

Definição dos tempos de espera para o aterramento de cabos do tipo OF – desenvolvimento de dispositivo de medição, estudos de modelagem e simulação computacional, e ensaios.

Eruchim Waldemar Citron (CTEEP), Gilberto Chacur (CTEEP), Hédio Tatizawa (IEE/USP), Paulo Futoshi Obase (IEE/USP), Nelson M. Matsuo (IEE/USP), Guilherme de A. Garcia (IEE/USP)

Resumo- Esta pesquisa desenvolveu-se considerando-se três atividades principais:

- Atividades de modelagem e simulação computacional de instalações que utilizam cabos do tipo OF, e equipamentos associados, utilizando o programa computacional ATP [1], para a obtenção de subsídios técnicos visando a melhor definição dos tempos de espera para aterramento das instalações. Atualmente o tempo de espera, no pior caso, é de 4 horas, para linhas de transmissão subterrâneas de 345kV [2].

- Desenvolvimento de protótipo do módulo secundário do divisor de tensão capacitivo, utilizado nas medições de tensões residuais em cabos OF, compreendendo a especificação, projeto, implementação, e ensaios de desempenho.

- Estudos de fatores que afetam os tempos de escoamento das cargas residuais de circuitos que utilizam cabos OF, seja por correntes de fuga através de isolações externas de porcelana (ou equivalentes) ou na forma de fator de perdas (ou tangente delta), incluindo ensaios laboratoriais, visando a avaliação do escoamento das cargas residuais nos equipamentos TC, TPC, isolador e Pára-raios, para a quantificação dos níveis típicos de corrente de fuga sob variadas condições de contorno passíveis de serem encontradas em situações reais de campo.

Palavras-chave— cabo de potência, cabo OF, linha de transmissão subterrânea.

I. INTRODUÇÃO

No projeto foram investigados em profundidade as questões que afetam os tempos de espera para o aterramento das instalações que utilizam cabos de potência do tipo OF, permitindo uma substancial redução desses tempos de espera, embasados em modelagens, simulações computacionais e medições. Esses resultados permitirão a redução da indisponibilidade das instalações objetos do estudo.

Adicionalmente, o projeto desenvolveu um protótipo com características inéditas no mercado, que possibilitará a realização das medições de tensão residual de forma mais simplificada e com maior precisão.

II. ATIVIDADES DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL SOBRE AS INSTALAÇÕES

Foram consideradas para estudos de modelagem e simulação computacional utilizando o programa ATP, instalações não avaliadas no projeto anterior [2], constituídas por linhas de transmissão subterrâneas – LTS e por transformadores de potência interligados a cabos tipo OF.

II.1 - TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA INTERLIGADOS A CABOS TIPO OF (CASOS CABO OF DO TR1 DA SUBESTAÇÃO DE BAURU, CABO OF DO TR3 DA SUBESTAÇÃO DE CABREÚVA, CABO OF DO TR15 DA SUBESTAÇÃO DE JUPIÁ)

As simulações efetuadas para os transformadores de potência interligados a cabos tipo OF, (casos Cabo OF do TR1 da Subestação de Bauru, Cabo OF do TR3 da Subestação de Cabreúva, Cabo OF do TR15 da Subestação de Jupiá), mostram que o transformador enseja um rápido decaimento das tensões. Foram realizadas simulações representando a perda (em vazio) do transformador por meio de uma resistência correspondente às perdas em kW de 0,05% da potência do transformador em kVA, e também considerando a perda de 0,5%. Esses valores de perdas em kW são valores típicos comumente utilizados em estudos de simulação computacional envolvendo transformadores de potência, e são próximos dos dados reais. As Figuras 1 e 2 exemplificam resultados do perfil de tensão obtidos nas simulações efetuadas, para os lados primário e secundário do transformador, e são válidos para as três subestações analisadas.

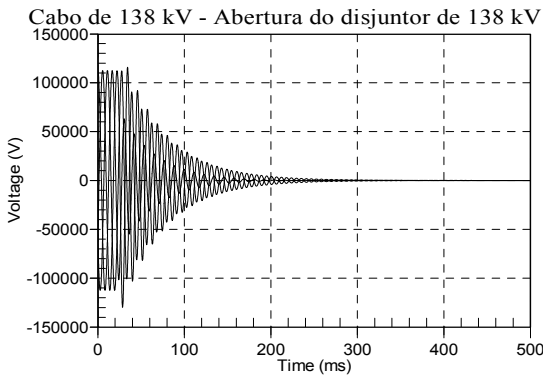


FIGURA 1 - Perfil de tensão. Desconexão do cabo pela abertura do disjuntor de 138 kV; perda em kW igual a 0,05% da potência nominal do transformador kVA.

