



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

BR/GDS/14  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**MODELAGEM DE ARCO ELÉTRICO NO AR PARA ESTUDO DE  
RELIGAMENTO MONOFÁSICO – PARTE EXPERIMENTAL**

**Marcelo Guimarães Rodrigues (\*)<sup>1</sup>, Orsino Oliveira Filho<sup>1</sup>, Marcio Ferreira Costa e Silva<sup>1</sup>, José Carlos da Rocha<sup>1</sup>, Robson Bianchi<sup>1</sup>, Wagner Telles<sup>1</sup>, Marcos Paulo Ribeiro<sup>1</sup>, Alessandra Câmara<sup>2</sup> e Ricardo André Gonçalves<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel, <sup>2</sup>Furnas Centrais Elétricas S.A.**

**RESUMO**

A maior dificuldade para implementação do religamento monofásico está em se caracterizar adequadamente a extinção do arco secundário. Os modelos e métodos de análise normalmente adotados são imprecisos, sem uma validação experimental abrangente, acarretando, no mínimo, soluções não-otimizadas.

Para se chegar a um modelo que atenda aos requisitos de um processo de chaveamento genérico, incluindo regimes transitórios relacionados ao religamento monofásico, é necessário que este se baseie em dados experimentais confiáveis, levantados em condições que retratem da forma mais fidedigna possível os fenômenos que se pretende retratar.

Este trabalho apresenta as simulações experimentais de falta fase-terra, com o objetivo de gerar dados para a modelagem do comportamento do arco, e a infraestrutura laboratorial desenvolvida para este fim.

**PALAVRAS-CHAVE**

Ensaio laboratoriais, Arco Elétrico, Arco Secundário, Religamento Monofásico, Linhas de Transmissão.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A grande maioria de defeitos em linhas de transmissão corresponde a curto-circuitos monofásicos fase-terra e, no caso de redes de neutro “efetivamente aterrado”, na maioria das condições, o arco elétrico não se extingue naturalmente, havendo necessidade de efetuar manobras para eliminar o curto-circuito e repor a operação normal da linha.

Em algumas condições, há uma probabilidade elevada de extinção do curto-circuito com a abertura apenas da fase afetada, nas duas extremidades da linha, originando a redução da corrente no arco a um valor razoavelmente moderado (arco secundário), assegurando elevada probabilidade de extinção num tempo curto, após o qual as duas extremidades dessa fase são religadas. A vantagem deste procedimento, conhecido como religamento monofásico, é manter em operação duas das fases da linha durante a abertura da fase afetada, limitando as perturbações na rede e, com isso, oferecendo baixo risco à estabilidade e à confiabilidade do sistema.

As maiores dificuldades nos estudos para a implementação do religamento monofásico estão na questão de se caracterizar adequadamente a extinção do arco secundário. Quanto melhor modelado o fenômeno, tanto melhor será o planejamento e a implementação do religamento monofásico. Portanto, o ponto crucial de tais estudos é ter um modelo de arco elétrico representativo e confiável. Neste sentido, foi elaborado um projeto de pesquisa envolvendo FURNAS, CEPEL e UFRJ, com o objetivo de desenvolver um modelo do arco elétrico para fins de estudos de religamento monofásico, fortemente baseado em experimentos laboratoriais.

A condição essencial para se obter um modelo fisicamente robusto e confiável é que os dados experimentais, em que o estudo se baseia, sejam providos de simulações experimentais o mais próximo possível do fenômeno real, abrangendo todas as características relevantes do comportamento do arco. Para atender a essa premissa, foi

necessário o desenvolvimento ou adaptação de infraestrutura laboratorial específica para a realização de ensaios de arco elétrico de modo a prover informações representativas às várias fases do religamento monofásico.

No item 2, são apresentados os requisitos a serem atendidos pelo estudo experimental para o desenvolvimento do modelo e, no item 3, os ensaios realizados tendo em vista as premissas do item 2. Informações sobre a infraestrutura laboratorial utilizada são apresentadas no item 4. O produto final da pesquisa é visto sucintamente no item 5. No item 6, têm-se as conclusões e trabalhos futuros.

