



XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CB/GDS/08

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**MODELAGEM DA LT SUBTERRÂNEA 230 KV BRASÍLIA SUL – BRASÍLIA GERAL
PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS COM O ATP**

Venilton Rodrigues de Oliveira(*)
JORDÃO ENGENHARIA

Marcio Americo
JORDÃO ENGENHARIA

Marcelo Mendonça Gonçalves
JORDÃO ENGENHARIA

RESUMO

A entrada em operação comercial da Linha de Transmissão Subterrânea (LTS) 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral estava prevista para 2016. Há uma preocupação, justificada por experiências anteriores, de problemas de ressonância entre LTS e a rede elétrica, que traz a necessidade de desenvolver estudos de manobra com o objetivo de identificar ressonâncias que possam levar a falhas no isolamento desta LTS. Este trabalho foi dividido em duas etapas distintas: (1) Modelagem da LTS e (2) Simulações para identificar ressonâncias.

Na primeira etapa, a LTS foi modelada com as suas características físicas e geométricas em todos os detalhes e definida a melhor representação no ATP. O mesmo procedimento foi feito no PSCAD, visando a validação do modelo da Linha.

Uma vez definida a modelagem da LTS, o trabalho passou para a segunda fase, quando foi calculada a resposta em frequência da rede equivalente sem e com a LTS, além da resposta em frequência somente da LTS, este para identificar a frequência característica da linha no ATP e no PSCAD. Em seguida, foram realizadas diversas manobras no sistema para verificar possíveis ressonâncias, a saber: Chaveamento de elementos capacitivos; energização das linhas; manobras de religamento e rejeição de carga. Em todas essas manobras foi analisado o espectro harmônico da onda de tensão nos terminais da LTS após os eventos, visando a identificação de possíveis ressonâncias.

Este artigo tem por objetivo apresentar o processo de modelagem da LTS e os estudos de manobras de elementos da rede elétrica que visam identificar respostas transitórias que entrem em ressonância com a LTS 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de Transmissão Subterrânea, ATP, Ressonância, PSCAD, Transitório Eletromagnético

1.0 - INTRODUÇÃO

A entrada em operação comercial da Linha de Transmissão Subterrânea (LTS) 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral estava prevista para meados de 2016. Há uma preocupação, justificada por experiências anteriores de problemas de ressonância entre LTS e a rede elétrica, como por exemplo o que ocorreu com a LTS 230 kV Porto Alegre 4 – Porto Alegre 9 [1], que traz a necessidade de desenvolver estudos de manobra com o objetivo de identificar possíveis casos de ressonâncias que possam levar a falhas no isolamento da LTS 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral.

Portanto, este artigo tem por objetivo apresentar o processo de modelagem da LTS e os estudos de manobras de elementos capacitivos da rede elétrica que possam apresentar respostas transitórias que entrem em ressonância com LTS 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral de 13,5 km. A Figura 1 apresenta a região de estudo.

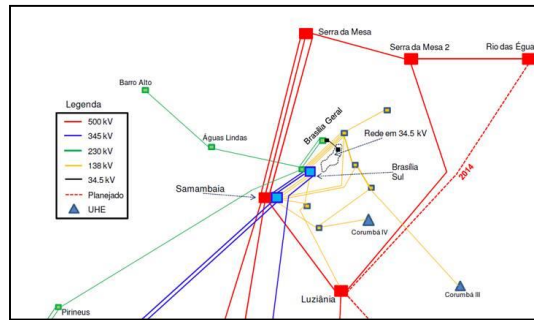


Figura 1 – Configuração do sistema na região de estudo

2.0 - REPRESENTAÇÃO DA REDE E DADOS CONSIDERADOS

A definição da rede equivalente adotou a premissa de locação de barras de fronteira em um raio de aproximadamente 300 km de distância do ponto de estudo, cobrindo assim o critério de afastamento mínimo de duas barras além da região de estudo conforme recomendado pelo ONS. A região de estudo, ou barras zero, são as SE 230 kV Brasília Sul e Brasília Geral. Essa rede equivalente foi validada com o ANAFAS.