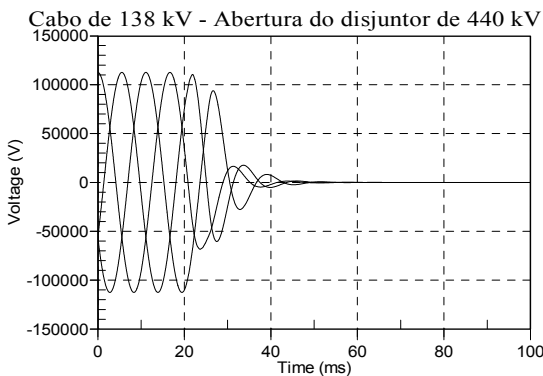


FIGURA 2 - Perfil de tensão. Desconexão do cabo pela abertura do disjuntor de 440 kV; perda em kW igual a 0,05% da potência nominal do transformador kVA.

Embora na realidade a perda possa não ser uma resistência constante (pode variar com a tensão e frequência), essas simulações mostram que as tensões sofrem decaimento num intervalo de tempo bastante curto, inferior a 1s.

II.2- LTS NORTE – MIGUEL REALE

Esta LTS tem comprimento aproximado de 14,5km, em cabo OF, tensão 345kV. No caso de desligamento com o reator inserido, o tempo de decaimento da tensão residual do cabo é bastante curto, de alguns segundos, em razão das perdas no reator durante as oscilações pós-desligamento, quando a energia acumulada é consumida. Para a situação em que o reator não se encontra conectado no momento do desligamento do cabo OF, é esperado um tempo maior de decaimento do perfil de tensão residual.

Algumas simulações que foram realizadas procurando detectar os fatores que mais provavelmente contribuem para o decaimento da tensão residual quando não se tem o reator conectado indicaram que as perdas dielétricas na isolação poderiam constituir-se num desses fatores. Entretanto, não se tem dados precisos para balizar a representação dessas perdas nas simulações, sendo um dado não disponível na literatura. Adotando-se a hipótese de que o decaimento da tensão residual depende apenas das perdas dielétricas na isolação do cabo OF (determinadas a partir de ensaios em

corrente alternada), sendo representadas na simulação através de resistências, os resultados obtidos nas simulações nas condições admitidas são mostrados nas FIGURAS 3 e 4, onde se vêem decaimentos relativamente lentos das tensões residuais, com tempo da ordem de 5 minutos.

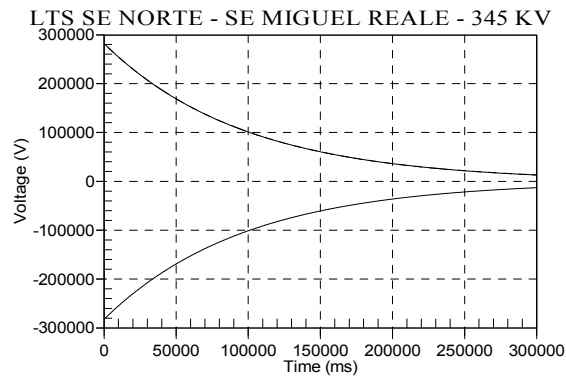


FIGURA 3 - Simulação em ATP – Desligamento da LTS Norte – Miguel Reale; Situação: sem o reator inserido no circuito, considerando perdas dielétricas do cabo - Modelo de simulação do cabo: π

