



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Metodologia para estudo de sobretensões decorrente de manobras de chaves seccionadoras em equipamentos de SEs isoladas a ar e/ou gás

GUILHERME SARCINELLI LUZ(1); ARJAN CARVALHO VINHAES(2);
ONS(1);ONS(2);

RESUMO

Ocorrências de falhas em equipamentos, sem identificação adequada de causa, tem levantado a suspeita de manobra de chave seccionadora ser uma das principais contribuições. Embora não seja um tema novo, tendo em vista os diversos artigos já apresentados no Brasil e no mundo, particularmente no que se referem às GIS, este artigo se propõe a: descrever o cálculo que permite a identificação da forma de onda das tensões que aparecem nos terminais de um equipamento decorrentes da manobra de chaves seccionadoras; apresentar alguns detalhes que envolvem as simulações deste tipo de transitório e indicar alguns aspectos relevantes envolvidos nestes fenômenos.

PALAVRAS-CHAVE

Tensão Transitória Rápida, Chaves Seccionadoras, Transitório Eletromagnético, Programa EMTP/ATP

1.0 - INTRODUÇÃO

A integridade de um equipamento elétrico é definida pela capacidade de seu isolamento suportar os diversos surtos de energia que o atingem ao longo de sua vida útil. Para que sua vida útil se mantenha satisfatória dentro de um período 30 anos, tempo este suficiente para que se faça a sua substituição, é necessário que as condições dielétricas do seu isolamento não sejam significativamente alteradas devido aos surtos que o atinjam. Caracterizados por sua forma de onda nas dimensões de tempo e frequência, os surtos são resultado de parcelas do impulso de energia gerado por um determinado fenômeno, quais sejam: uma descarga atmosférica através de uma das linhas, uma manobra de chave isolando ou energizando um trecho da subestação, uma manobra de disjuntor energizando ou desenergizando um equipamento ou uma linha, etc.

O surto de energia, gerador de um fenômeno em análise, atravessa os diversos circuitos que interligam toda a subestação partilhando sua energia até que a mesma seja igualmente distribuída dentro do trecho em que esteja contida. Parte desta energia ou toda ela pode também se dissipar pelas linhas conectadas à subestação. Antes que o surto amortecça, contudo, ele poderá causar mais ou menos danos aos equipamentos conectados em seu trajeto.

Com referência a suportabilidade do isolamento, os surtos podem ser divididos em duas categorias:

- Surtos de menor intensidade** que não chegam a superar a resiliência de seu isolamento e poderiam, a princípio, ser desprezados.
- Surtos de maior intensidade** que podem esgaçar a suportabilidade do material, produzindo um dano tal, cujo efeito cumulativo, iniciando-se por um ponto mais frágil, acaba desenvolvendo um caminho de enfraquecimento do dielétrico que culminará na ocorrência de um evento mais expressivo.

Um equipamento deve estar adequadamente protegido e seu isolamento ser devidamente dimensionado de tal modo que os **surtos de maior intensidade** somente ocorram em um número tal que o seu tempo de vida útil não seja significativamente alterado.

Tendo em vista o número de chaves seccionadoras em uma subestação, o número de manobras esperadas ao longo de sua operação e do número elevado de surtos produzidos em uma única manobra, o nível de isolamento especificado - para qualquer dos equipamentos - deve ser suficiente para garantir que os surtos decorrentes de manobra de chaves seccionadoras estejam contidos na primeira categoria, ou seja, estejam dentro da resiliência do material que compõe o seu isolamento.

As máximas tensões geradas por manobras de chaves seccionadoras não apresentam valores aparentemente relevantes pelo fato de estarem muito abaixo dos níveis de atuação dos para-raios. Por este motivo, podem parecer não oferecer danos significativos ao isolamento dos equipamentos. Entretanto, uma análise mais precisa mostra que o efeito de sua frente de onda e do número de ocorrências precisa ser melhor investigado e, portanto, considerado na especificação dos novos equipamentos.

A evolução das tecnologias que modelam e, conseqüentemente, desenvolvem o isolamento dos diversos equipamentos que fazem parte de uma subestação não foi devidamente acompanhada por pesquisas mais detalhadas do efeito dos transitórios rápidos sobre o dielétrico presente no isolamento desses equipamentos. Por esta razão as normas que determinam os critérios para a especificação de um equipamento, não sofreram as devidas revisões de modo a considerar o número de ocorrências destes transitórios.

2.0 - DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE MANOBRA DE CHAVE

O fenômeno decorrente da manobra de chave seccionadora se desenvolve ao longo do movimento da chave, onde ocorrem - em diversos pontos da separação física entre os polos - uma sucessão de descargas parciais (reignições). Toda vez que a diferença de tensão entre seus polos excede a suportabilidade do dielétrico, seja no ar ou em SF₆, inicia-se um arco elétrico. Este arco se sustenta em função da amplitude da corrente que mantém a transferência de energia entre os dois polos da chave. Por sua vez, a amplitude desta corrente tende a diminuir à medida que o trecho isolado seja carregado - através do arco - com a tensão do outro polo, que se conecta à fonte de alimentação. Durante o transitório, contudo, a onda de energia que se movimenta através dos terminais da chave pode sofrer reflexões proveniente da própria subestação e alterar as condições através do arco.

Após a extinção do arco, os dois surtos de energia - um em cada polo da chave - seguirão se propagando e produzindo reflexões, respectivamente, ao longo do trecho isolado e ao longo da subestação, até que os mesmos amortecerem. No trecho isolado a tensão tende a se equalizar em todos os pontos após atuar sobre o capacitor de equalização do disjuntor aberto produzindo também uma transferência do pulso. Tendo em vista que um disjuntor é, em geral, isolado por uma chave de cada lado, este pulso transferido através do capacitor de equalização poderá encontrar a chave oposta ao disjuntor aberta ou fechada. No caso de a chave oposta estar aberta, o trecho estará completamente isolado. Já para o caso onde a chave oposta se encontra fechada, o pulso transferido irá se propagar pela subestação somando-se ao surto gerado pelo outro polo da chave. Neste caso, a tensão através do capacitor será determinada pela tensão da chave fechada e influenciará a tensão do trecho isolado.

