e_a = k i_a^{-\alpha}$ (3), onde k e α são constantes a serem determinadas de acordo com a região de interesse da corrente que se deseja avaliar. A Fig.1 ilustra a aproximação sugerida pela equação (3), destacando também as regiões onde se observa características que melhor se aproximam dos modelos de arco conhecidos de Mayr e Cassie, como mencionado em 2.1. No caso de correntes sustentadas cujo valor máximo se situa no entorno da região de transição baixa/alta corrente, é razoável trabalhar com apenas um valor aproximado para k e α . Da mesma forma, para correntes muito elevadas pode se trabalhar considerando ainda um terceiro valor para k e α , refinando a representação da característica estacionária, considerando então uma tangente à curva na região de baixas correntes, uma referente à região de transição baixa/alta corrente e uma na região de altas correntes.

Sendo $u_a(t) = e_a(t) \times \ell(t)$ (4), onde $\ell(t)$ é o comprimento do arco ao longo do tempo e $u_a(t)$ a tensão de arco, para condições de referência: $u_{ref} = e_{ref} \times \ell_{ref}$ (5). Dividindo a equação (4) por (5): $u_a(t)/u_{ref} = (e_a(t)/e_{ref}) \times (\ell(t)/\ell_{ref})$ (6), e aplicando (3) em (6) : $\ell(t) / \ell_{ref} = (u_a(t) / u_{ref}) \times (i_a(t) / i_{ref})^\alpha$ (7).

Quanto à determinação das condições de referência, uma vez estimado o comprimento de referência ℓ_{ref} , as grandezas u_{ref} e i_{ref} são coletadas das medições de tensão e corrente sustentadas no instante em que se tem efetivamente ℓ_{ref} , ressaltando que se observou que as condições de referência não estão associadas às “condições iniciais” de arco estabelecidas nos ensaios.

Condições inicialmente consideradas anômalas no comportamento de $\ell(t)$ nos instantes iniciais do arco se confirmaram na observação das filmagens – quando da ignição do arco propriamente dita observa-se uma aproximação tal do arco à cadeia de isoladores que o contato, ou a extrema proximidade com sua superfície, parece arrefecê-lo (Fig. 4). O comprimento de referência considerado refere-se ao arco estabelecido após seu descolamento da superfície da cadeia de isoladores.

A Fig. 5 ilustra a variação de comprimento de um arco da ordem de 150 A ao longo do tempo de ensaio.



FIGURA 4 – Instantes iniciais do arco (arco tangenciando e se afastando, em seguida, da cadeia)

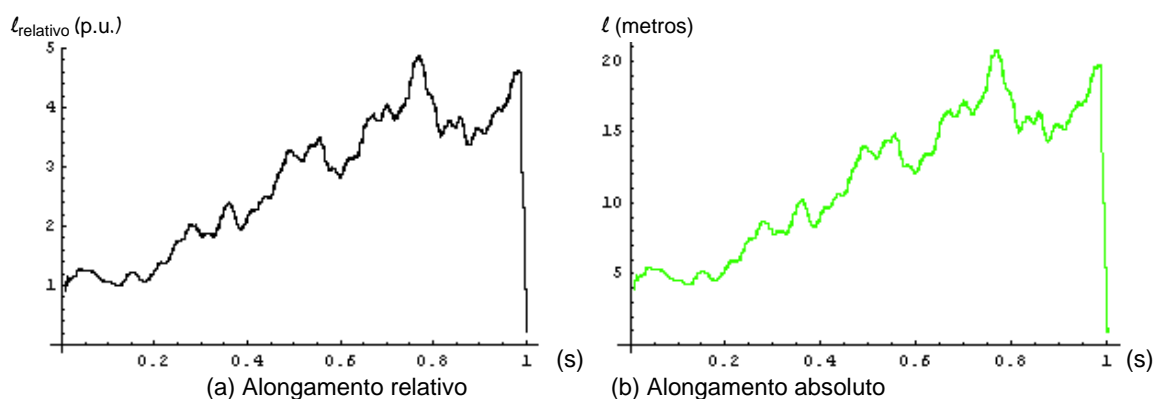


FIGURA 5 – Alongamento do Arco ao longo do ensaio 971

3.3.1.(b) Definição da Característica Estática

A título de ilustração, na Fig. 6(a) é apresentada o que seria a “característica estática” sem qualquer tratamento das grandezas medidas, ou seja, as relações instantâneas entre tensão e corrente tal qual são medidas. Ainda que esteja definida em seu contorno externo, a apresentação da “característica estática” determinada diretamente a partir das medições evidencia a necessidade de tratamento dos dados medidos, seja pela utilização de filtros, seja pela melhor caracterização das grandezas envolvidas. Pela melhor caracterização das grandezas envolvidas entenda-se a separação, dentre as medições, daquilo que efetivamente se relaciona com o tipo de fenômeno sob avaliação.