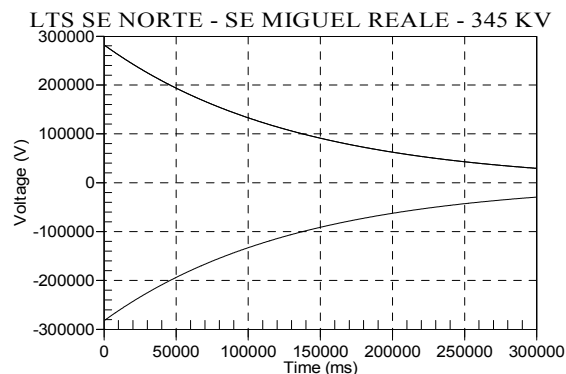


FIGURA 4 - Simulação em ATP – Desligamento da LTS Norte – Miguel Reale; Situação: sem o reator inserido no circuito, considerando perdas dielétricas do cabo - Modelo de simulação do cabo: parâmetros distribuídos

Outra possibilidade examinada foi o escoamento da carga através de pára-raios. A simulação, em que foi considerado o pára-raios do tipo ZnO, indicou que esse dispositivo pode em algum grau contribuir para o escoamento da carga, mas em menor grau do que as perdas dielétricas na isolação do cabo.

Simulações adicionais foram realizadas para uma avaliação, para carga equilibrada, quanto à possibilidade de aparecimento de tensão permanente no cabo desconectado (após escoamento da carga residual), considerando a capacitância de equalização de disjuntor e, também, o acoplamento com o cabo energizado do circuito paralelo instalado ao lado do circuito desconectado. As tensões assim originadas verificadas nessas simulações são bastante baixas.

Houve alguma dificuldade na viabilização dos desligamentos para a realização das medições de tensão residual, mas prevê-se a realização desses ensaios na medida em que esses desligamentos possam ser viabilizados em ocasiões oportunas.

III – CONCEPÇÃO, PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES NO MÓDULO SECUNDÁRIO DO DIVISOR DE POTENCIAL CAPACITIVO (MSDPC).

Nessa pesquisa, foi realizado o desenvolvimento de adaptação do divisor de potencial capacitivo utilizado nas medições. A alternativa atualmente empregada, utilizando volímetros eletrostáticos nas medições, apresentam boa precisão, mas apresentam dificuldades práticas pois esses aparelhos não apresentam saída para registrador. Dessa forma foi realizada nesta pesquisa, a adaptação dos módulos secundários dos divisores de potencial capacitivos, através do desenvolvimento de protótipo para a substituição desses volímetros eletrostáticos. A utilização desse dispositivo nos ensaios deverá facilitar a realização das medições, por possibilitar o registro das medições.

O protótipo foi desenvolvido considerando-se, principalmente, as características:

- Alta impedância de entrada, para que não ocorra descarga do capacitor no regime DC, possibilitando a medição de altas tensões em DC quando acoplado ao módulo primário do Divisor de Potencial Capacitivo.
- Tempo de descarga compatível com os tempos medidos nas instalações estudadas.
- Possibilidade de operação em DC, em AC na frequência da rede (60 Hz) e em frequências harmônicas até ordem 50 (3 kHz). Os testes efetuados no protótipo implementado indicaram boa resposta (módulo e fase), até 10kHz.
- Resistência a fatores presentes no campo, como temperatura alta, umidade, poeira, interferências eletromagnéticas.

As considerações de projeto levaram ao desenvolvimento do protótipo do Módulo Secundário do Divisor de Potencial Capacitivo em dois módulos principais, denominados Módulo Frontal e Módulo Receptor.

O Módulo Frontal está encarregado da medição propriamente dita da tensão secundária do Divisor de Potencial Capacitivo (DPC), e também tem a função de transmissão do sinal de tensão medido, e deve ser instalado junto ao Módulo Primário do DPC, ou seja junto aos capacitores de alta tensão do DPC. A FIGURA 5 mostra exemplo de montagem de campo dos capacitores de alta tensão do Módulo Primário do DPC. A informação medida pelo Módulo Frontal é enviada ao Módulo Receptor.



FIGURA 5– Módulo Primário do Divisor Capacitivo (na LTS Xavantes Bandeirantes 1 – fase branca). Exemplo de montagem.

A FIGURA 6 mostra um exemplo do registro de medição efetuada em laboratório, utilizando-se um dos módulos capacitivos de 500pF/50kV do DPC, acoplado ao MS-DPC. O registro foi realizado através de um osciloscópio digital Tektronics modelo TDS 3012.

O sinal medido consiste na curva de descarga do módulo capacitivo sobre um divisor resistivo (ponta de prova de alta tensão), resultando num tempo de decaimento da tensão residual da ordem de 2,5 segundos.

