



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

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

GRUPO -GLT

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO- GLT

**INTERLIGAÇÃO SUBTERRÂNEA 230kV PAL9-PAL4
DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

**Márcio Coelho(*) Fumitaka Nishimura Liliâne Dias Cicarelli
PROCABLE ENERGIA E TELECOMUNICAÇÕES SA**

RESUMO

Com o objetivo de criar o anel em 230kV na cidade de Porto Alegre no Rio Grande do Sul com a finalidade de melhorar a confiabilidade do sistema elétrico e atender a uma demanda de expansão prevista nos estudos de planejamento futuro do sistema elétrico interligado sul/sudeste a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) licitou em 2009 a construção de uma linha de transmissão subterrânea isolada para operar a 230kV interligando as subestações Porto Alegre 9 (Pal9) e Porto Alegre 4 (Pal4) na cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Esse trabalho visa expor os estudos realizados para determinação dos parâmetros da linha de transmissão subterrânea mostrando os principais resultados encontrados, apresentar os estudos de transitórios e interferências eletromagnéticas e coordenação de isolamento apresentando o resultado dos estudos e também visa disseminar a solução adotada para posicionamento dos cabos e adequação inédita no Brasil do sistema “cross-bonding” a quatro cabos.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão subterrânea, cabos de alta tensão, sistemas de aterramentos especiais.

1.0 - INTRODUÇÃO

A linha de transmissão subterrânea 230kV PAL9 – PAL4, está sendo construída pela TPAE – Transmissora Porto Alegrense de Energia que é composta societariamente pela Procable Energia e Telecomunicações SA (80%) e CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica (20%), possui cerca de 12km de extensão, utiliza cabos de energia isolados a seco (XLPE) para 230kV, com condutor de alumínio, seção transversal 1400mm² e diâmetro nominal 136mm, este cabo é equipado com fibras ópticas para realizar a comunicação e proteção entre as duas subestações e possuirá um sistema DTS (Distributed Temperature Sensor) para verificação da ampacidade em tempo real.

2.0 - REQUISITOS BÁSICOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO PAL9 – PAL4

A tabela 1 mostra os requisitos básicos da Linha de Transmissão Subterrânea 230kV PAL9 – PAL4:

(*) Av. Casa Grande, n° 1960 – CEP 09.961-350 Diadema, SP – Brasil
Tel: (+55 11) 4061-9105 – Fax: (+55 11) 4061-9111 – Email: marcio@procable.com.br

Tabela 1 – Requisitos Básicos da LT 230kV PAL 9 – PAL 4

ITEM	CARACTERÍSTICA	UNIDADE	REQUISITO
01	Tensão Nominal	kV	230
02	Tensão Máxima Operativa	kV	242
03	Nível Básico de Isolamento	kVp	1050
04	Corrente Nominal	A / MVA	910 / 362
05	Fator de Carga	-	0,8
06	Corrente de Curta Duração	A / MVA	1100 / 438
07	Corrente de Curto-Circuito Nominal	kA	40 – (0,3s – 20 ciclos)
08	Corrente de Crista da Corrente Suportável Nominal	kA	104,0 Fator de assimetria (2,6)
09	Tempo Máximo de Interrupção dos Disjuntores	Ciclos	3 (0,05s)
10	Tempo Total de Eliminação das Falhas pela Proteção Unitária ou Irrestrita	ms	150 (15 ciclos)
11	Tempo Total de Eliminação de Falhas para LT de Interligação de Sistemas	ms	100 (6 ciclos)
12	Secção Transversal do Condutor de Alumínio	mm ²	1400
13	Número de Cabos	-	4 (1 cabo reserva)

Observações:

O curto-circuito trifásico ocorrendo do lado da SE PAL4, a contribuição vinda da SE PAL9, através do cabo subterrâneo, é igual a 13,72kA.

O curto-circuito trifásico do lado da SE PAL9, a contribuição vinda da SE PAL4, através do cabo subterrâneo, é igual a 9,16kA.