## 2.0 - PREMISSAS PARA OS ENSAIOS

Para que a caracterização do arco seja confiável, os ensaios realizados para gerar os dados experimentais utilizados no desenvolvimento do modelo devem atender aos seguintes requisitos:

- O arranjo de ensaio deve ser o mais representativo possível do existente no sistema linha-rede.
- A faixa de corrente de arco deve abranger desde os valores típicos de curto-circuito até o de arco secundário na proximidade da extinção.
- Os dados gerados devem permitir a análise do comportamento do arco em faixa de frequência desde regime estacionário (60 Hz) até a ordem de MHz.
- Possibilitar análise da influência da velocidade do vento no alongamento do arco.
- Possibilitar a análise do perfil do arco em conjunto com as medições de tensão e corrente.

## 3.0 - PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram programados de tal modo a atender às premissas do item 2.0 e foram realizados em quatro meios, conforme indicados na Fig. 1 e descritos a seguir:

- na vizinhança da cadeia de suspensão em "I" ;
- na vizinhança da cadeia de suspensão em "V";
- na vizinhança da cadeia de ancoragem;
- entre cabo pára-raios e cabo de fase.

Em cada ensaio, a corrente de arco foi obtida por sobreposição de uma corrente "sustentada" ( $I_s$ ) e impulsos de corrente ( $I_i$ ). A corrente "sustentada" ( $I_s$ ) é aproximadamente senoidal 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, os ensaios foram realizados para onze valores de  $I_s$ , na faixa entre 10 A e 10 kA. Para arcos na vizinhança de cadeias de suspensão em V, foram utilizados seis valores de  $I_s$ , na mesma faixa de corrente (10 A e 10 kA). Para os impulsos de corrente, variaram-se os valores de crista (0,05  $\hat{I}_s$  , 0,1  $\hat{I}_s$  e 0,2  $\hat{I}_s$ ) e de tempo de frente (1  $\mu s$ , 5  $\mu s$  e 10  $\mu s$ ) de  $I_i$ . Para se obter o máximo de informações em cada ensaio, para cada nível de corrente de arco foi aplicado um conjunto de cinco impulsos distribuídos em diferentes pontos de fase da senóide da corrente.

Os dados experimentais são resultantes da medição das seguintes grandezas:

- Tensões e Correntes: medição das tensões aos terminais do arco ( $V_{arc}$ ), corrente corrente "sustentada" ( $I_s$ ) e corrente de impulso ( $I_i$ ) (taxa de amostragem  $\leq 100$  ns e janela de tempo de 1s).
- Vento: medições de velocidade de vento e direção nas proximidades da região do arco.
- Imagens: filmagens do arco, considerando dois ângulos distintos.
- Condições Ambientais: Pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura.
- Parâmetros do Circuito: Impedância do circuito de teste no domínio da frequência para até 10 MHz.

## 4.0 - INFRAESTRUTURA DESENVOLVIDA

### 4.1 Arranjo de ensaio

Parte do arranjo destinado ao projeto (Fig. 1) compõe-se basicamente por três torres, cabos fase e pára-raios, cadeias de isoladores 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. A infraestrutura laboratorial necessária para a realização dos ensaios foi desenvolvida ou adaptada pelo CEPEL.