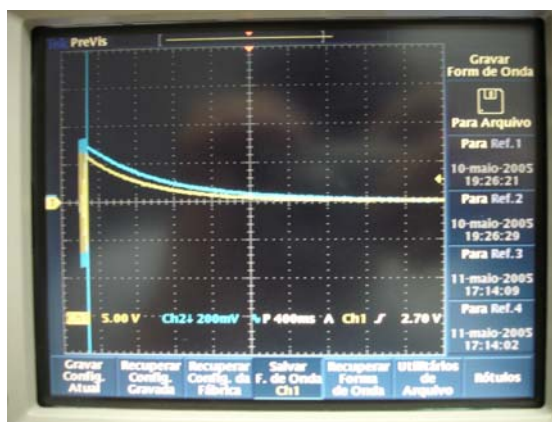
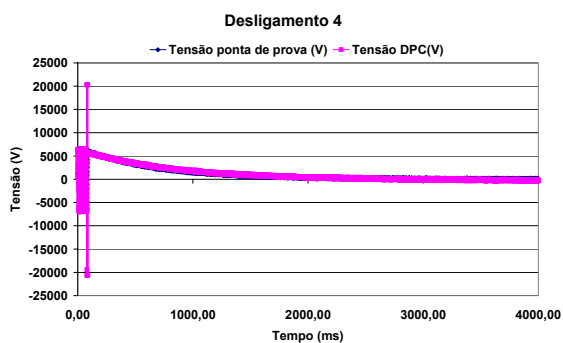


FIGURA 6 – Curva de descarga do módulo capacitivo, 500pF/50kV, sobre um divisor resistivo, resultando num tempo de descarga da ordem de 2,5 segundos, medidos com o MS-DPC (curva superior) e com o divisor resistivo.

A FIGURA 7 mostra a mesma curva, obtida através dos pontos de medição digitalizados e tratados através do aplica-

tivo EXCEL, considerando a relação do divisor resistivo e do MS-DPC.



A FIGURA 8 mostra a montagem utilizada em laboratório nas calibrações do MSDPC, para a medição de sinais de impulso de manobra.

FIGURA 7 – Curva de descarga do módulo capacitivo, 500pF/50kV, sobre um divisor resistivo, resultando num tempo de descarga da ordem de 2,5 segundos, medidos com o MS-DPC e com o divisor resistivo. Tratamento dos pontos digitalizados utilizando o aplicativo EXCEL



FIGURA 8 – Montagem utilizada nas calibrações, mostrando o MS-DPC suspenso ao módulo primário do Divisor Capacitivo, o gerador de impulsos, e o divisor de tensão Referência.

A Figura 9 mostra o resultado de medição de sinal transitório, efetuada com o protótipo, onde também estão representados os resultados de simulação computacional para obtenção da resposta do protótipo, utilizando o programa PSpice/Capture [4]. Com isso é possível comparar os resultados do ensaio entre o protótipo (DPC) e a simulação. Adicionalmente, estão representados nessa figura os resultados

de medição realizada simultaneamente com um Divisor de Tensão (resistivo) calibrado, normalmente utilizado como Divisor de Tensão de Referência nos ensaios de impulso do IEEUSP. Observa-se boa concordância entre esses três resultados.

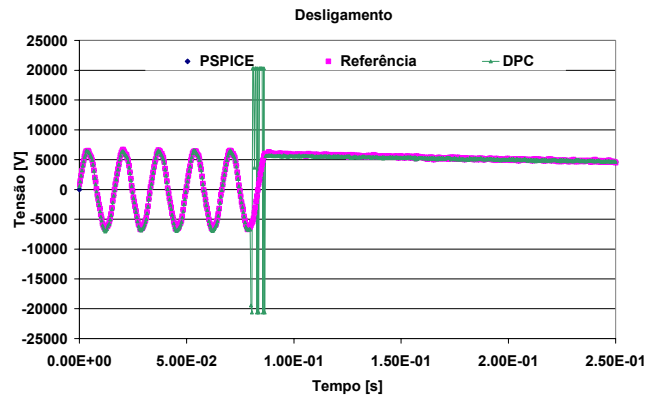


FIGURA 9 - Comparação entre os resultados de medições (MS-DPC e Divisor Referência) e simulação computacional utilizando o programa PSpice/Capture.