No lado do trecho isolado, após amortecer, a tensão permanecerá constante se a chave oposta ao disjuntor estiver aberta. Se estiver fechada, esta tensão irá variar com um valor proporcional à tensão do sistema. No lado da subestação, as reflexões se distribuirão ao longo da mesma e se dissiparão, não sem antes impactar o isolamento dos equipamentos a ela conectados. Neste lado da chave, a tensão seguirá a tensão do sistema fazendo com que em outro momento uma nova reignição se estabeleça. Neste caso, então, o fenômeno se repete, porém com um valor de tensão entre os polos maior ou menor conforme esteja, respectivamente, abrindo ou fechando. A amplitude do pulso é função da diferença de tensão entre os polos que, associada ao tempo de duração do arco, determinam a quantidade de energia transferida. Assim, a cada reignição o fenômeno se repete e produzirá novas ondas formadoras dos surtos que alcançam o equipamento em análise.

Na manobra de fechamento, a primeira reignição é a mais crítica uma vez que a diferença de tensão é maior e segue diminuindo com a diminuição do dielétrico à medida que os polos da chave se aproximam. Na manobra de abertura, ocorre o inverso e, com isso, uma maior reignição ao final. Isto porque, à medida que os polos se separam, o trecho isolado vai sendo carregado com uma tensão que poderá ser cada vez maior e, ao alcançar a maior distância, em que o dielétrico ainda seja rompido, provocará a maior reignição. Por esta razão, nas simulações deste tipo de manobra, é comum considerar-se a pior condição de carregamento prévio do trecho isolado com um valor de -1.0 pu, enquanto o outro polo se encontra com a tensão de +1.0 pu. Esta situação, contudo, só ocorre para a condição em que a chave oposta ao disjuntor se encontra aberta. Uma modelagem mais complexa do arco poderá produzir uma diferença menor de tensão.

3.0 - MODELAGEM DE UMA SUBESTAÇÃO COM SEUS EQUIPAMENTOS

Para obter-se, por simulação, a curva de tensão nos terminais de um equipamento que se deseja analisar é necessário um levantamento prévio das 3 dimensões espaciais de cada trecho da subestação de modo a modelar tanto as barras como os circuitos de conexão entre os seus diversos equipamentos. Cada trecho e conexões da subestação deve ser modelado como uma linha de parâmetros distribuídos, preferencialmente considerando a sua variação com a frequência. Podem também ser modelados calculando-os para uma frequência específica (acima de 100kHz) e desprezar os valores de resistência que podem exceder a impedância de surto, resultando em problemas numéricos. Como as capacitâncias dos diversos equipamentos são componentes armazenadores de energia, que tendem a capturar parte da energia do surto e provocar alterações na sua trajetória, elas também

devem ser consideradas. Deste modo, cada equipamento ao longo do caminho de propagação das ondas de energia, precisará ser modelado, pelo menos, por sua capacitância equivalente.

Como a intensidade de tensão, que o isolamento de um equipamento está submetido, depende, essencialmente, da característica da impedância do mesmo, o equipamento em análise, deverá necessariamente, ser representado pelo seu modelo no domínio da frequência. Esta modelagem pode ser mais ou menos complexa. Cada parte interna do isolamento poderá estar submetida a uma tensão diferente da tensão terminal que o alcança. Esta análise, contudo, exige uma modelagem específica que, em geral, apenas o fabricante detém. A medição de sua resposta em frequência permite a síntese de um circuito RLC que torna viável a obtenção do perfil da tensão em seus terminais. A decomposição do espectro de frequência da tensão em seu terminal permite uma análise das parcelas do surto de energia que alcançam sua estrutura interna. Assim, esta informação poderá fornecer ao fabricante do equipamento em análise os elementos de que necessita para uma avaliação mais detalhada da suportabilidade interna do seu isolamento.

4.0 - REFLEXOES NA SUBESTAÇÃO DECORRENTES DA MANOBRA DE CHAVE

4.1 ANÁLISE SIMPLIFICADA

A Figura 1 apresenta alguns componentes básicos para o entendimento do fenômeno de reigitação e reflexões na subestação. Nela estão representadas apenas um trecho de 10m isolado pelo disjuntor e a chave. Além disso, foram representados, em cada lado do trecho isolado, alguns trechos de 5km de linha de transmissão com a mesma modelagem do trecho isolado com a finalidade didática de observar as ondas dos surtos de energia que caminham para cada qual dos dois lados através da tensão nos pontos DJJM1, LIJM2 e LIJM1, bem como CHJM1, LIJM3, LIJM4, LIJM5 e LIJM6. Como ao final de cada lado a fonte se encontra conectada a uma impedância de sequência positiva e zero compatível com a impedância de surto da linha modelada, não se observam reflexões neste ponto; apenas a onda incidente. As capacitâncias equivalentes da chave e do disjuntor não foram ainda consideradas, porém serão mais adiante.

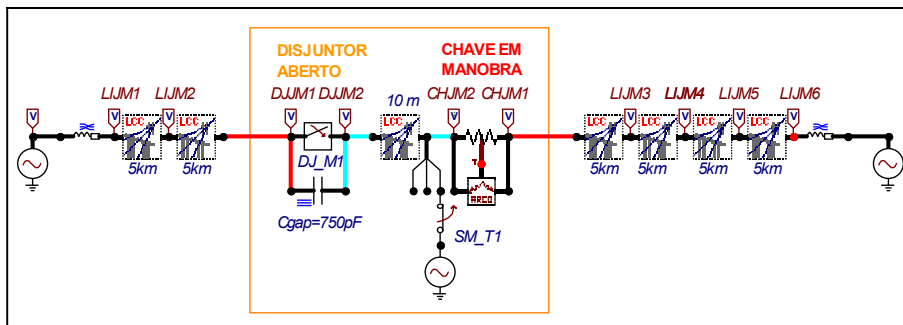


FIGURA 1 – Circuito de análise das ondas decorrentes de uma reigitação na chave seccionadora

A Figura 2 apresenta o surto de corrente associado à descarga de energia entre os dois polos (CHJM1 e CHJM2) da chave que, no instante inicial, passam a ter o mesmo valor de tensão, correspondente ao valor médio entre as duas tensões antes do fechamento (+1.0 pu e -1.0 pu, ou seja 0.0) até que o arco interrompa novamente o contato. A Figura 3 mostra as tensões nos polos da chave bem como nos terminais do trecho isolado. O surto de energia formado pela variação da tensão alcança o disjuntor aberto (DJJM2) após $0.033 \mu\text{s}$ ($L/v = 10\text{m}/3\text{E}8 \text{ m/s}$) e transfere o surto de tensão para o outro lado do seu capacitor de equalização (DJJM1). Este surto percorre os dois trechos de 5 km de linha alcançando os pontos LIJM2 e LIJM1 após $16.6 \mu\text{s}$ ($L/v = 5 \text{ km}/3\text{E}8 \text{ m/s}$).