3.0 - DADOS DA INSTALAÇÃO

Com o objetivo de reduzir as correntes circulantes na capa metálica dos cabos e favorecer a capacidade de condução de corrente do cabo adotou-se a solução abaixo para o perfil da vala da linha de transmissão PAL9 – PAL4. A figura 1(a) mostra o perfil da vala onde não há compartilhamento com a futura LT 69kV PAL9 – PAL4. A figura 1(b) mostra o perfil da vala onde haverá compartilhamento e interferência do circuito de 69kV adjacente:

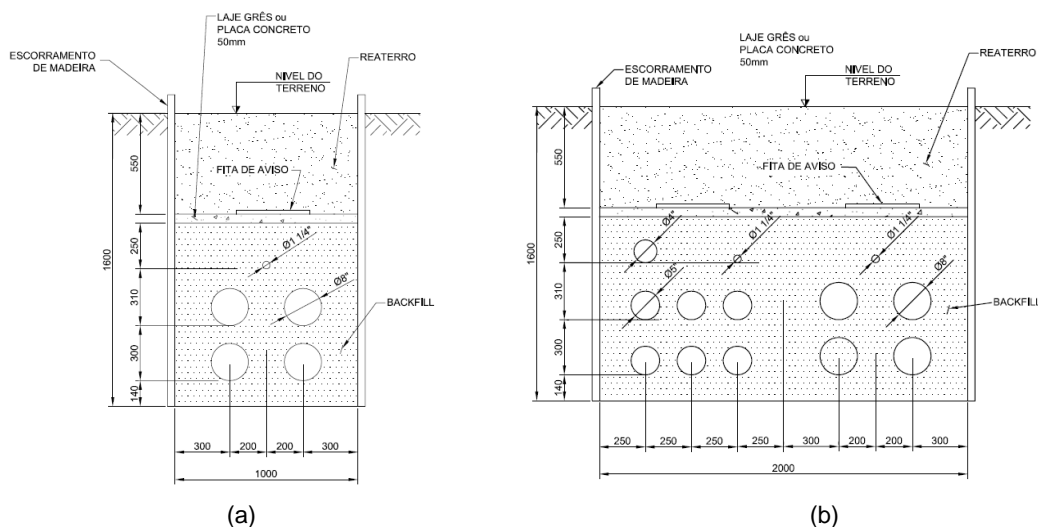
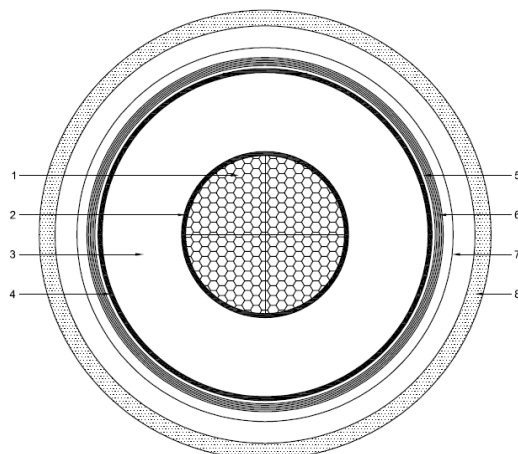


Figura 1 – Perfil da vala da LT 230kV Pal9 – Pal4 onde (a) **não há** compartilhamento com a futura LT 69kV Pal9 – Pal7 (b) **há** compartilhamento com a futura LT 69kV Pal9 – Pal7

4.0 - DADOS DO CABO E ACESSÓRIOS

4.1 Cabo Isolado em XLPE para 230kV, Condutor de Alumínio 1400mm², blindado com capa de Al corrugado

A ANEEL definiu em seus estudos que o cabo a ser instalado deveria ser com condutor de alumínio na bitola de 1400mm². A Procable que foi contratada pela TPAE como responsável técnica do empreendimento, com base nos estudos da ANEEL e em sua expertise em obras de linha de transmissão subterrânea optou por utilizar um cabo com capa de alumínio corrugado que apresenta uma capacidade de condução da corrente de curto-circuito mais elevada se comparada à solução com blindagem a fios de cobre, dessa forma, optou-se pela utilização do cabo isolado em XLPE conforme apresentado na figura 2 abaixo:



ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL	ESPESSURA (mm)	Φ EXTERNO (mm)
01	Condutor	Alumínio H-19	-	46,4
02	Semi-condutora interna	semicondutor	1,5	50,3
03	Isolação	XLPE	23,0	96,3
04	Semi-condutora externa	semicondutor	1,3	98,9
05	Prova d'água	Fitas semicondutoras	0,5 x 4	104,9
06	Acolchoamento	Semicondutora e fita de tecido com fios de cobre	1,0	106,2
07	Blindagem Metálica	Al Corrugado	2,7	125,1
08	Capa externa	MDPE	4,5	134,3
Cabo completo		Diâmetro total: Aprox. 136mm Peso: Aprox. 16,36kg/m Teste em tensão AC: 318 kV/30min		

Figura 2 – Seção Transversal do Cabo XLPE 230kV – Alumínio 1 x 1400mm²

4.2 Emendas Retas Seccionadas e Terminais Externos

Por uma questão de flexibilidade na instalação optou-se pela utilização de emendas retas com a blindagem seccionada. As emendas retas com seccionalização da blindagem permitem a instalação do sistema de aterramento em “cross-bonding”.

Os terminais externos dos cabos serão isolados a óleo com a envoltória externa de porcelana e serão montados na posição vertical sobre torres devidamente dimensionadas para esse fim.

4.3 Link - Boxes

Devido à existência do cabo reserva solicitado pela ANEEL, os link-boxes apresentam uma diferença crucial em relação ao sistema trifásico a 3 cabos devido à necessidade de manter-se a capacidade de condução de corrente do sistema, mesmo no caso de utilização da fase reserva. Conforme explicado adiante, os link-boxes necessitam apresentar entrada para os quatro cabos, assim foram definidos os link boxes para aterramento direto, os link boxes com SVL (sheath voltage limiters) e os link boxes para cross-bonding. Apresentamos na figura 4 o desenho do link box para cross-bonding.

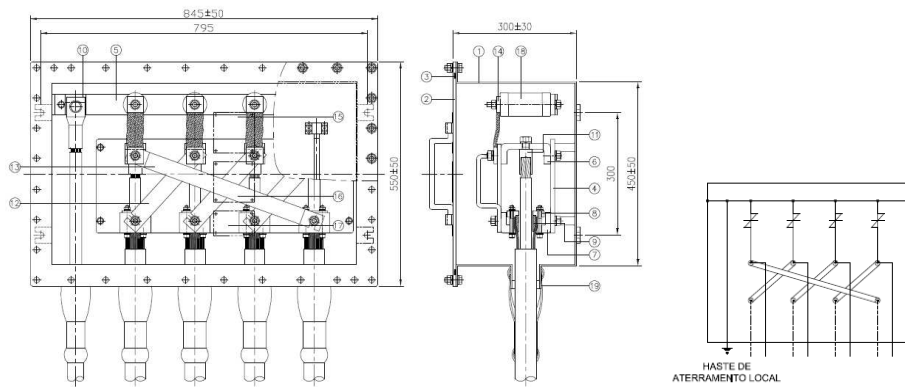


Figura 4 – Link box para cross-bonding

5.0 - ESTUDO DA CORRENTE CIRCULANTE NA BLINDAGEM DOS CABOS

O diagrama apresentado na figura 5 ilustra a instalação do sistema cross-bonding a 4 cabos.

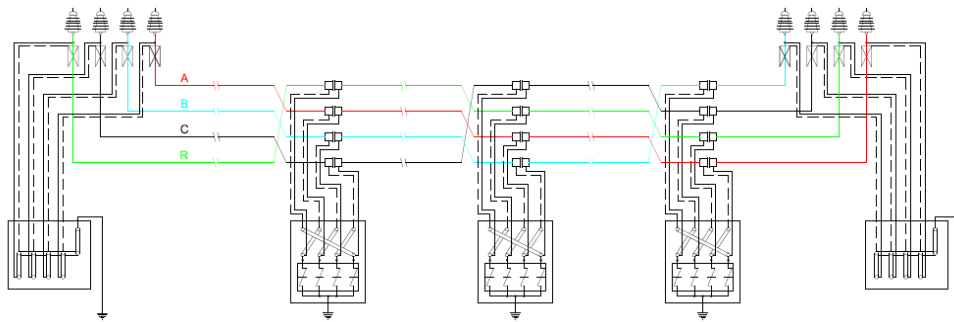


Figura 5 – Sistema cross-bonding com 4(quatro) cabos

O diagrama apresentado na figura 6 é a representação esquemática do funcionamento do sistema cross-bonding a quatro cabos.