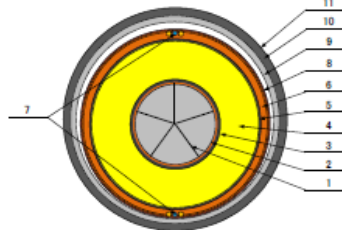
3.0 - MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA

A LTS foi modelada com as suas características físicas e geométricas em todos detalhes, essas características da LTS estão descritas a seguir.

3.1 Representação do Cabo

A especificação do cabo a ser utilizado na LTS estão apresentados abaixo e os dados construtivos são mostrados na Figura 2 .

- Cabo Isolado XLPE, 230 kV, 1x1200 mm²
- Condutor de Alumínio ASTM 11350 H19
- Capa Metálica de Alumínio Corrugado



Item	Descrição	Espessura nominal (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Especificação requerida	
				Espessura média mínima (mm)	Espessura mínima (mm)
1	Condutor de alumínio (5x37/8-2,97)		42,3		
2	Fita semi-condutora de amarração (0,27x2)	0,8	43,1	—	—
3	Camada semi-condutora interna	2,0	47,1	1,5	1,35
4	Isolação XLPE	24,0	95,1	23,0	20,7
5	Camada semi-condutora externa	1,4	97,9	1,3	1,17
6	Fita semi-condutora repelente a água (0,55x1)	4,2	106,3	—	—
7	Fibra óptica multimodo (0,5x2)				
8	Fita semi-condutora resistente a água (0,55x1)	0,75	107,8	—	—
9	Fita de malha de cobre (0,5x1)	0,5	108,8	—	—
10	Capa de alumínio corrugado	2,7	127,2	2,7	2,20
10	Betume	0,25	127,7	—	—
10	Capa externa PEAD anti-fermita	5,0	137,7	5,0	4,15
11	Camada de grafite		137,7	—	—

Peso aproximado do cabo : 16 kg/m

Figura 2 – Dados construtivos do cabo

O modelo do ATP usado para representar a LTS foi o Single Core Cable, considerando apenas o condutor de alumínio e a capa metálica de alumínio corrugado, com os seus respectivos isolamentos.

3.2 Geometria da instalação do Cabo

Os cabos estão dispostos em quatro dutos subterrâneos, com duas configurações distintas, em Vala e em MND, sendo três cabos de fase e um cabo reserva, A Figura 3 apresentam a configuração e as coordenada no ATP.

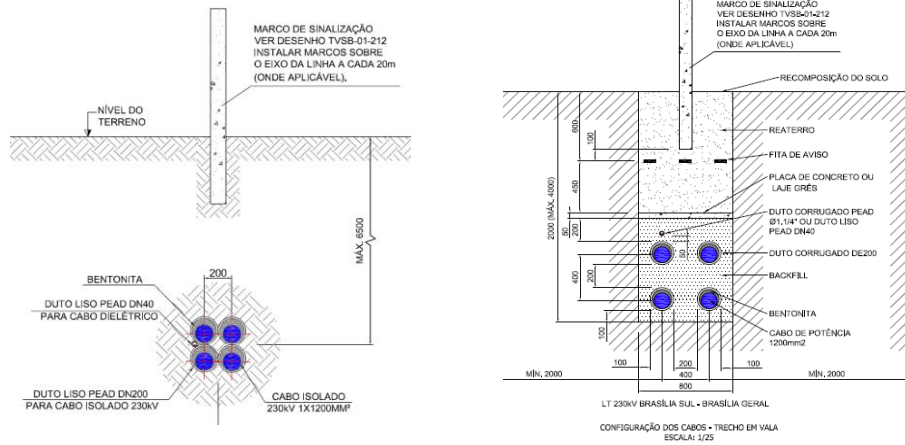


Figura 3 – Configuração em MND em Vale

3.3 Diagrama esquemático da rota

A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático da rota da LTS 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral, e a Figura 5 o esquemático das transposições dos cabos. A representação no modelo ATP obedeceu rigorosamente a configuração prevista no projeto, com os trechos em Vale e em MND, com as posições dos cabos de acordo com as transposições propostas, resultando em 53 seções distintas. Ressalta-se que o cabo reserva não foi representado.