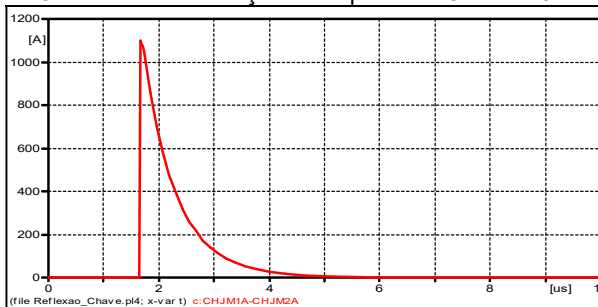


FIGURA 2 – Corrente através da chave

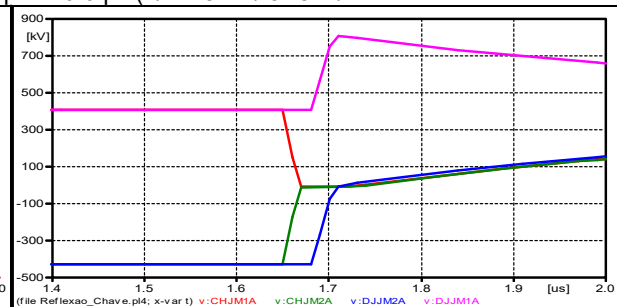


FIGURA 3 - Tensões – polos da chave e disjuntor

A Figura 4 apresenta as ondas de tensão de cada um dos lados do trecho. Observa-se que as componentes de sequência positiva e zero vão se desacoplando com o tempo, tendo em vista a diferença das velocidades de propagação entre as duas componentes, bem como o amortecimento bem mais acentuado da sequência zero, como mostrado no detalhe da Figura 5.

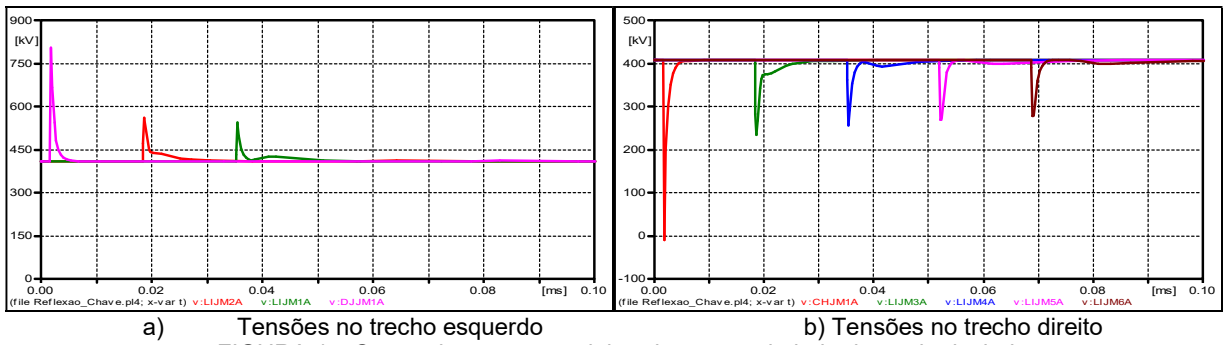


FIGURA 4 – Surtos de tensão caminhando para cada lado do trecho isolado

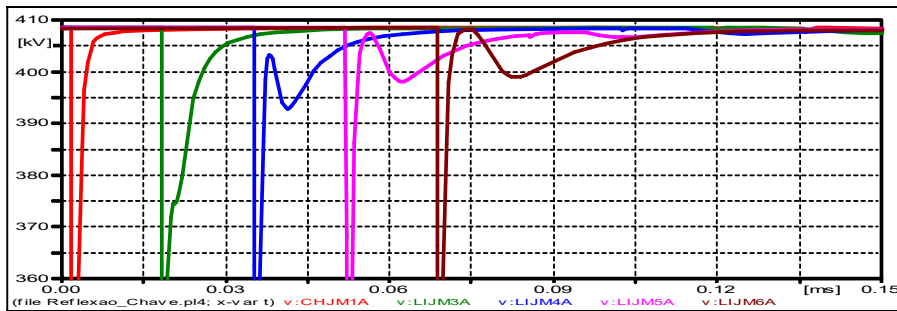


FIGURA 5 – Detalhe das componentes de sequência avançando com velocidades diferentes

Estes resultados consideraram uma modelagem simplificada do arco, para representar a reignição, baseada nas equações de Cassie-Mayr. Entretanto, resultados semelhantes, porém, mais conservadores, são obtidos com uma chave simples (CH→CS, LI→LS) considerando sua abertura 0,05 μ s após o fechamento, para representar o tempo de arco, e uma margem de corrente de 1A. A Figura 6 apresenta a comparação da corrente através da chave para os dois modelos da reignição, enquanto as Figuras 7 e 8 apresentam a comparação das ondas de surto de tensão em dois pontos equivalentes de cada um dos lados. A Figura 9 apresenta a comparação para o ponto mais distante de um dos lados. Modelagens mais complexas do arco podem ser analisadas como a apresentada na referência[1].

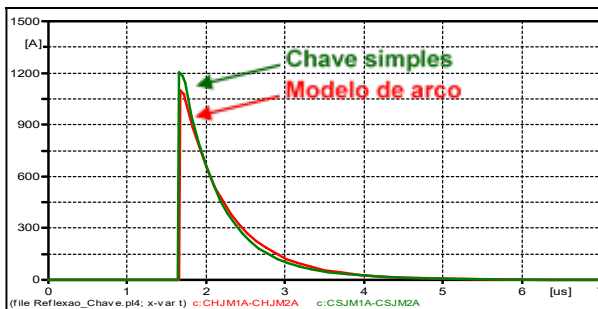


FIGURA 6 – Corrente através da chave

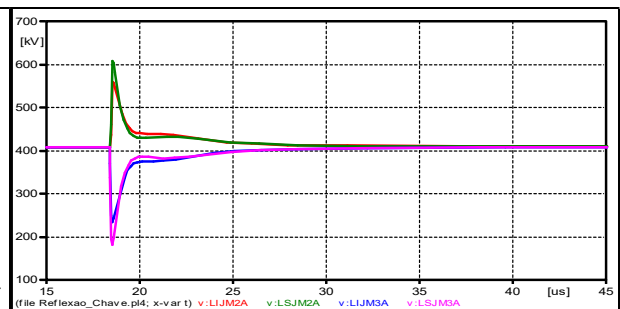


FIGURA 7 – Surtos de tensão na linha – pontos 2 e 3

Estes resultados consideraram a representação de cada trecho através do modelo J.Marti. Resultados semelhantes, porém, ainda mais conservadores, são obtidos com os modelos de parâmetros distribuídos calculados pelo modelo Bergeron para uma frequência de 1MHz e eliminando-se a resistência, já que o modelo Bergeron representa a resistência total de forma concentrada no meio e nas extremidades da linha.