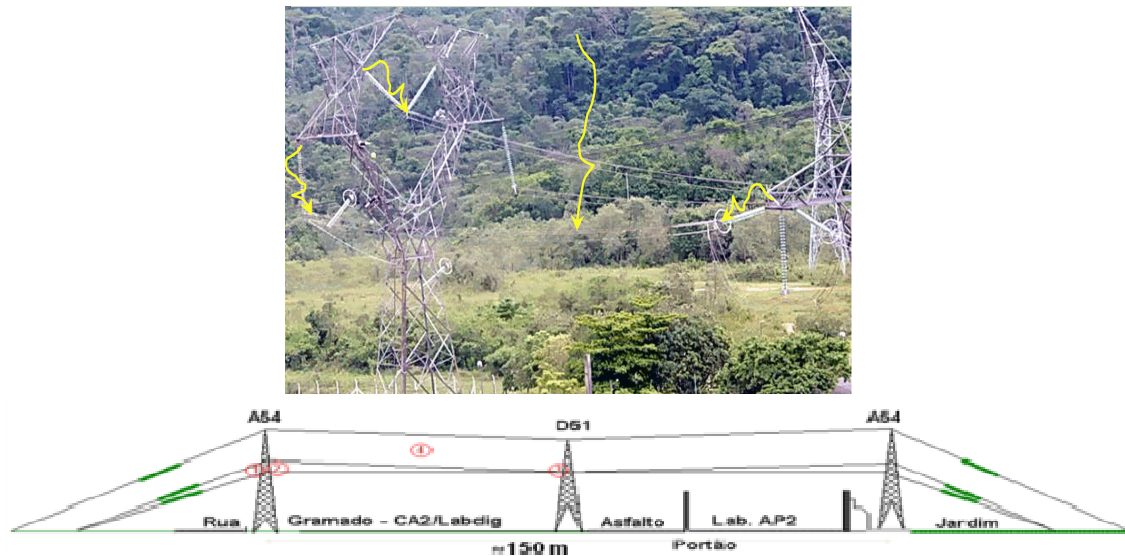


Figura 1 – Localização dos Ensaio

#### 4.2 Circuito de ensaio

Para a geração da corrente de arco de regime tipo sustentado, foi utilizada a infra-estrutura do Laboratório de Alta Potência do Cepel, que possui transformadores monofásicos de potência com tensão no lado secundário de 50 kV e um segundo transformador elevador, para as aplicações de correntes inferiores, possibilitando uma tensão de circuito aberto de 250 kV aos terminais do arco. Esse nível de tensão foi fundamental para manter estáveis as corrente mais baixas (dezenas de amperes), representativas do arco secundário próximo à extinção. Em paralelo aos terminais do arco é conectado o gerador de impulso, detalhado no item 4.3, que gera os impulsos sobre a corrente tipo sustentado. A Figura 2 apresenta o circuito de ensaio.

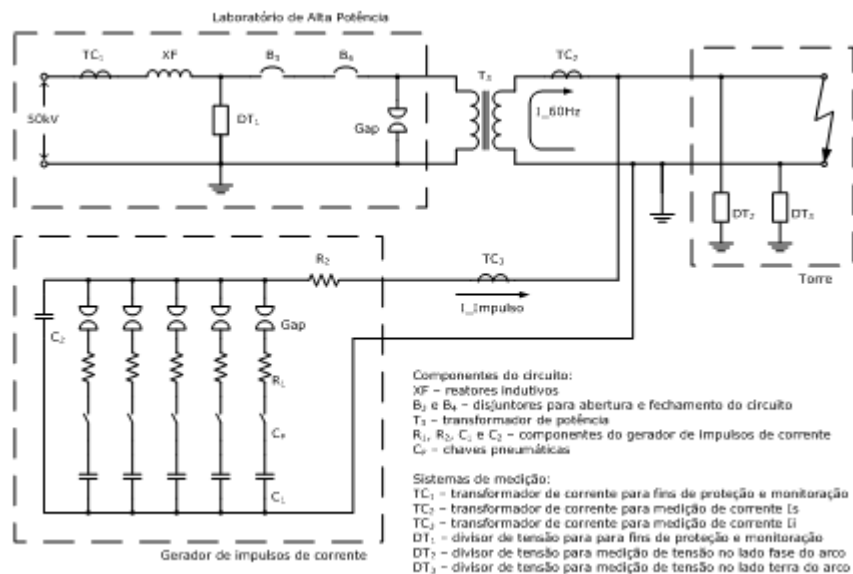


Figura 2 – Circuito de ensaio.

#### 4.3 Gerador multipulsos

O Gerador Multipulsos desenvolvido pelo Cepel (Fig. 3) foi utilizado com sucesso para gerar e injetar no arco uma sequência de cinco impulsos de corrente.