IV - ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA EM PÁRA-RAIOS SiC, TC E TPC.

Conforme descrito em [2], obtiveram-se para os tempos de escoamento das cargas ou tensões residuais em instalações que utilizam cabos do tipo OF, valores reduzidos comparados às expectativas anteriores às medições de campo. As análises contidas em [2] indicam que esses tempos obtidos poderiam ser justificados por correntes de fuga. Os ensaios exploratórios de medição de corrente de fuga têm por finalidade adquirir sensibilidade quanto aos valores que essas correntes de fuga podem alcançar, e em quais situações, e estimativas das contribuições individuais dos equipamentos. Considera-se que a soma das contribuições individuais de correntes de fuga promoverão o escoamento das tensões residuais.

Com base nos estudos e resultados das medições efetuadas em laboratório, com a finalidade de fazer estimativas das correntes de fugas, foram obtidos os resultados sumarizados na Tabela 1, para os e-

quipamentos Isolador de porcelana, Pára-raios de SiC (PR), Transformador de Corrente (TC), Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), e estimativa para o Cabo OF.

Consideraram-se nessa tabela as medições realizadas em tensões mais próximas da tensão de operação dos equipamentos sob tensão AC e DC, a seco e com equipamentos molhados considerando-se resistividade ρ da água com valores de aproximadamente $104 \Omega\text{m}$ e $50 \Omega\text{m}$.

Adicionalmente, incluíram-se as estimativas de corrente de fuga considerando-se os valores de tangente delta obtidas, as estimativas através das medições de potência instantânea [5] e as medições com aparelhos de medição de corrente de fuga dedicados.

TABELA 1
ESTIMATIVAS DAS CORRENTES DE FUGA RESISTIVA (EM NEGRITO) E CORRENTE DE FUGA TOTAL PARA OS EQUIPAMENTOS, BASEADAS EM
MEDIÇÕES LABORATORIAIS E EM MODELOS TEÓRICOS.

Corrente de fuga versus método de medição.						
	A seco (μA)	Molhado $\rho=104\Omega\text{m}$ (μA)	Molhado $\rho=50\Omega\text{m}$ (μA)	Tg Delta (μA)	Potência inst. (μA)	Excount (μA)
Isolador (DC)	0,8	2				
PR SiC (DC)	27,9	61,3	2271,1			
PR SiC (AC)	$1,9 \cdot 10^3$	1231,6	1684,2	80	88,6	33
TC (DC)	1,6	2				
TC (AC)	18,26			0,001		279,69
TPC (AC)				0,56		
Cabo OF (AC)				0,56 $\cdot 10^6$		

Nota: os valores **em negrito** indicam estimativas da corrente de fuga resistiva. Considera-se que a corrente de fuga que efetivamente promove a descarga do cabo OF, é aquela responsável pelas perdas elétricas, ou seja, a parcela da corrente elétrica em fase com a tensão, e que também é a responsável pela potência ativa dissipada. Pode ser também denominada corrente de condução (em contraposição a corrente de deslocamento, associada à potência reativa [3]). Denominaremos nesse texto essa parcela da corrente elétrica de corrente resistiva.

Considerando-se ensaio de campo realizado - medição da tensão residual durante o desligamento da LTS Xavantes-Bandeirantes, obtiveram-se tempos de escoamento da ordem de 5 minutos [2].

Observou-se nesses ensaios a persistência de tensão de algumas centenas de volts durante aproximadamente 5 minutos adicionais, que considerou-se como oriundo de indução dos circuitos vizinhos que permaneceram energizados, não se constituindo portanto de impeditivo para a realização da operação de aterramento.

Esse tempo de escoamento, adotando-se para fins de simplificação um escoamento linear da carga elétrica armazenada no cabo OF, implica em uma corrente elétrica de 3 mA aproximadamente [2].

Considerando-se numa instalação a presença de aproximadamente 20 estruturas conectadas em cada extremidade do cabo OF durante a situação de desligamento (isoladores, TPC, TC e pára-raios), se desconsiderarmos as perdas do cabo OF, deveremos ter uma corrente de fuga média em cada estrutura de aproximadamente $75\mu\text{A}$.