No caso da corrente sustentada, além dos filtros para atenuação dos ruídos, deve-se obter a corrente efetiva de condução, o que implica na subtração das parcelas da corrente referentes à componente unidirecional, corrente de deslocamento e residual, como apresentado a seguir:

$$i(t) = g(t) \times u(t) + c(t) \frac{du(t)}{dt} + i_r(t) \quad (8), \text{ onde}$$

$g(t) \times u(t)$: parcela referente à corrente de condução propriamente dita

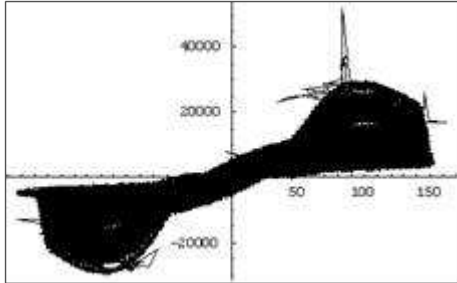
$c(t) \frac{du(t)}{dt}$: parcela referente à corrente de deslocamento

$i_r(t)$: parcela referente a uma “corrente residual” resultante de ajustes dos sistemas de medição, dentre outros.

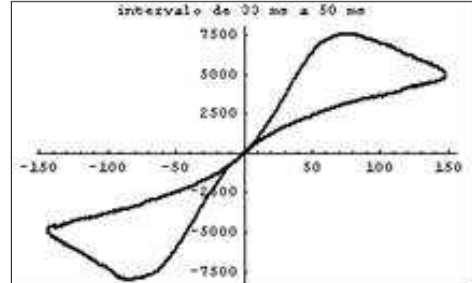
Vale ressaltar que a capacitância ($c(t)$) da parcela referente à corrente de deslocamento refere-se à polarização observada entre as extremidades da cadeia de isoladores, inerente ao efeito capacitivo do plasma. A condutância, grandeza efetivamente modelada, equivale às partículas ionizadas que se deslocam em um campo elétrico; o efeito da polarização, que não é considerado no modelo, está sendo corrigido ao se calcular e subtrair da corrente considerada a parcela referente à capacitância incremental média flutuante ($c(t) \frac{du(t)}{dt}$). Essa “simplificação” é adequada dado que os cálculos efetuados têm por base grandezas unitárias (por unidade de comprimento), fazendo uso, por exemplo, do próprio campo elétrico ao invés da tensão entre terminais do arco; nota-se que a

suposição de relação entre capacitância e comprimento implica em aproximações porventura traduzindo desvios significativos da realidade.

Dessa forma, uma vez filtrada grande parte dos ruídos de alta frequência, subtraídas as parcelas referentes à pseudo-harmônica de ordem zero da corrente sustentada e a corrente de deslocamento, a característica estática do arco se apresenta na forma da Fig.6(b).



(a) $U_a \times I_{60\text{Hz}}$, sem filtragem/tratamento das medidas, para o intervalo completo de ensaio de 1s



(b) $U_a \times I_{60\text{Hz}}$, após o tratamento das medidas, para um ciclo completo de frequência industrial

FIGURA 6 – Característica Estacionária do Arco ($u_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$)), para corrente de 150 A

3.3. Análise do Comportamento Dinâmico do Arco Elétrico

Embora a avaliação do comportamento "lento" do arco seja de suma importância, é no estudo do comportamento dinâmico que se pode verificar a questão do seu tempo de extinção, informação essencial para implementação do Religamento Monofásico.

A fim de se avaliar o comportamento dinâmico do arco, ou seja, sua resposta transitória, foram previstas injeções de impulsos de corrente de amplitude, polaridade e frente de onda variadas, de forma a permitir a determinação, ou melhor, a estimativa dos parâmetros do modelo do arco analisado, dentre eles as principais constantes de tempo que caracterizam sua resposta.

O modelo estudado considera o arco representado por dois sub-arcos em paralelo, caracterizando assim a presença de duas constantes de tempo distintas, com um termo mútuo que traduz o balanço energético entre essas duas "regiões" principais do arco representadas.