O bom desempenho desse tipo de equipamento está diretamente relacionado ao mecanismo de comutação necessário para descarregar capacitores em uma sequência controlada, a fim de gerar vários impulsos quase simultaneamente. O gerador permitiu controlar o instante da injeção de cada impulso com uma incerteza de 5 ms, com intervalo de tempo mínimo entre os impulsos de 25 ms, podendo-se distribuí-los adequadamente ao longo do

período senoidal da corrente  $I_s$ . O controle de tempo é feito automaticamente por um programador de tempo digital.

#### 4.3.1 Principais Componentes do Gerador Multipulsos

Os valores do capacitor  $C_1$  e dos resistores  $R_1$ , indicados na Fig. 3 (b), são definidos de acordo com as características desejadas para os impulsos de corrente, em amplitude e formas de onda. Estes podem ser obtidos através da ligação de unidades simples em série ou em paralelo, tendo em conta a sua capacidade suportável em termos de tensão e de energia. Cada  $C_1$  é a capacitância resultante de um banco de capacitores de características individuais de  $4,7 \mu\text{F}$ ,  $30 \text{ kV CC}$ , ligados em série e em paralelo. Uma indutância externa pode ser necessária apenas em caso de geração de impulsos com frente de onda muito lenta. Em caso de impulsos com frente rápida, a indutância é indesejada e até mesmo a auto-indutância do gerador deve ser minimizada. Escolhendo-se adequadamente os parâmetros RLC, pode-se gerar impulsos de corrente com tempos de frente na faixa de  $1,0 \mu\text{s}$  a  $30 \mu\text{s}$  e valores de crista de amperes a quiloampères.

Foram utilizados eletrodos feitos de grafite para formar um espaçamento (gap) e desacoplar o gerador de  $I_s$  da fonte de  $I_i$ , impedindo retorno de corrente aos capacitores do gerador de impulsos.

A inovação no Gerador Multipulsos é um conjunto de cinco chaves pneumáticas rápidas, desenvolvidas para proporcionar fechamento momentâneo de contatos elétricos em alta tensão. Cada chave tem um braço principal, feito de uma barra dielétrica de  $700 \text{ mm}$  de comprimento, que se desloca circularmente, segundo um eixo excêntrico e perpendicular ao longo de seu comprimento, conforme Fig. 3c. O ponto do eixo de rotação da chave fica a  $2/3$  do comprimento do seu braço, medindo-se de cima para baixo (Fig. 3). A extremidade de  $1/3$  inferior do braço é ligada a um sistema de propulsão de ar comprimido, e à extremidade de  $2/3$  superior é fixado um braço transversal secundário, feito de uma haste condutora de  $400 \text{ mm}$ . Este braço transversal condutor atua como um contato elétrico móvel, responsável por curto-circuitar, momentaneamente, os contatos fixo e de descarga do gerador. Ambos os contatos são momentaneamente e simultaneamente tocados por cada extremidade do braço transversal condutor durante o movimento semicircular de cada chave.