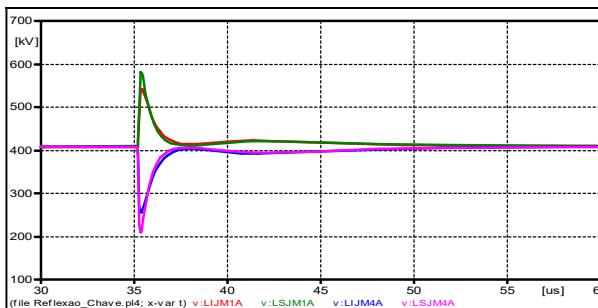


FIGURA 8 – Surtos de tensão na linha – pontos 1 e 4

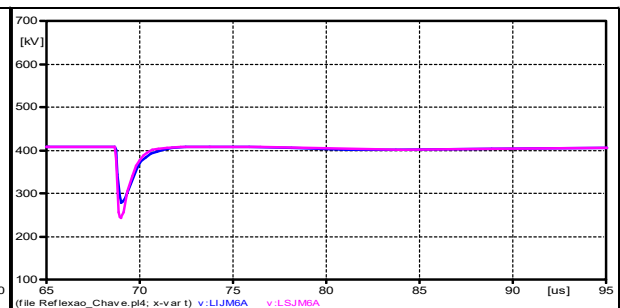


FIGURA 9 – Surtos de tensão na linha – ponto 6

A Figura 10 apresenta a comparação da corrente através da chave para os dois modelos de linha (J.Marti e Bergeron: JM→BC) mantendo a modelagem da chave para a reignição. Embora a corrente seja basicamente a mesma, as ondas de surto de tensão nos dois pontos equivalentes de cada um dos lados são diferentes, pois a

componente de sequência positiva é maior e a de sequência zero, além de bem maior, tem sua velocidade mais próxima da de sequência positiva, como pode ser visto na comparação da Figura 11.

Este exemplo, além de permitir visualizar a propagação das ondas decorrentes da reignição na chave, demonstra a necessidade de modelar adequadamente as impedâncias de surto conectadas às linhas que saem da subestação de modo a não produzirem reflexões adicionais não consistentes, uma vez que ondas que alcançam as linhas só terão algum possível retorno muito posterior à conclusão do fenômeno em análise e, certamente, com valores bem amortecidos. Tais reflexões, portanto, seriam indevidas. Demonstra também que a modelagem por parâmetros constantes (Bergeron) é mais conservativa. Quanto à modelagem do arco, existem algumas situações em que ocorrem reflexões com o arco ainda ativado alterando, com isso, a corrente, como será visto mais adiante.

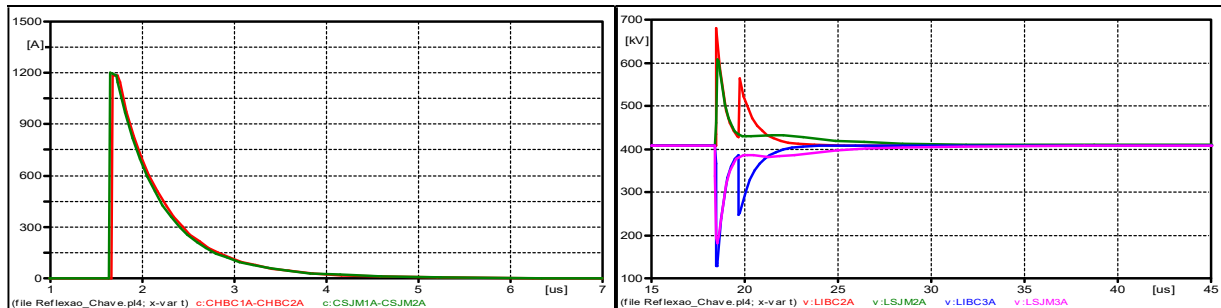


FIGURA 10 – Corrente através da chave

FIGURA 11 – Surto de tensão na linha – pontos 2 e 3

4.2 ANÁLISE DAS REFLEXÕES CONSIDERANDO UMA SUBESTAÇÃO BÁSICA

Ainda para efeito didático, o circuito da Figura 1 pode ser expandido para uma configuração inicial de uma subestação de 500kV com a configuração barra dupla com disjuntor e meio e quatro saídas de linhas como mostrado na Figura 12. As distâncias internas do pátio da subestação foram simplificadas para 15m, exceto a barra e as saídas de linha. É fato que em uma subestação real novos componentes precisariam ser considerados, tais como transformadores, para-raios, TC's, TPC's, etc. Este passo, contudo, será considerado mais adiante. Apenas o TC do trecho isolado em análise foi representado tendo em vista sua maior influência no fenômeno em estudo. Para tal utilizou-se um modelo RLC de modo a considerar sua variação com a frequência.

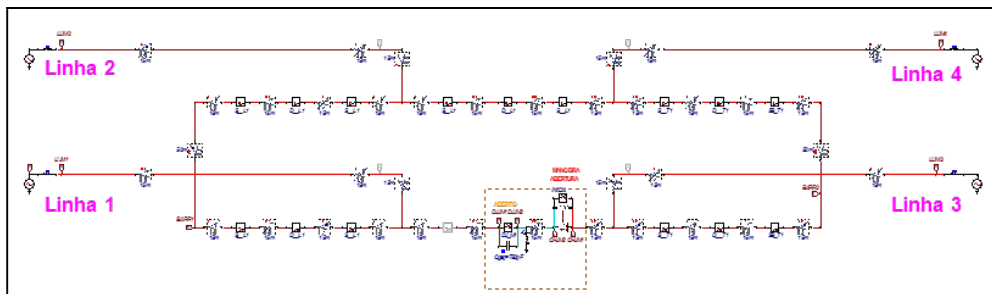


FIGURA 12 – Circuito expandido semelhante a uma subestação

4.2.1 Condição para a máxima tensão de reignição

Partindo deste novo caso, considerando os parâmetros dos trechos variando com a frequência e a modelagem do arco, foi analisada a máxima tensão de reignição que ocorre ao longo de uma manobra de abertura da chave. A manobra foi simulada, estando a chave oposta ao disjuntor fechada ou aberta, para três diferentes velocidades da trajetória do dielétrico entre os polos. Para isso foram considerados os tempos de 0.5s, 1.0s e 2.0s para uma distância fixa onde as reignições ocorrem no trecho inicial e depois cessam.