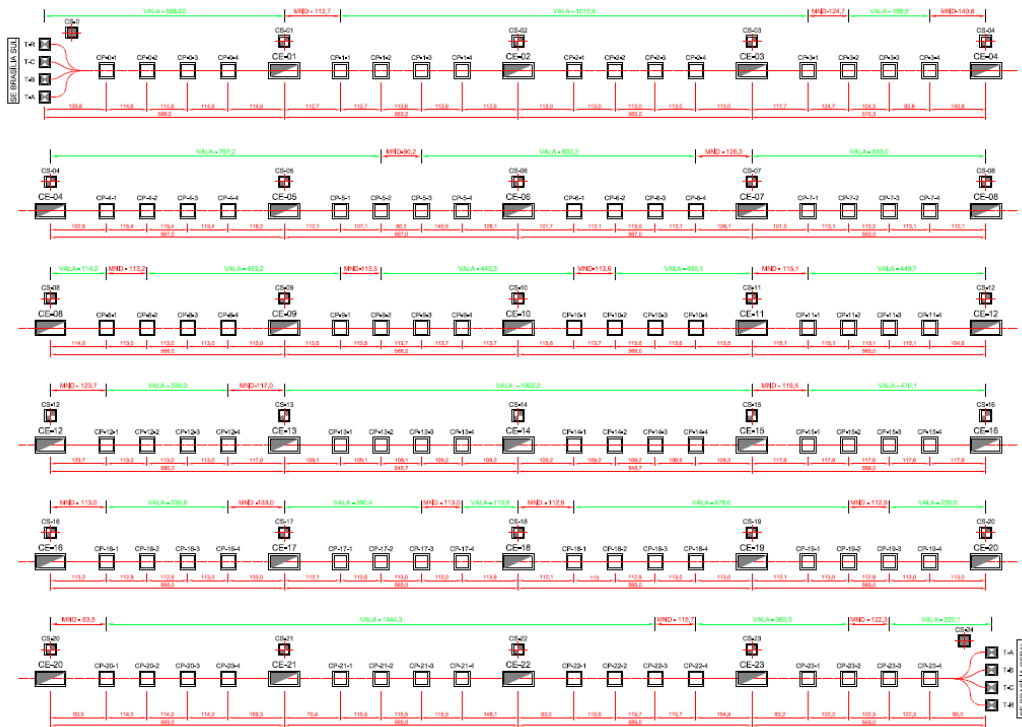


Figura 4 – Diagrama esquemático da rota da LTS 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral

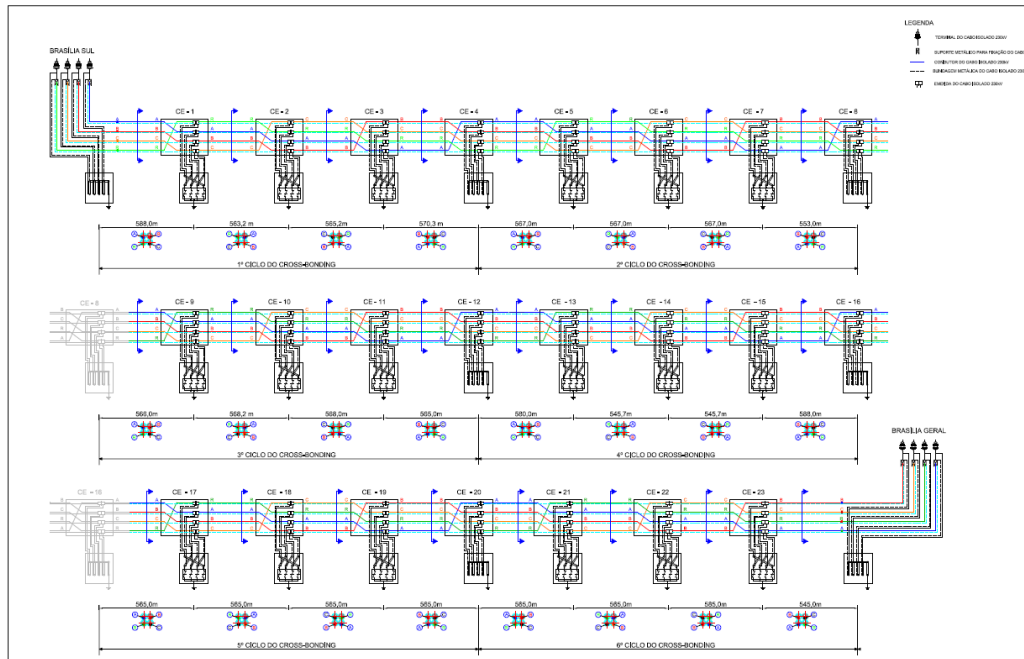


Figura 5 – Diagrama esquemático das transposições do cabo

4.0 - MODELAGEM DO CABO NO ATP

Dentre os diversos programas para análise de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo, o ATP apresenta diversas limitações no que se refere ao modelo de cabo, a saber:

- ✓ Dado a característica construtiva, onde há a presença de isolamento com características distintas do ar, um cabo isolado (com ou sem capa metálica) é bastante diferente de uma linha de transmissão aérea, pois seus modos apresentam velocidades de propagação bem distintas. Além disso, o arranjo dos cabos subterrâneos resulta em uma Matriz de Propagação variante na frequência em larga faixa de frequência. Tais características dificultam o uso de modelos como o Bergeron, com Matriz de Transformação real e constante;
- ✓ A impedância de retorno pelo solo, no caso de cabos subterrâneos, é dada pela expressão desenvolvida no Pollaczek em 1929 e bastante distinta da impedância de retorno pelo solo de linhas aéreas. Os modelos matemáticos presentes no ATP empregam as expressões da impedância de retorno pelo solo de linhas de transmissão em conjunto com as expressões de Bessel, o que limita a faixa de validade do modelo até poucos kHz;
- ✓ O modelo mais detalhado de linhas de transmissão existente no ATP é o modelo conhecido como JMarti, que pressupõe uma Matriz de Transformação real e constante. Tal hipótese não é válida para cabos subterrâneos, sendo, portanto, um outro fator que limita a faixa de validade do modelo empregado.

A análise detalhada do comportamento da Matriz de Transformação das diversas configurações testadas indica que, para valores na faixa de 1 a 5 kHz, a mesma pode ser considerada real e constante. De fato, a tendência ao comportamento real já é encontrada para matrizes acima de 1 kHz. Considerando-se as duas possibilidades de modelos no ATP há algumas opções: o modelo de Bergeron em 1 kHz e o modelo de Bergeron em 5 kHz. Para as simulações foi adotado o modelo Bergeron de 5 kHz.

4.1 Comportamento do cabo em função da frequência

Usando um programa proprietário, foi possível simular um trecho do cabo e analisar o comportamento da Matriz de Transformação. A Figura 6 apresenta o comportamento da Parte Real e da Parte Imaginária da primeira coluna da Matriz de Transformação de tensão (T_v).

A matriz (T_v) é a matriz dos autovetores do produto matricial ZxY , onde Y é a matriz 6x6 de admitância e Z é matriz 6x6 de impedância, ambas por unidade de comprimento. O comportamento das demais colunas é similar para frequências acima de 1 kHz, pois os elementos apresentam o comportamento praticamente real e constante.

Muito embora não detalhado aqui, para a frequência de 1 kHz a parte real ainda apresenta um pequeno valor não

nulo. Senso assim, foi adotada a frequência de 5 kHz para a representação do modelo no ATP. As oscilações que aparecem acima de 100 kHz na Figura 6 causadas por problemas numéricos do modelo matemático e foram ignoradas.

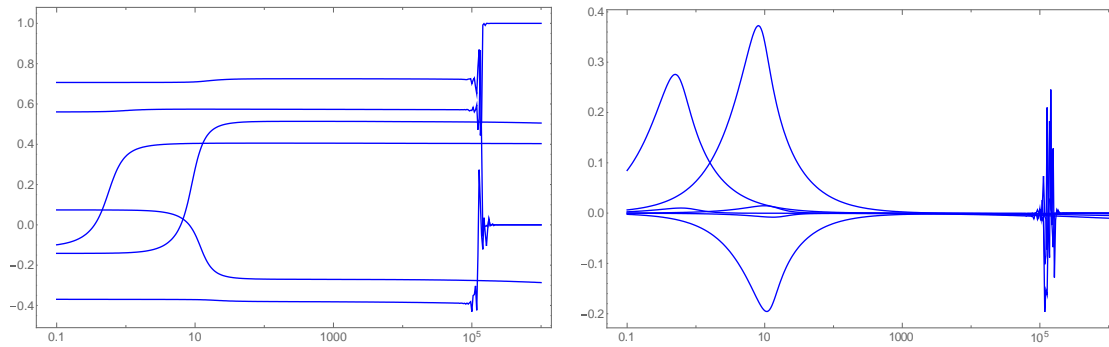


Figura 6 – Comportamento da parte real e imaginária da Matriz de Transformação Tv