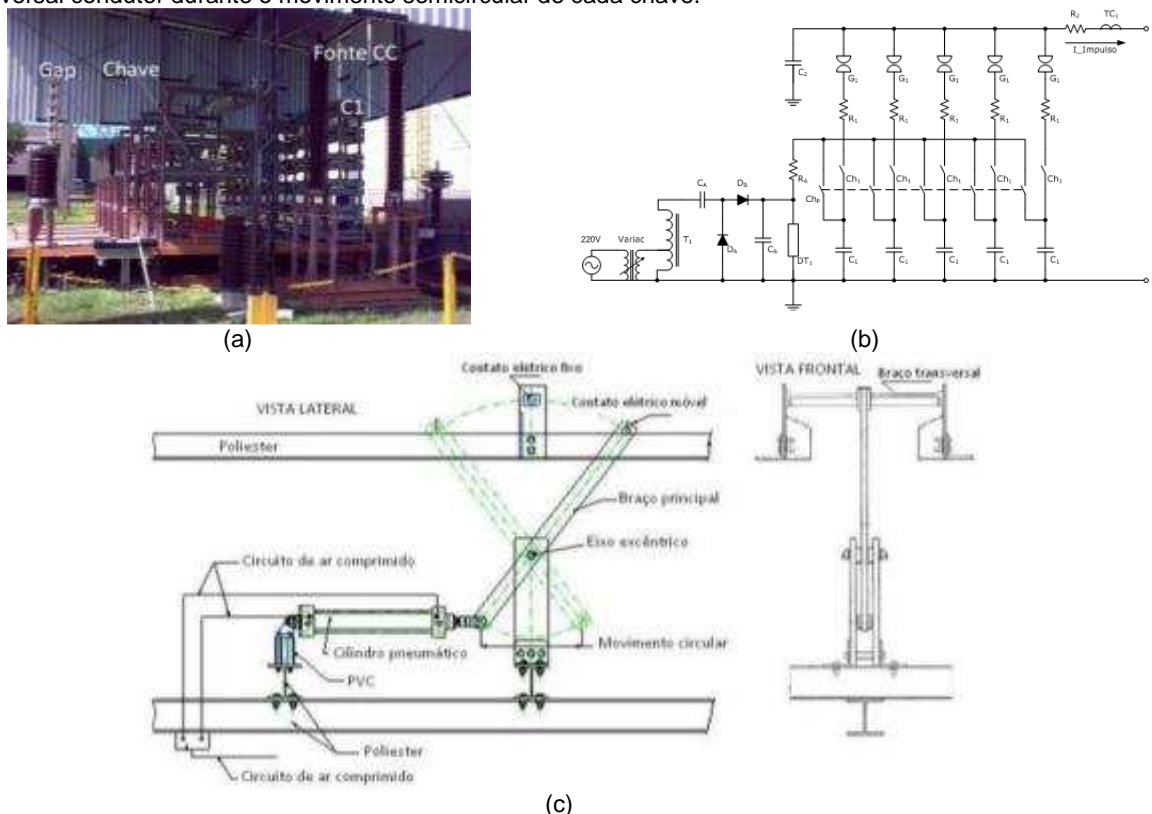


Figura 3 – Ilustração do gerador multipulsos: (a) foto, (b) circuito elétrico e (c) projeto mecânico simplificado.

#### 4.4 Filmagem em alta velocidade

Os ensaios foram filmados por duas câmeras especiais de alta velocidade, a uma taxa de 1000 quadros por segundo, com resolução de  $1280 \times 1024$  pixels. Foi utilizado um conjunto de quatro lentes, com controle de zoom e de foco manual, o que permite filmagem com boa qualidade, independente do ângulo de filmagem e do objeto a ser filmado. Foram utilizadas duas estações de filmagem: EFE e EFD, cada estação com uma câmera controlada

por um computador com o software do próprio fabricante. Ambas as câmeras foram controladas de uma das estações e o disparo das câmeras foi feito simultaneamente pelo operador através de um cabo coaxial que interliga as estações de filmagem (Figura 4).

Através do sincronismo da filmagem dos dois pontos de vista, juntamente com a medição do vento, foi possível fazer uma análise tridimensional da evolução do arco, corroborando a análise do alongamento do arco estimada a partir dos cálculos com as grandezas elétricas medidas. Assim, além de validar o processo do cálculo elétrico que envolve o alongamento do arco, foi possível analisar a influência do vento na extinção do arco. A Figura 5 apresenta um exemplo de imagem de alongamento do arco, para  $I_s = 150$  A.

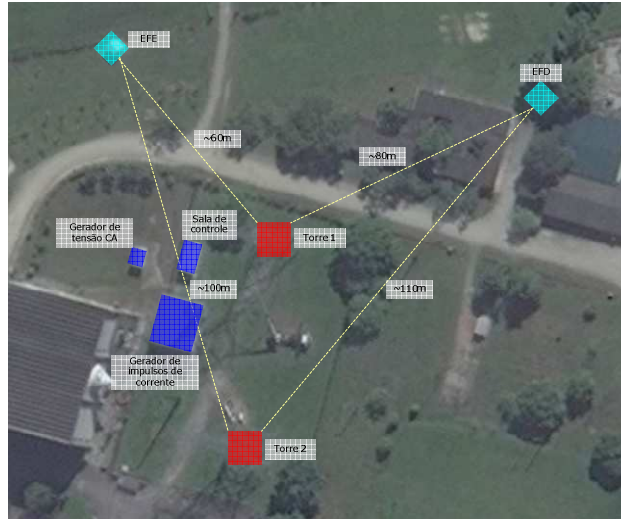


Figura 4 – Visão geral dos pontos de filmagem EFE e EFD.