Na Figura 12 a chave oposta ao disjuntor foi representada aberta. A Figura 13a apresenta as tensões entre os polos da chave nas três fases associado ao tempo de 0.5s da manobra de abertura, considerando a chave oposta ao disjuntor fechada, e a Figura 13b durante as últimas reignições de apenas uma das fases. Nesta condição, a diferença de tensão entre os polos da chave sofre a ação da fonte através do capacitor de equalização do disjuntor extinguindo as reignições para uma diferença máxima de tensão pouco maior do que 1 pu.

A Figura 14 apresenta as mesmas tensões considerando a chave oposta ao disjuntor aberta. Como para esta condição a tensão no trecho isolado não sofre ação da fonte, a diferença entre os polos da chave produz uma diferença maior para a máxima tensão de reignição alcançando valores de até 2.1 pu. A geração de um arquivo MODELS contendo a tensão associada a cada reignição permitiu determinar para cada uma das três velocidades a tensão máxima e o número de reignições, mostrado na Tabela 1 para as duas condições da chave oposta. Observa-se que somente a condição da chave oposta aberta pode produzir a máxima tensão de reignição correspondente a 2.1pu, para a tensão de alimentação de 1.05pu. Quanto mais lenta a chave maior o número de reignições, porém, uma vez atingida a condição máxima, o valor máximo se mantém.

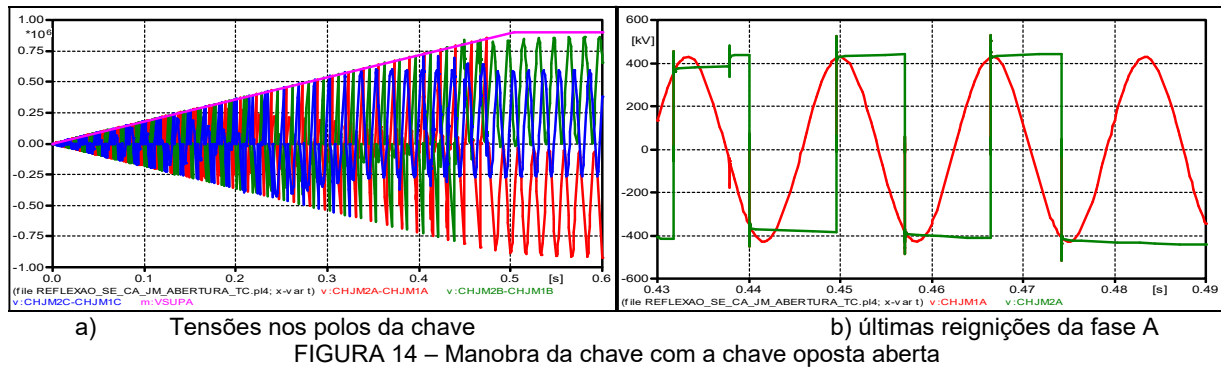
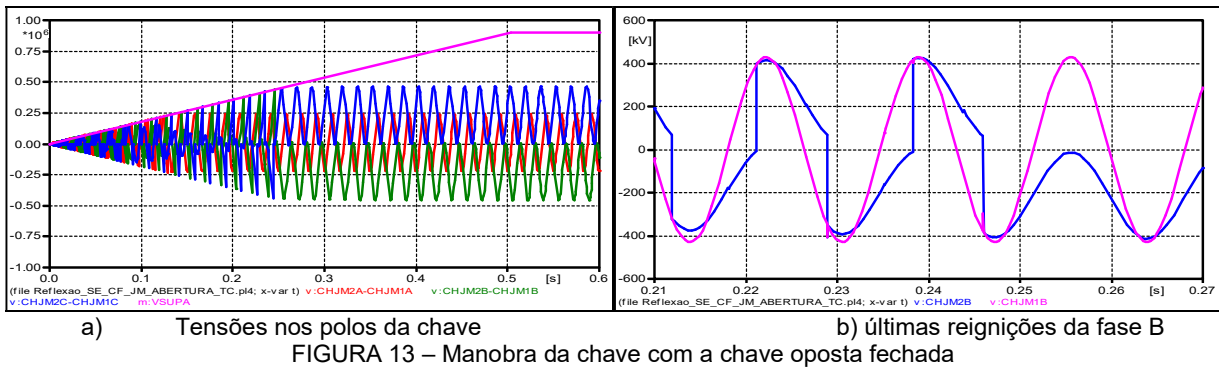


Tabela 1 – Tensão máxima de reignição em função da velocidade e da condição da chave oposta

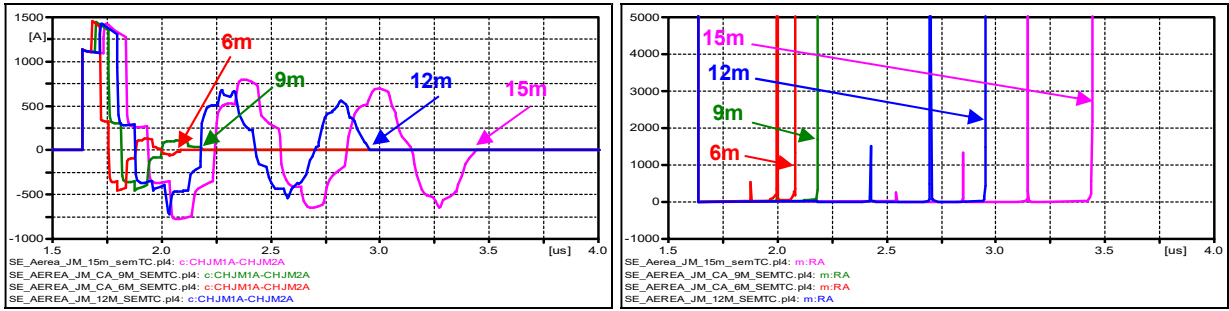
Tempo de abertura da chave (s)	CHAVE OPOSTA FECHADA		CHAVE OPOSTA ABERTA	
	Tensão máxima de reignição (pu)	Número total de reignições por fase	Tensão máxima de reignição (pu)	Número total de reignições por fase
0.5	1.0	102	1.96	204
1.0	1.13	204	2.09	420
2.0	1.13	426	2.09	853