Considera-se que a corrente de fuga que efetivamente promove a descarga do cabo OF, é aquela responsável pelas perdas elétricas, ou seja, a parcela da corrente elétrica em

fase com a tensão, e que também é a responsável pela potência ativa dissipada. Pode ser também denominada corrente de condução (em contraposição a corrente de deslocamento, associada à potência reativa [3]). Denominaremos nesse texto essa parcela da corrente elétrica de corrente resistiva.

Com base nos dados da Tabela 1, considerando-se os valores de corrente de fuga resistiva estimados e apresentados em negrito nessa Tabela, esse nível de corrente de fuga não é atingido por nenhum dos equipamentos considerados, nem mesmo pelo pára-raios de SiC que é o equipamento onde verificaram-se os maiores valores de corrente de fuga resistiva.

Nessa análise, deve ser considerado o resultado da medição de campo realizada, que confirma a existência real dessa corrente de fuga da ordem de 3 mA em média. Isso sugere a inclusão na análise de possíveis outros componentes que seriam causadores dessa corrente de fuga. De acordo com as informações disponíveis e por inspeção do circuito elétrico associado, o único componente adicional presente é o próprio cabo OF. Na última linha da Tabela 1, a estimativa da corrente de fuga resistiva (em corrente alternada) do cabo OF, considerando o comprimento total de 8,5 km aproximadamente, é da ordem de $0,56 \cdot 10^6 \mu\text{A}$, calculada em função do valor da tangente delta que é de 0,003 para o fluido dielétrico (dodecilbenzeno) utilizado no cabo OF.

Considera-se que a adoção do valor da tangente delta igual a 0,003 (válido para o óleo isolante) na estimativa das perdas dielétricas do cabo OF, que apresenta um sistema isolante baseado principalmente em óleo-papel[2], representa uma estimativa conservadora, ou seja, atua-se na lado da segurança, considerando que o valor real para o cabo OF deve ser igual ou maior que 0,003.

Para os equipamentos ensaiados, foi estimada a corrente de fuga resistiva (I_r), determinada através de ensaios em corrente contínua e através de estimativas baseadas no valor de tangente delta. Determinou-se a relação I_r/I_t , entre a corrente de fuga resistiva e a corrente de fuga total em AC (I_t).

Tomando-se como referência os resultados das medições de corrente de fuga efetuadas, verificou-se que a razão (I_r/I_t) entre as correntes de fuga resistiva em DC e corrente de fuga total para os equipamentos avaliados apresentou valores entre décimos de pontos percentuais a alguns pontos percentuais. Adicionalmente, devemos considerar que a isolamento do cabo OF é constituída principalmente de papel-óleo, o que guarda similaridade com a isolamento do TC e TPC. Dessa forma parece razoável supor que a parcela resistiva da corrente de fuga em DC, para o cabo OF, também deve situar-se nessa ordem de grandeza, ou seja “entre décimos de pontos percentuais a alguns pontos percentuais” da corrente de fuga resistiva em corrente alternada.

Nessa linha, seria razoável supor que a corrente de fuga resistiva em DC para o Cabo OF situar-se-ia na ordem de 1% ou menos da corrente resistiva em AC.

Considerando-se um valor da ordem de 1/150 da corrente resistiva em AC, tomando-se o valor de 0,56 A estimado apresentado na Tabela I, resultaria numa corrente resistiva em DC da ordem de 3,7 mA.

Esse valor de corrente é compatível com as medições de campo realizadas até o momento, onde estimou-se um valor médio de 3 mA [2].

IV.1 – ESTIMATIVA CONSIDERANDO O MODELAMENTO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZANDO O PROGRAMA ATP.

Nessa estimativa considera-se o modelamento apresentado na seção II.2. Nessa simulação o caso apresentado refere-se à LTS Norte-Miguel Reale. Devem ser consideradas resistências equivalentes de perdas de valor muito maior do que se espera no caso em corrente alternada, uma vez que as perdas dielétricas estão associadas tão somente a correntes de fuga através das isolações. Para efeito de simulação, foi adotado, para a resistência equivalente de perdas em corrente contínua, um valor igual a aproximadamente 150 vezes o valor estimado para a corrente alternada, ou seja, $R_{cc} = 36,7 \text{ M}\Omega$, para o comprimento total de 14500 m ou 550 $\text{M}\Omega$ para cada uma das 15 seções, em que foi subdivi-

dido o comprimento total do cabo no modelamento utilizado. O valor da resistência equivalente total foi estimado com base no valor da tangente delta do óleo isolante de 0,003 [2].