Figura 5 – Exemplo de imagem de alongamento do arco; para  $I_s = 150$  A.

#### 4.5 Medição de velocidade do vento

Para a medição dos parâmetros do vento, foi instalado um sistema ultrassônico de medição tridimensional de velocidade e direção do vento, composto por um anemômetro ultrassônico omnidirecional e um sistema de transmissão de dados por fibra ótica e um programa computacional que interpreta e armazena os dados gerados.

Na Figura 6, é apresentado o sistema de medição e a disposição de seus componentes. O anemômetro foi instalado na torre experimental aproximadamente à mesma altura dos meios em que os ensaios foram realizados, mas a uma distância segura dos arcos elétricos. Este foi conectado, via cabo coaxial blindado com 20 vias, a um conversor de mídia para que os dados fossem transferidos via fibra ótica da base da torre até a sala de controle, sem riscos de descargas elétricas e interferências eletromagnéticas. Outro conversor de mídia idêntico ao anterior foi utilizado para reconverter os dados para o formato serial, para que seja lido pelo computador na sala de controle. Os dados são mostrados e armazenados por meio de um programa computacional desenvolvido pelo CEPEL na plataforma LabVIEW. O anemômetro e o conversor RS422 são alimentados por uma bateria de 12V fazendo com que ambos fiquem totalmente isolados eletricamente do restante do circuito.

#### 4.6 Medição de grandezas elétricas

Na implementação dos sistemas de medição de corrente a 60 Hz, tensão e de impulsos de corrente, algumas condições desfavoráveis tiveram que ser contornadas, como proteção contra condições ambientais, blindagem a campos eletromagnéticos intensos e acesso aos pontos de medição à distância superiores a 20 m.

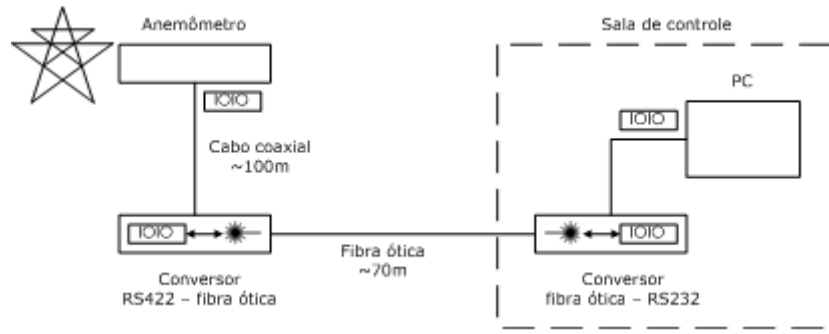


Figura 6 – Diagrama de conexões do sistema de medição de velocidade do vento.

A tensão aos terminais do arco foi medida pela diferença entre as medições de tensão no lado fase e no lado terra. Ambas as medições foram feitas por meio de divisores de tensão, projetados e implementados no CEPEL. A corrente tipo sustentada foi medida através de transformador de corrente e os impulsos de corrente por resistores derivadores de corrente ou de transformadores de corrente, dependendo dos parâmetros do impulso. Assim, serviu-se de um conjunto de divisores de tensão, transformadores de corrente, resistores derivadores de corrente com características diferentes para medir, de maneira confiável, tensões e correntes cobrindo todas as variações dos parâmetros considerados. Na Figura 2, está apresentada a localização dos medidores no circuito de ensaio.