4.2.2 Análise das tensões ao longo da subestação

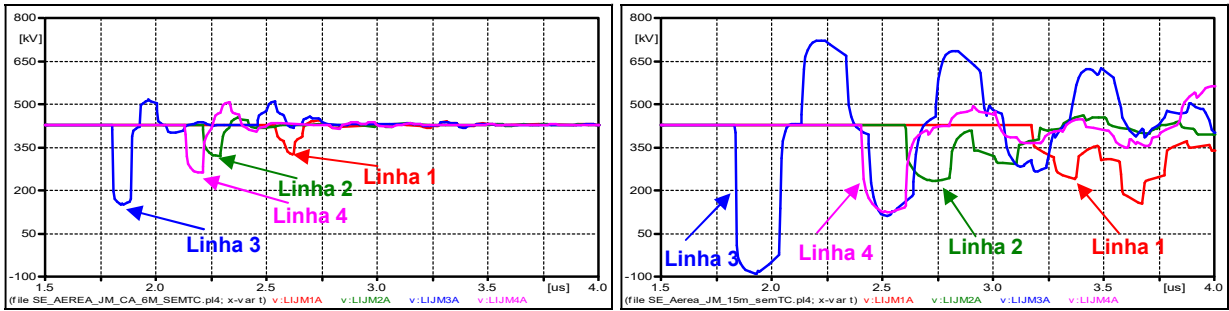
A tensão em algum ponto da subestação decorrente da máxima reignição pode então ser analisada para uma única fase, modelando apenas a última reignição, a partir da pré-carga do trecho isolado, como mostrado na Figura 1. Para uma análise inicial considerou-se o trecho isolado sem a presença do TC e diferentes comprimentos das conexões que compõe o vão de disjuntor e meio, quais sejam 15m, 12m, 9m e 6m, mantendo-se os demais comprimentos constantes.

A Figura 15 apresenta a corrente de arco e a resistência que modela o arco através da chave manobrada para cada um dos comprimentos considerados. É fácil observar que os instantes de variação abrupta da resistência do arco correspondem ao da interrupção da corrente. A Figura 16 apresenta o resultado do surto que alcança a saída de cada uma das quatro linhas (LIJM1A, LIJM2A, LIJM3A e LIJM4A) após percorrer toda a subestação. Observa-se que:

- O arco tenta extinguir-se em torno de cada passagem da corrente pelo zero, mas acaba sendo reacendido enquanto o valor eficaz da corrente não se reduza o suficiente.
- Enquanto o arco não se extingue, as reflexões, produzidas por toda a subestação, fazem a tensão do trecho isolado acompanhar a tensão nos dois polos da chave, conectados ainda pelo arco.
- Uma vez interrompida a conexão entre polos da chave pela variação abrupta da resistência do arco, o valor da tensão neste instante definirá a carga residual no trecho isolado que será função da polaridade da corrente no arco durante a troca de energia entre a subestação e o trecho.
- Tendo em vista que as ondas que saem pelas linhas não sofrem reflexões, a tensão em todos os pontos da subestação tende ao valor de regime antes do evento.
- Quanto maior o comprimento entre as conexões, maior a energia armazenada no trecho isolado, bem como maior a largura do surto devido ao maior tempo de reflexão.
- Para os dois comprimentos maiores, o tempo de arco é maior permitindo um intercâmbio maior de energia entre o trecho isolado e a subestação. Isso faz com que o surto se componha de forma diferente e alcance amplitudes maiores quando comparados aos dois comprimentos menores.
- O surto resultante na saída de cada linha apresenta instantes diferentes de chegada. A linha 3 é a mais próxima do ponto onde o surto se inicia, enquanto que a linha 1 é a mais distante. As linhas 4 e 2 são intermediárias, nesta ordem.

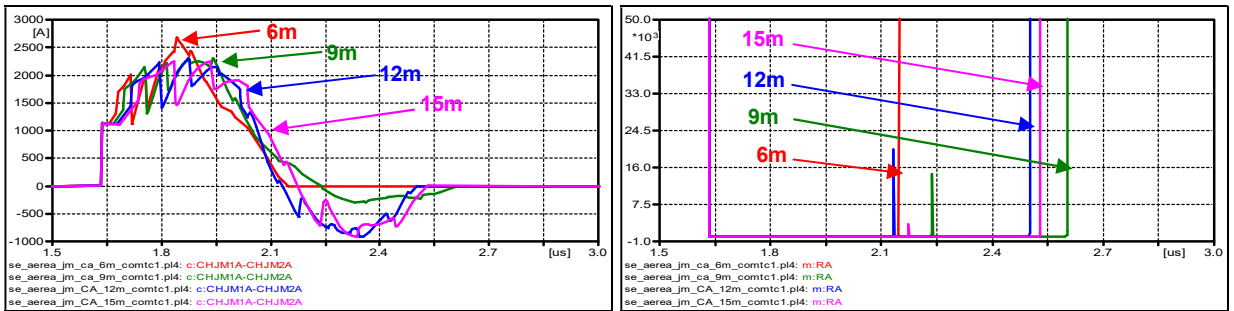


a) Corrente do arco
 b) Resistência do arco
 Figura 15 – Corrente e resistência do arco da chave para os diferentes comprimentos – sem TC



a) Tensões nas saídas das 4 linhas – 6m
 b) Tensões nas saídas das 4 linhas – 15m
 Figura 16 – Tensões nas saídas das 4 linhas para comprimentos de 6 e 15m

É importante observar que, nos resultados acima, o TC não foi considerado no interior do trecho isolado. A inclusão do TC, no ponto médio da conexão entre a chave e o disjuntor, acrescenta uma capacitância ao trecho isolado que aumenta a energia armazenada e faz com que o arco se comporte de forma um pouco mais independente do comprimento das conexões. Isso pode ser observado na Figura 17 que apresenta a corrente e a resistência no arco para os diversos comprimentos, considerando a presença do TC no trecho isolado.



a) Corrente do arco
 b) Resistência do arco
 Figura 17 – Corrente e resistência do arco da chave para os diferentes comprimentos – com TC

A Figura 18 apresenta as tensões sobre o TC para cada um dos comprimentos. De acordo com o intercâmbio de energia, observado pela corrente da Figura 17a, a tensão do trecho isolado fica mais ou menos alta após a interrupção do arco, como mencionado na observação c) acima. A Figura 19 mostra a comparação da análise espectral (janela de 20µs) da tensão sobre o TC e de uma rampa equivalente, onde é possível identificar as componentes de mais alta frequência dependentes do comprimento. Observa-se que a frequência e as amplitudes são inversamente proporcionais à distância.