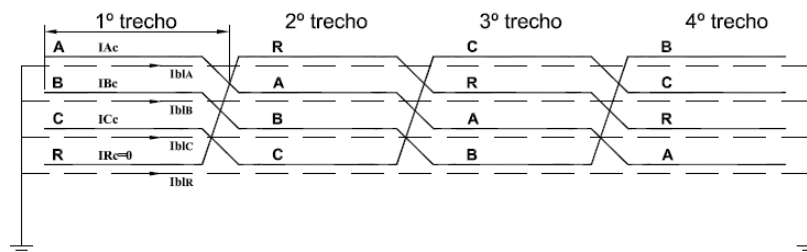


Figura 6 – Diagrama de funcionamento do sistema cross-bonding com 4(quatro) cabos

$$I_{AC} = I \angle 0 \quad I_{BC} = I \angle -120 \quad I_{AC} = I \angle 120$$

A configuração dos cabos está mostrada na figura 7.

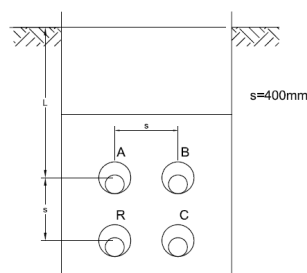


Figura 7 – Desenho esquemático da vala para cálculo das correntes induzidas na blindagem

A tensão induzida na capa metálica da fase A será:

$$e = -j\omega\varphi$$

Para o 1º trecho:

$$\varphi_{A(1^{\circ}\text{trecho})} = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_A \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} + I_B \cdot \ln \frac{1}{s} + I_C \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} + I_R \cdot \ln \frac{1}{s} \right]$$

$$I_A = I_{AC} + I_{bIA} \quad I_B = I_{BC} + I_{bIB} \quad I_C = I_{CC} + I_{bIC}$$

Para o 2º trecho:

$$\varphi_{A(2^{\circ}\text{trecho})} = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_A \cdot \ln \frac{1}{s} + I_B \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} + I_C \cdot \ln \frac{1}{s} + I_R \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} \right]$$

Para o 3º trecho:

$$\varphi_{A(3^{\circ}\text{trecho})} = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_A \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} + I_B \cdot \ln \frac{1}{s} + I_C \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} + I_R \cdot \ln \frac{1}{s} \right]$$

Para o 4º trecho:

$$\varphi_{A(4^{\circ}\text{trecho})} = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_A \cdot \ln \frac{1}{s} + I_B \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} + I_C \cdot \ln \frac{1}{s} + I_R \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} \right]$$

Onde R_{mbl} é o raio médio da capa metálica.

Somando o fluxo concatenado com a capa metálica para os 4 trechos teremos:

$$\begin{aligned} \varphi_{Total} &= \varphi_{A(1^{\circ}\text{trecho})} + \varphi_{A(2^{\circ}\text{trecho})} + \varphi_{A(3^{\circ}\text{trecho})} + \varphi_{A(4^{\circ}\text{trecho})} = \\ &= \frac{\mu}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} &\left[I_A \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} + I_R \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} + I_C \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} + I_B \cdot \ln \frac{1}{R_{mbl}} \right] \\ &+ \left[I_C \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} + I_B \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} + I_A \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} + I_R \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{2}s} \right] \\ &+ \left[I_B \cdot \ln \frac{1}{s} + I_R \cdot \ln \frac{1}{s} + I_A \cdot \ln \frac{1}{s} + I_C \cdot \ln \frac{1}{s} + I_B \cdot \ln \frac{1}{s} + I_R \cdot \ln \frac{1}{s} + I_A \cdot \ln \frac{1}{s} + I_C \cdot \ln \frac{1}{s} \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

sendo:

$$I_{AC} + I_{BC} + I_{CC} = 0$$

$$I_{bIA} + I_{bIB} + I_{bIC} = 0$$

$$\text{Temos : } \varphi_{TOTAL} = 0$$

E, portanto, a tensão induzida $e = 0$

Dessa forma, as correntes na capa metálica das fases A, B e C são nulas.