Um desafio vencido para o aprimoramento dos sistemas de medição de grandezas elétricas deveu-se ao fato de que componentes na faixa de frequência de  $10^0$  Hz a  $10^6$  Hz tiveram que ser consideradas nas medições de todas as grandezas, com exatidão adequada tanto na escala vertical como na horizontal. Para isso, as medições foram aquisitadas com resolução vertical de 14 bit e com intervalo de amostragem de 100 ns para ensaios com impulsos de corrente de tempos de frente de 10  $\mu$ s e 5  $\mu$ s, e com intervalo de amostragem de 50 ns para ensaios com impulsos de corrente de tempo de frente de 1  $\mu$ s.

## 5.0 - MODELAGEM DO ARCO

Os modelos de arco elétrico apresentados na literatura, em quase sua totalidade, consideram apenas uma constante de tempo para descrever o comportamento dinâmico do arco. Entretanto, 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 [1, 2] 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. Fisicamente, a representação de dois sub-arcos 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.

Para determinação do modelo deve-se buscar critérios com consistência física, com parâmetros do arco independentes da amplitude e forma de pequenos distúrbios, e modelo dinâmico que satisfaça à característica estática. Sendo assim, o modelo a partir do qual os estudos foram desenvolvidos é conhecido como tipo "Caixa-Cinza", buscando a representação dos 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.

Considerando como exemplo a conjugação de dois sub-arcos do tipo Thiel [k], conforme Fig. 7, o arco pode ter seu comportamento descrito por:

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

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  $\beta$  ( $P_0 = B \cdot g^\beta$ ) são calculados a partir da característica estática do arco [kk].



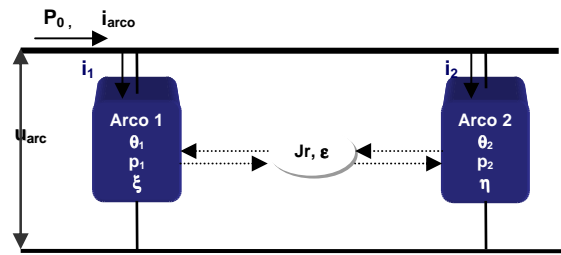


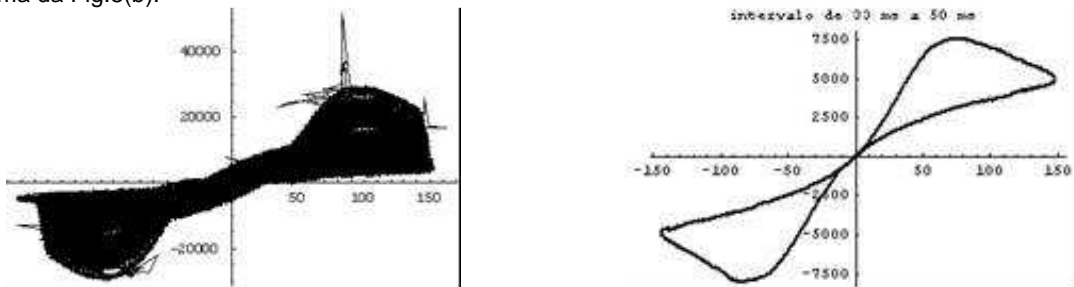
Figura 7 – Representação esquemática do modelo de arco elétrico com dois sub-arcos de Thiel em paralelo

A referência [1] 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 a seguir, a partir da utilização dos dados experimentais. A utilização de dados experimentais é ferramenta essencial não só para análise e ajuste como para validação de qualquer modelo que pretenda ser considerado fisicamente robusto.

### 5.1. Utilização dos Dados Experimentais

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. A partir das medições de tensão e corrente de arco, pode-se estimar uma função ao longo do tempo para o alongamento do arco. Outros dados importantes para assessorar tal análise encontram-se nas filmagens (Fig. 5) e medições de vento [3].