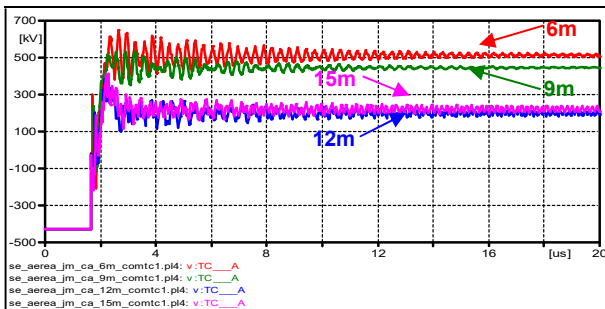


Figura 18 – Tensão sobre o TC

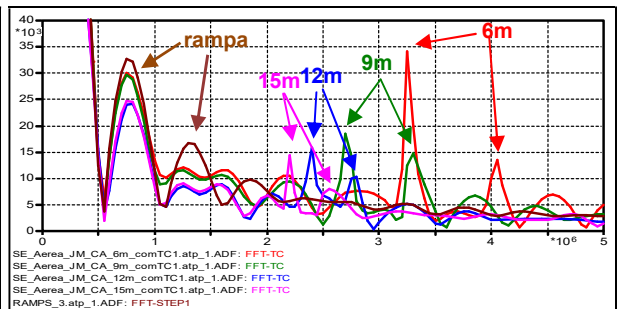


Figura 19 – FFT da tensão sobre o TC

4.3 ANÁLISE DAS REFLEXÕES CONSIDERANDO UMA SUBESTAÇÃO MAIS REAL

Seguindo o propósito didático de tornar o circuito analisado cada vez mais próximo de uma subestação real, a Figura 20, apresenta um novo circuito onde foi introduzido mais um bay de chaves e disjuntores com duas novas saídas compondo dois transformadores e quatro linhas. A representação dos transformadores corresponde a um modelo levantado a partir de uma resposta em frequência medida e ajustada de modo a reproduzir, em certa medida, os pontos de ressonância série e paralela em uma faixa até 2MHz. Foi escolhido o comprimento de 9m por ser aproximado aos de uma subestação de 500kV conhecida, embora as distâncias não sejam todas iguais dentro de um mesmo bay como aqui. Foram também introduzidos neste circuito TPC's nas saídas de linhas, TC's em cada trecho do bay, bem como para-raios nas saídas de linhas e transformadores e as capacitâncias equivalentes das chaves fechadas. Foi considerado apenas o caso da chave oposta ao disjuntor aberta uma vez que, como foi demonstrado no item 4.2.1, é a condição que produz o maior valor de pré-carga e, portanto, a maior tensão de reignição. A fim de avaliar a influência da modelagem dos parâmetros dos condutores, foram consideradas as representações por J.Marti, ou seja, variando com a frequência e pelo o modelo de Bergeron calculado para a frequência de 500kHz.

A Figura 21 apresenta a corrente de arco na chave e a corrente e tensão no TC, para os dois modelos, J.Marti e Bergeron a 500kHz. Uma pequena alteração na potência do arco (de 900 para 1000 kW) permitiu que ambos apresentassem o mesmo tempo de arco e, conseqüentemente, produzissem respostas muito próximas. Este fato mostra que o comportamento do arco é função de seus parâmetros, determinados pelo dielétrico (no ar ou no SF6), mas também é definido pelas tensões nos terminais da chave que, por sua vez são resultantes das reflexões que ocorrem em cada lado da chave. Se o equipamento em foco for um dos transformadores, a tensão que alcança o mesmo terá pouca variação, mas se for o TC do trecho isolado, o comportamento do arco terá maior influência. Além disso, a representação com o modelo Bergeron calculado com uma frequência adequada é capaz de reproduzir com boa aproximação o comportamento do modelo com parâmetros dependente da frequência.

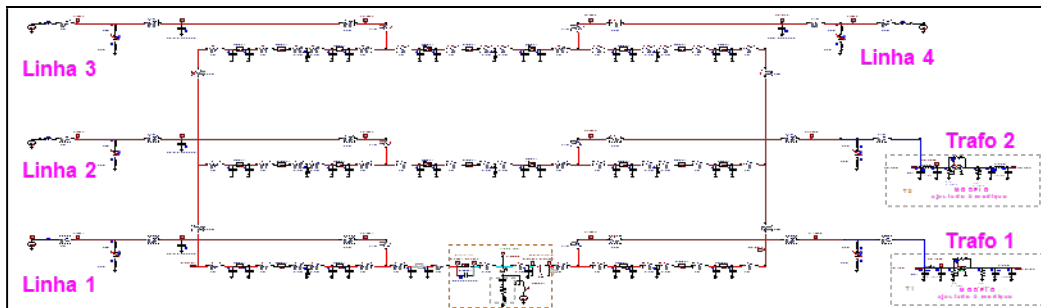
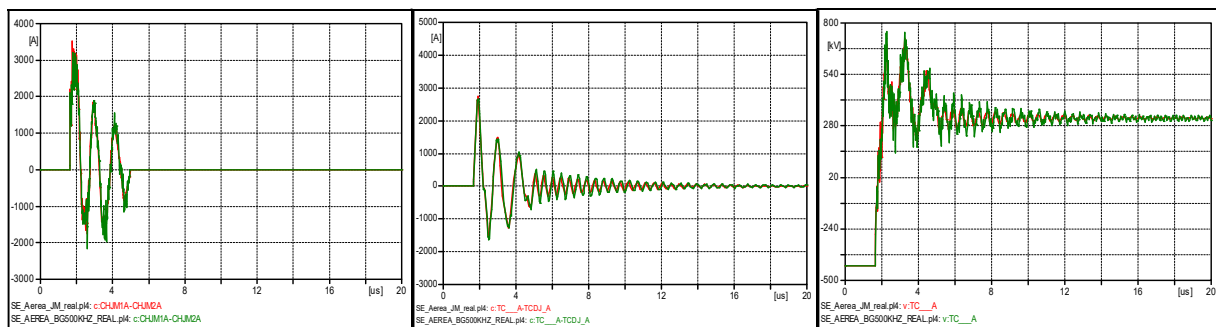