6.0 - ESTUDO DA CAPACIDADE DE CORRENTE DO SISTEMA

A capacidade de corrente da LT Subterrânea 230kV Pal9 – Pal4 foi efetuada para as seguintes condições:

- Regime permanente com fator de carga 100%
- Regime permanente com fator de carga 80%
- Sobrecarga com duração de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas, com fator de carga 100%
- Ampacidade do condutor sob regime de curto-circuito com duração de 0,3s (Método adiabático)
- Ampacidade da capa metálica sob condições de curto-circuito, com duração de 0,3s (Método não adiabático)

Os cálculos de capacidade de corrente em regime permanente e em regime de sobrecarga foram efetuados através do software “Cálculo da Capacidade de Corrente para Cabos com Qualquer Fator de Carga”, dissertação de mestrado apresentada pela Eng. Liliane Dias Cicarelli à Escola Politécnica da USP para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e tomando-se como referência as normas IEC 60287 (Electric Cables – Calculation of the current Rating) e a IEC 60853 (Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables).

A determinação da capacidade de corrente em curto-circuito foi efetuada utilizando-se os critérios adiabático e não adiabático definidos na IEC 60949 (Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects).

Os resultados encontrados são apresentados na tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Capacidade de corrente LT 230kV PAL 9 – PAL 4

Item	Condição	Temperatura (°C)		Ampacidade (A)
		Inicial/Ambiente	Final	
1	Regime Permanente com fator de carga 100%	25	85	978,8
2	Regime Permanente com fator de carga 80%	25	85	1.017,6
3	Sobrecarga com duração de 1 hora, com fator de carga 100%	85	105	1.893,2
4	Sobrecarga com duração de 2 hora, com fator de carga 100%	85	105	1.597,0
5	Sobrecarga com duração de 3 hora, com fator de carga 100%	85	105	1.500,5
6	Sobrecarga com duração de 4 hora, com fator de carga 100%	85	105	1.457,0
7	Ampacidade do condutor sob condições de curto-circuito, com duração de 0,3s (método adiabático)	85	250	246.154,8
8	Ampacidade da capa metálica sob condições de curto-circuito, com duração de 0,3s (método não-adiabático)	75	180	41.997,1

7.0 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Os parâmetros elétricos kilométricos da LT 230kV Pal9 – Pal4: as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, foram calculadas utilizando-se o programa “Cálculo de Parâmetro Elétricos” tese de mestrado apresentada ao Instituto politécnico da USP pelo Eng. Fumitaka Nishimura. A disposição dos cabos considerada foi aquela apresentada no item3 acima. Foram analisados dois casos:

1º caso) 2 circuitos 69kV e 1 circuito 230kV

2º caso) 1 circuito 230kV

Tabela 3 – Valores das impedâncias e capacitâncias de componentes simétricas da LT 230kV

Item	Descrição	Unidade	Valor
1	1º caso: 2 circuitos 69kV e 1 circuito 230kV		
	Z1 = Z2 a 90°C	Ω/km	0,03128 + j0,23376
	Z0 a 90°C	Ω/km	0,07301 + j0,08116
2	2º caso: 1 circuito 230kV		
	Z1 = Z2 a 90°C	Ω/km	0,03121 + j0,23376
	Z0 a 90°C	Ω/km	0,07307 + j0,07935
3	C0 = C1 = C2	μF/km	0,21123

Onde:

Z1, Z2, Z0 – Impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

C1, C2, C0 – Capacitâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

8.0 - ESTUDOS DE COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO

Os estudos de coordenação do isolamento foram elaborados utilizando o software ATP. Verificou-se que as solicitações de sobretensões decorrentes do surto atmosférico não são superiores a 600kV.