Um outro aspecto importante no estudo do arco é a definição de sua característica estática, uma vez que a partir daí se tem o ponto de operação de onde as manifestações transitórias partem. A título de ilustração, na Fig. 8(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 entende-se a separação, dentre as medições, daquilo que efetivamente se relaciona com o tipo de fenômeno sob avaliação. 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.8(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 8 – Característica Estacionária do Arco ( $U_a \times i_a$  ( $i_a = g(t) \times u(t)$ )), para corrente de 150 A

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

## 6.0 - CONCLUSÃO

Para atender à lacuna existente na literatura de modelagem fisicamente robusta de arco elétrico para estudos de religamento monofásico, foi realizado um projeto P&D teórico-experimental com o objetivo de se obter um modelo de arco elétrico fortemente baseado em dados experimentais confiáveis e representativos do fenômeno real em linhas de transmissão. Uma infraestrutura laboratorial específica, existente, desenvolvida ou adaptada, foi utilizada no projeto envolvendo instalações de torres de transmissão, trecho de linha, fontes de tensão e corrente em alta tensão, sistemas de medição de grandezas elétricas e vento, sistema de registro de imagens, procedimentos de ensaio, técnicas de medição, processamento e armazenamento de sinais. A realização de ensaios em um trecho de linha de transmissão experimental, com características iguais a de uma LT de 500kV típica de Furnas, foi essencial para que os resultados fossem confiáveis, visto que num protótipo reduzido, fatores de grande influência ao alongamento e à extinção do arco, como o vento, não seriam considerados.

Para que a faixa de corrente de ensaio abrangesse desde os valores típicos de curto-circuito (kA) até os de arco secundário na proximidade da extinção (A), foi utilizado como fonte 60 Hz o laboratório de alta potência do CEPEL, imprescindível para o projeto por causa das potências elevadas envolvidas no fenômeno. Outro ponto importante a ser superado foi a alta tensão de Thevenin necessária para se manter arcos estáveis nos casos de baixas correntes que caracterizam arcos secundários, o que se conseguiu utilizando-se um transformador elevador que proveu tensão de circuito aberto igual a 250 kV. Assim, nos ensaios da pesquisa, foram utilizadas fontes com alta potência (até 500 MVA) e alta tensão (até 250 kV).

Foi desenvolvido pelo CEPEL, também para o projeto, um gerador multipulsos capaz de gerar e injetar no arco impulsos de corrente com diferentes valores de tempo de frente, amplitude e de polaridade, de modo a permitir a análise do comportamento do arco em faixa de frequência de até MHz.

A influência do vento sobre o arco e o alongamento deste foram estudados a partir de dados de vento obtidos por meio de medidor ultrassônico tridimensional e de registro de imagens do arco obtidas por câmeras de alta velocidade. A velocidade do vento foi essencial para análise do alongamento do arco e elemento importante para a elaboração do modelo.

Como trabalho futuro, pretende-se não só complementar o procedimento de validação do modelo desenvolvido a partir deste projeto, como comprovar seu comportamento diante das condições impostas pela rede durante uma manobra monofásica completa. Para isso, o comportamento dinâmico do arco será representado, em laboratório, com variação da corrente no tempo e tendo uma impedância no circuito de ensaio, em paralelo com o arco. Esta impedância será variável em função da frequência e terá características representativas da impedância da rede vista dos terminais do arco, em condições reais de operação de uma linha de transmissão nas diversas etapas associadas a manobra de abertura e religamento monofásico.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PORTELA, C., DUPONT, C., MEIRELES, M. P., *Deterministic and Statistic Arc Modelling*. CIGRÉ 13-107, 1994 SESSION (28 AUG – 3 SEPT).
- [2] PORTELA, C - *Estudos de Religamento Monofásico – Pesquisa e Desenvolvimento de Modelo do Arco Secundário* - XX SNPTEE, GRUPO V, 2009
- [3] CÂMARA, A., *Extinção do Arco Secundário com Manobras Monofásicas. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise*, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2003.
- [4] CÂMARA, A., *Modelagem de Arco Elétrico no Ar. Aplicações em Sistemas de Potência*. COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Elétrica, 2010.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Guimarães Rodrigues, nascido em São Gonçalo, RJ, em 25/03/1972, possui graduação em Engenharia Elétrica Ênfase em Sistema de Potência pela Universidade Federal Fluminense (1994), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1997) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2004). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em ensaios em equipamentos de alta tensão e em modelagem de sistema de aterramento.