Uma vez tendo sido calculada a variação do comprimento do arco ao longo do tempo, considerando ainda que os arcos relacionados à linhas de transmissão são relativamente longos, as equações que caracterizam o comportamento dinâmico do arco apresentadas em 2.3 (eqs (1) e (2)) podem ser simplificadas para grandezas unitárias (por unidade de comprimento) como apresentado a seguir :

$$\frac{1}{g_1(t)} \frac{d(g_1(t))}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \left(\frac{p_1}{\xi P_0} + \frac{J_r}{\xi} \left(\frac{\varepsilon^* g_2}{g_1} - 1 \right) - 1 \right) \quad (9), \quad \frac{1}{g_2(t)} \frac{d(g_2(t))}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \left(\frac{p_2}{\eta P_0} + \frac{J_r}{\eta} \left(\frac{g_2}{\varepsilon^* g_1} - 1 \right) - 1 \right) \quad (10),$$

onde $\eta = 1 - \xi$, $\varepsilon = \xi / \eta$, $p_1 = u_1 \cdot i_1$, $\theta_1 = A_1 \cdot g^\alpha$, $\theta_2 = A_2 \cdot g^\alpha$, $P_0 = B \cdot g^\beta$, $J_r = J / P_0 = \text{constante}$, $p_2 = u_2 \cdot i_2$, $r_1 = 1/g_1 = u_1 / i_1$, $r_2 = 1/g_2 = u_2 / i_2$.

Para arcos em paralelo, $u = u_1 = u_2$, $i = i_1 + i_2$, $g = g_1 + g_2$, $r = 1 / g$, $p_1 = (r_1 / (r_1 + r_2)) \cdot p$, $p_2 = (r_2 / (r_1 + r_2)) \cdot p$.

No presente caso adotou-se o modelo com dois sub-arcos em paralelo, por tratar-se de um arco longo, em que a influência da região anódica/catódica não é tão significativa. Assim, valoriza-se mais o comportamento da coluna de plasma que forma o arco propriamente dito, ressaltando-se a interação entre a coluna central, mais quente, e a externa, mais fria.

A condutância do arco em função do tempo ($g(t)$), determinada a partir da equação (8) para um ensaio de 100A pode ser visualizada na Fig. 8. Ressalta-se que na sequência de cálculo, primeiro, a partir das medições de $i(t)$ e $u(t)$ filtradas são determinadas as parcelas referentes às *correntes residual e de deslocamento, conforme apresentado em (8)*. Utilizando $\ell(t)$ calculado com a equação (6), temos a função $g(t) \times \ell(t)$, também apresentada na Fig.7. O cálculo de $g(t) \times \ell(t)$ está associado ao fato de se proceder com os cálculos em torno de um ponto, ou ainda, uma pequena fração do arco em função do campo elétrico, o que pode ser traduzido, no caso de $g(t)$ por:

$$g(t) = i(t) / u(t) = i(t) / (e(t) \times \ell(t)) \Rightarrow g(t) \times \ell(t) = i(t) / e(t).$$

Em síntese, a partir dos dados medidos, pré-processados e filtrados tem-se as grandezas corrente e tensão de arco, e, a partir delas, a condutância de arco $g(t)$. Considerando que *a priori* calculou-se a variação do comprimento do arco ($\ell(t)$), ao multiplicá-la por $g(t)$ tem-se $g_u(t)$ (Fig.7.(b)).