O cabo apresenta uma impedância de surto baixa, o que por si só já reduz a sobretensão resultante de um surto atmosférico; por outro lado, o surto atmosférico chega ao cabo após atingir a blindagem de uma linha aérea, produzir uma descarga inversa sobre os condutores fase, propagar-se até a subestação, onde o pára-raios desta linha absorve uma parte importante da energia deste surto, em seguida a sobretensão restante propaga-se até o cabo, nas diversas topologias consideradas.

Desta forma, o pára-raios associado ao cabo é muito pouco solicitado, principalmente quando comparado aos pára-raios das entradas das linhas aéreas; a maior corrente sobre o pára-raios associado ao cabo foi de 5,43 A, enquanto o pára-raios da entrada da linha aérea absorveu 7140 A na subestação de Porto Alegre 4 e 6188 A, na subestação de Porto Alegre 9.

A maior sobretensão por surto atmosférico aplicada ao cabo foi de 322 kV, que representa uma margem de

segurança de 57,1%, em relação ao BIL de 750 kV. Para os equipamentos associados ao cabo, TC, TP, chave e disjuntor a maior sobretensão foi de 382 kV, com uma margem de 49,1% em relação ao BIL de 750 kV.

9.0 - ESTUDOS DE MANOBRAS NA LT 230KV

Os estudos de manobras na LT 230kV Pal9 – Pal 4 que foram realizados são:

- Rejeição de carga
- Abertura capacitiva (cabo em vazio)
- Energização do cabo
- Análise da tensão de restabelecimento transitória por eliminação de curto-circuito e abertura em oposição de fases
- Avaliação da sobretensão de 60Hz aplicada aos cabos de 69kV PAL9 – PAL7 e de 230kV PAL9 – PAL4 devido a desbalanço no cabo de 230kV

Para as simulações de rejeição de carga, energização e abertura de curto-circuito o cabo foi representado pelos modos de sequência positiva e zero; para avaliação da sobretensão de 60Hz aplicada aos cabos de 69kV e de 230kV devido ao desbalanço no cabo de 230kV o cabo foi representado por suas matrizes de indutâncias e capacitâncias.

9.1 Análise do estudo de rejeição de carga

Os valores de sobretensão por rejeição de carga, seja esta iniciada por falta monofásica ou acidentalmente (sem falta), são baixos, tanto os valores máximos como aqueles sustentados, não oferecendo riscos aos equipamentos em geral.

9.2 Abertura capacitiva

Os resultados das TRT's (Tensões de Restabelecimento Transitórias) por abertura capacitiva estão resumidos na curva da figura 8 abaixo, junto com o ensaio corresponde da ABNT, onde se observa que apenas um ponto ultrapassa a suportabilidade normalizada, no ponto definido por 150kv / 1,3 ms.

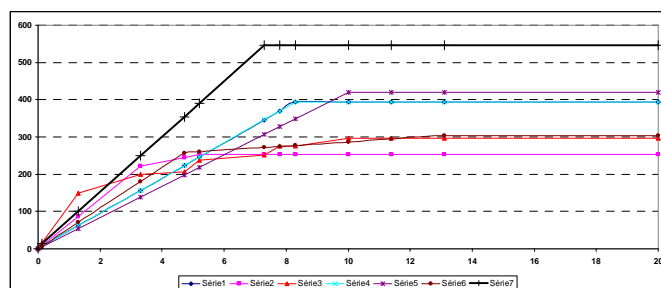


Figura 8 - Envolventórias das TRTs calculadas contraposta à suportabilidade normalizada, série 7 na cor preta

A simulação da reignição em 1,3 ms após a abertura mostra sobretensões e corrente compatíveis com uma energização e que não chegam a disparar o pára-raios. Na sequência, o disjuntor abre sem problemas.

Quanto ao valor da corrente capacitiva manobrada a norma prevê 250 A rms, enquanto que o maior valor obtido foi de 140 A rms.

9.3 Energização do cabo

A sobretensão decorrente da energização do cabo por qualquer das duas subestações é baixa, com energia dissipada no para-raios praticamente igual a zero. O maior pico de corrente durante a energização foi de 2,86 kA, abaixo da faixa de valores estimada pela ABNT, entre 5 e 10 kA.