Nesta situação simulada, o decaimento da tensão residual depende apenas das perdas dielétricas na isolamento do cabo OF.

Os resultados obtidos nas simulações indicam decaimentos relativamente lentos das tensões, com tempo da ordem de 5 minutos ou um pouco mais.

V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No projeto foram investigadas em profundidade as questões que afetam os tempos de espera para o aterramento das instalações que utilizam cabos de potência do tipo OF, permitindo uma substancial redução desses tempos de espera, embasados em modelagens, simulações computacionais e medições. Esses resultados permitirão a redução da indisponibilidade das instalações que foram objeto do estudo.

Quanto às conclusões finais, estas podem ser associadas a três situações distintas:

1 - Instalações com a utilização de comprimentos curtos de cabos OF (centenas de metros), em que na situação de desligamento equipamentos associados permanecem conectados ao cabo OF. Esses equipamentos seriam, por exemplo, transformador de potência, transformador terra, banco de transformador, reator, banco de capacitor, e inclusive linha aérea.

Nessa situação claramente se identificam os principais mecanismos para o escoamento das cargas residuais, a saber: através das perdas no ferro no caso dos transformadores e do reator (tempo de escoamento da ordem de milissegundos), através da resistência de descarga dos capacitores no caso dos bancos de capacitor (tempo de escoamento em torno de 3 minutos), e através das perdas da linha no caso de conexão com linhas aéreas (tempo de escoamento da ordem de segundos). O tempo de espera atualmente praticado é de 30 minutos nesses casos.

2 - Linhas de transmissão subterrâneas que utilizam cabos OF, desligamento com reator conectado. Nessa situação ocorre a dissipação das cargas residuais através das perdas no ferro do reator, resultando num tempo de escoamento da ordem de segundos. O tempo de espera atualmente praticado é de 30 minutos nesses casos.

3 - Linhas de transmissão subterrâneas que utilizam cabos OF, com comprimento da ordem de quilômetros, desligamento com equipamentos conectados de natureza predominantemente capacitiva (isoladores, pára-raios, transformador de corrente, transformador de potencial capacitivo). O tempo de espera atualmente praticado é de 4 horas para LTS de 345kV, e de 2 horas para LTS de 230kV.

Essa situação envolve uma análise mais detalhada, pois aparentemente não são perceptíveis mecanismos de escoamento das cargas residuais do cabo OF, porém ensaio em campo realizado mostrou um tempo de escoamento da ordem de 6 minutos, para linha longa com 8,5km de comprimento, tensão de 345kV.

Os ensaios, modelagens e simulações computacionais, e análises das informações levantadas até o momento indicaram um tempo de espera máximo da ordem de 6 minutos. Devido a dificuldade na viabilização do agendamento de desligamentos para a realização das medições de tensão residual, por motivos ligados à disponibilidade do Sistema, para a certificação do efetivo tempo de escoamento das tensões residuais, prevê-se a realização desses ensaios na medida em que esses desligamentos possam ser viabilizados em ocasiões oportunas. Essas medições deverão ser realizadas com a utilização do protótipo desenvolvido no projeto, de forma mais precisa e utilizando um procedimento mais simples do que aquele atualmente praticado com a utilização de voltímetros eletrostáticos.

VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ATP – Alternative transients program – Rule Book, Bonneville Power Administration, 1987.
- [2] Tatizawa H., Obase, P. F.; Matsuo, N. M.. Desenvolvimento de modelo para avaliação de carga residual de cabos de linhas de transmissão subterrâneas - Determinação dos tempos de espera- Relatório Final. 2003. São Paulo. 145 p. (COFCR 001 / NT005 / OR - IEEUSP/CTEEP)
- [3] Bartnikas R, McMahon EJ, Engineering Dielectrics, vol II-B, ASTM STP 669, 1987.
- [4] PSpice Capture, Orcad Inc.
- [5] Coffen L.T., McBride J.E., High voltage AC resistive current measurements using a computer based digital watts technique. IEEE T-PWRD, vol 6, n°2, 1991.