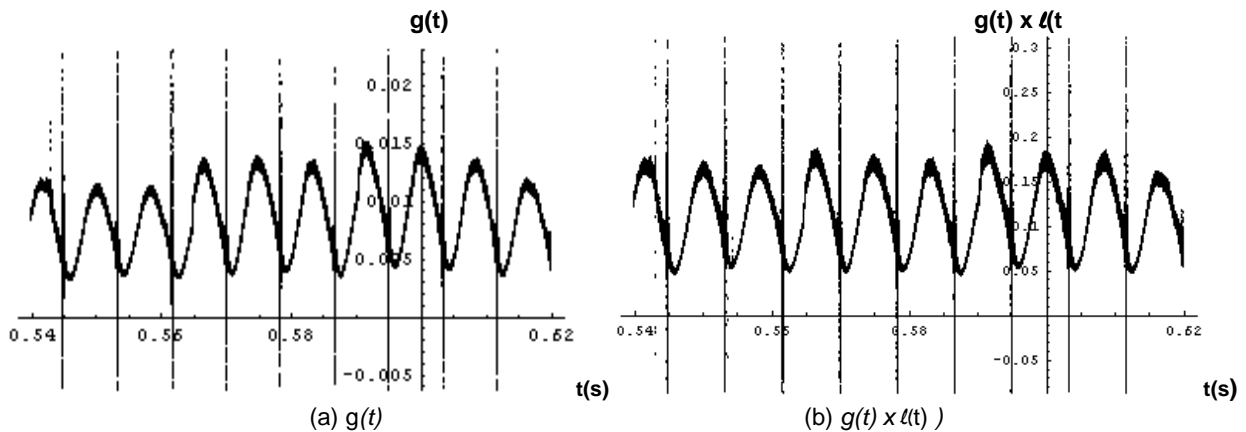


FIGURA 7 – $g(t)$ e $g(t) \times l(t)$ para o intervalo equivalente a um impulso para um ensaio de 150A

A partir dos resultados parciais da pesquisa, estima-se que deve se considerar uma constante de tempo da ordem de grandeza de $10^0 \mu s$ e outra de $10^1 \mu s$ para uma satisfatória representação do comportamento dinâmico do arco.

4.0 - CONCLUSÕES

De acordo com as informações contidas em grande parte da literatura disponível sobre o assunto, parece razoável se estabelecer uma modelagem de arco que valorize os principais aspectos relacionados ao equilíbrio de energia (Elenbaas-Heller), considerando, desta forma, o fornecimento de potência elétrica ao arco e os mecanismos de troca de calor (condução, convecção e radiação), representados através de variáveis que traduzem o estado físico médio da coluna central do arco. Assim, a partir de características estacionárias do ar, é possível se estabelecer seu comportamento dinâmico, representado basicamente pelas constantes de tempo presentes nas equações que caracterizam o comportamento do arco, do tipo *Mayr*, *Cassie*, *Thiel*, etc. Observa-se que consoante os fenômenos envolvidos, os modelos mais conhecidos e tradicionalmente adotados ao se situarem apenas no domínio de uma constante de tempo, restringem a sua utilização para condições específicas. Dessa forma, o modelo com duas constantes de tempo proposto em [3] parece sintetizar de forma satisfatória as principais grandezas que caracterizam o comportamento do arco e sua interação com a rede.

Conjugando as informações dos parâmetros do modelo proposto, tais parâmetros teriam valores aproximados de $\alpha \sim 0.1$, $\beta \sim 0.2$, $\xi \sim 0.4$, $J_r \sim 0.05$, com uma constante de tempo da ordem de grandeza de $10^0 \mu s$ e outra de $10^1 \mu s$, retratando assim uma satisfatória representação do comportamento dinâmico do arco.

Como trabalhos futuros, há a expectativa de se conseguir valores mais acurados para os parâmetros do arco, principalmente para as constantes de tempo, verificando uma eventual associação de tais valores com níveis de tensão inclusive. O alongamento do arco, assim como o efeito do vento, podem ainda ser estudados mais detalhadamente a partir das medições feitas com equipamentos mais precisos recém-instalados, como câmeras de alta velocidade e medidor de vento ultrassônico tridimensional. O modelo pode ainda ter sua utilização facilitada pela indicação dos parâmetros e simplificações condizentes com o valor da corrente de arco esperada, ou ainda, sua representação modelada em programas de uso comum da engenharia elétrica, como ATP, EMTP, dentre outros. A importância da interação arco-rede pode ainda ser explorada através de ensaios laboratoriais específicos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PORTELA, C - *Estudos de Religamento Monofásico – Pesquisa e Desenvolvimento de Modelo do Arco Secundário* - XX SNPTEE, GRUPO V, 2009
- [2] CÂMARA, A., *Extinção do Arco Secundário com Manobras Monofásicas. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise*, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2003.
- [3] PORTELA, C., DUPONT, C., MEIRELES, M. P., *Deterministic and Statistic Arc Modelling*. CIGRÉ 13-107, 1994 SESSION (28 AUG – 3 SEPT).
- [4] CÂMARA, A., *Modelagem de Arco Elétrico no Ar. Aplicações em Sistemas de Potência*. COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Elétrica, 2010.
- [5] CÂMARA, A. et alli - *Single-phase autoreclosure studies: secondary arc model research including a 500kV line experimental circuit*, ICHVE 2008, Chongking, China, Novembro 9-13, 2008.
- [6] Montanari, A. et alli, *Secondary Arc Voltage and Current Harmonic Content for Field Tests Results*, IPST'09, Kyoto (Japão), Junho, 2009