Figura 20 – Circuito ampliado mais próximo de uma subestação real



a) Corrente de arco na chave

b) Corrente através do TC

c) Tensão no terminal do TC

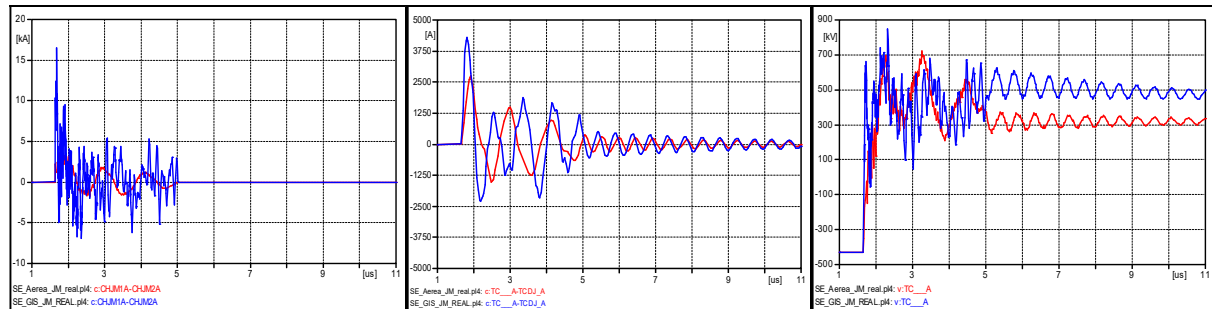
Figura 21 – Comparação entre os modelos de parâmetros

4.4 SIMULAÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA A GÁS (GIS)

Três diferenças fundamentais afetam os resultados das tensões no caso da subestação isolada a gás quando comparada à subestação aérea: os comprimentos dos trechos e barramentos, os parâmetros do trecho isolado em função das menores distâncias de separação fase-neutro, bem como fase-fase (dependendo, inclusive, se as fases estão em dutos diferentes ou estão no mesmo duto) e o comportamento do arco em função da diferença do dielétrico, bem como da velocidade de manobra da chave. Para efeito didático, foi considerada a mesma configuração do circuito da Figura 21, considerando, contudo, comprimentos reduzidos por um fator de 1/3 (3m). A representação dos parâmetros do trecho isolado a SF6 foram os mesmos de uma GIS conhecida de 500kV. Os parâmetros do arco foram mantidos apenas para efeito de comparação, exceto a potência que foi ajustada para 1900kW de modo a reproduzir o mesmo tempo de arco e, com isso, identificar melhor as diferenças entre os dois tipos de subestações.

A Figura 22 apresenta a comparação da corrente de arco na chave e da corrente e da tensão no TC, para as duas subestações, aérea e isolada a gás SF6, ambas modeladas por J.Marti. Como pode ser observado na Figura 22a, a corrente de arco possui, intencionalmente, a mesma duração, mas as reflexões que surgem durante sua

condução produzem uma frequência mais alta devido às distâncias menores dos trechos. Além disso, a alteração da impedância de surto a partir da bucha de saída da parte isolada a gás para a parte aérea da subestação faz com que novas reflexões ocorram a partir deste ponto. A corrente no TC, mostrada na Figura 22b, mostra as frequências durante a condução do arco e, após sua extinção, que se torna semelhante para ambos os tipos de subestações. O mesmo pode ser observado na tensão através do TC mostrado na Figura 22c.



a) Corrente de arco na chave

b) Corrente através do TC

c) Tensão no terminal do TC

Figura 22 – Comparação entre os modelos de subestação aérea e isolada a gás SF6

5.0 - CONCLUSÃO

O objetivo do cálculo das tensões transitórias muito rápidas é permitir que o efeito destas sobretensões no isolamento dos diversos componentes de um equipamento em análise seja melhor considerado. Sejam transformadores de potência ou de instrumentos, estes componentes podem ser a bucha, as primeiras espiras, algumas espiras internas ou os terminais opostos – se as tensões transferidas forem significativas. É claro que a análise da distribuição das tensões ao longo de todos os trechos que compõe cada isolamento somente poderá ser feita pelo fabricante do equipamento ou algum agente especializado, os quais terão acesso aos recursos adequados para a avaliação do efeito dos transitórios no isolamento de cada um de seus componentes e identificar a parte mais frágil.

As simulações buscam representar cada um dos diversos componentes da subestação, da maneira mais detalhada possível, dentro do que as ferramentas de cálculo de transitórios eletromagnéticos atualmente disponibilizam, de modo a obter uma imagem da tensão a que o equipamento está submetido. As medições, por outro lado, buscam capturar a onda da tensão que alcança o equipamento em análise, porém ainda será uma imagem que estará restrita às limitações quanto ao espectro de frequência possível de cada componente do sistema de medição, bem como quanto às interferências que podem se adicionar ao sinal que está sendo monitorado.

Ambos os recursos, simulação e medição, são capazes de apresentar uma forma geral da curva de tensão sem poder garantir a precisão da realidade. Entretanto, a disponibilidade de ambas permite, através da compatibilização dos resultados, determinar a amplitude das componentes principais e a necessidade de aprimoramento de um e outro recurso.

6.0 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) P.M.Miguel, R.C.Scholz, V.Bacil, J.A.Teixeira Jr - MODEL para simulação de abertura de chaves seccionadoras isoladas a ar- IX WORKSPOT, FOZ DO IGUAÇU, PR – Nov. 2018

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



GUILHERME SARCINELLI LUZ, brasileiro, nascido no RJ em 1957, engenheiro eletricista pela UFRJ (1981) - Engenheiro do ONS lotado na EGE/DPL. Áreas de atuação: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos e Sistemas de Corrente Contínua utilizando os programas ATP e PSCAD, bem como acompanhando estudos e testes de cubículos de controle CCAT e TCSC associados ao RTDS. Trabalhou em FURNAS de 1993 a 2017, após trabalhar 11 anos na área de Consultoria na PROMON, THEMAG e Eletroconsult de Paraguay. Trabalha no ONS desde 2017.

ARJAN CARVALHO VINHAES, brasileiro, engenheiro eletricista pela Universidade Federal Fluminense (2005) - Engenheiro do ONS lotado na EGE/DPL. Áreas de atuação: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos utilizando o programa ATP. Trabalha no ONS desde 2008.