9.4 Análise da TRT por eliminação de curto-circuito e abertura em oposição de fases

A análise simplificada da abertura dos disjuntores de Pal4 e Pal9, mostra que, durante o desbalanço da falta e abertura, as tensões na frequência fundamental são moderadas e não causariam problemas aos equipamentos próximos. A análise detalhada dos piores casos de abertura de curto-circuito, selecionados a partir da análise simplificada, e em oposição de fases mostra que os disjuntores de Pal4 e Pal9 enquadram-se perfeitamente na

suportabilidade da ABNT. A maior corrente interrompida foi de 16,3 kA rms.

A corrente durante abertura em oposição de fases chegou a 9,2 kA rms.

Para os valores de TRT normalizados para esta abertura considera-se uma corrente de 25% da corrente nominal de abertura de curto-circuito. Assim, com uma interpretação estrita da norma, a corrente nominal de abertura de curto-circuito seria de pelo menos 36,8 kA rms, que resulta no valor normalizado de 40 kA.

No entanto, deve-se considerar que existe uma margem de 45 % entre o valor máximo da TRT calculado e o correspondente valor normalizado, figura 3.1.4, e que a maior corrente manobrada é de 16,3 kA rms. Assim é possível especificar a corrente nominal de abertura de curto-circuito em 31,5 kA limitando a abertura em oposição de fases a uma defasagem máxima de 118 graus, o que pode ser feito através da proteção que aciona o disjuntor.

9.5 Avaliação da sobretensão de 60Hz aplicada aos cabos de 69kV PAL9 – PAL7 e de 230kV PAL9 – PAL4 devido a desbalanço no cabo de 230kV

Em razão de um desbalanço no cabo de 230 kV, a maior elevação de tensão de 60 Hz em relação à terra no cabo de 69 kV foi de 44,7 kV-rms, 1,12 pu na base de 69 kV, durante a ocorrência de uma falta fase-fase e de 43,4 kV rms, 1,09 pu durante uma falta monofásica, ambas as faltas ocorrem no cabo de 230 kV. Esta elevação reproduz o efeito combinado do acoplamento indutivo entre os cabos e o efeito de espalhamento do desbalanço pelo sistema.

A tensão na blindagem do cabo de 230 kV pode elevar-se até 4,1 kV rms durante uma falta fase-fase em Pal4, para uma falta monofásica este valor limita-se em 3,39 kV rms.

Durante desbalanço, a maior tensão na ponta aberta do cabo reserva de 230 kV foi de 4,00 kV rms.

10.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou, de forma simplificada, a complexidade dos estudos necessários à implantação de uma linha de transmissão subterrânea em 230kV interligando as subestações PAL9 e PAL4 em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Foram analisados aspectos referentes à determinação dos parâmetros das linhas subterrâneas, análise da capacidade de condução de corrente do sistema e suportabilidade às solicitações por curto-circuito. Adicionalmente foram apresentados os resultados dos estudos de coordenação de isolamento e manobras operativas no sistema.

11.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NISHIMURA, FUMITAKA, Cálculo de Parâmetros Elétricos de Cabos Subterrâneos – Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP - SP - 1981
- (2) CICARELLI, LILIANE D., Estudo da Capacidade de Corrente dos Cabos Subterrâneos – Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP - SP - 1991
- (3) NISHIMURA, FUMITAKA, Sistema de Transmissão Subterrânea com Conexões Especiais – Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP - SP - 1981

12.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcio Coelho é membro do IEEE. Bacharelado em 1993 pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Mestrando em Sistemas de Potência pela USP – Universidade de São Paulo. Atualmente é Engenheiro Eletricista na Procable Energia e Telecomunicações SA.

Fumitaka Nishimura é membro do IEEE. Bacharelado em 1973 e Mestrado em 1981 em Engenharia Elétrica e Doutorado em Sistemas de Potência em 1988 pela USP – Universidade de São Paulo. Atualmente é o CEO da Procable Energia e Telecomunicações SA.

Liliane D. Cicarelli é membro do IEEE. Bacharelado em 1986 e Mestrado em 1992 em Sistemas Elétricos de Potência pela USP – Universidade de São Paulo. Atualmente é Gerente Geral da Procable Energia e Telecomunicações SA.