4.2 Resposta em frequência do modelo do cabo no ATP

Foram feitas simulações no domínio da frequência no ATP para as três frequências distintas de cálculo do modelo Bergeron (60 Hz, 1 kHz e 5 kHz). Os resultados validam as considerações feitas anteriormente, pois a resposta em frequência do cabo apresentou valores completamente atípicos para a frequência de 60 Hz (Figura 7.a), enquanto que apresentaram comportamento semelhantes nas frequências de 1 kHz (Figura 7.b) e 5 kHz (Figura 7.c).

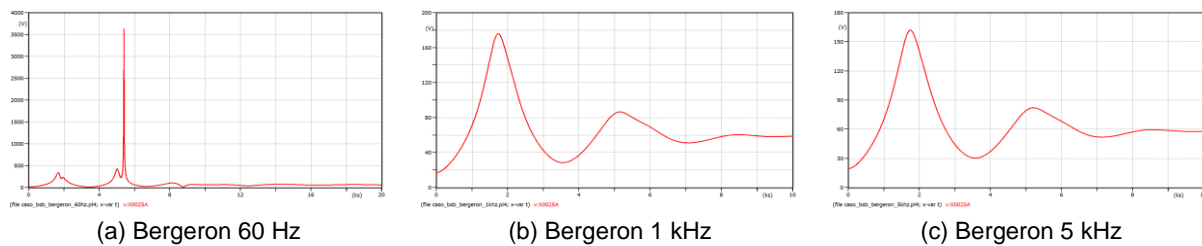


Figura 7 – Resposta em Frequência do Modelo Bergeron

4.3 Resposta em frequência do modelo do cabo no PSCAD

Para revalidar de forma mais precisa a modelagem do cabo, foi simulada essa mesma configuração da LTS 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral no programa de simulação PSCAD, nas mesmas faixas de frequência. Os resultados estão apresentados na Figura 8.

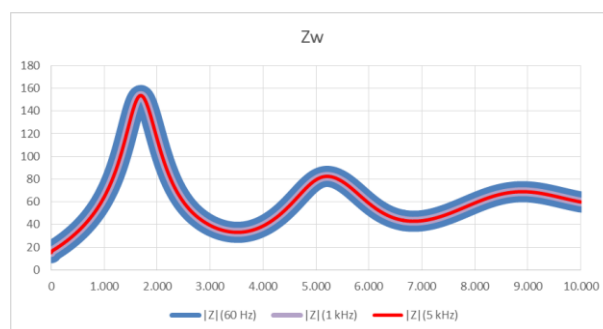


Figura 8 – Resposta em Frequência do Modelo PSCAD 60 Hz, 1 kHz e 5 kHz

No PSCAD, os resultados foram exatamente os mesmos nas três frequências analisadas, e muito próximos do modelo ATP em 5 kHz, o que mais uma vez confirma o uso do modelo de 5 kHz no ATP.

4.4 Simulações do tempo de propagação no ATP e no PSCAD

Uma outra comparação foi feita entre os modelos do ATP e PSCAD, que procurou verificar o tempo de propagação na linha de transmissão completa (Tabela 1). Os resultados mais uma vez mostraram que os modelos possuem comportamento semelhantes.

Tabela 1 – Comparação ATP x PSCAD

Descritivo	ATP	PSCAD
Tempo de Propagação	92,4 μ s	96,9 μ s
Tensão Máxima	1,450 pu	1,498 pu

5.0 - SIMULAÇÕES NO ATP – CHAVEAMENTO DE CAPACITORES

Foram realizadas várias simulações da LTS no ATP com o objetivo de encontrar a resposta em frequência do sistema em regime permanente e também avaliar as possíveis ressonâncias provocadas pelas manobras de elementos capacitivos nas Subestações vizinhas. A Tabela 2 apresenta os casos simulados do ATP.

Em todos os casos de chaveamento não foi identificada nenhuma frequência próxima de frequência natural do sistema, o que indica a ausência de risco de ressonâncias, como mostram a Figura 9 e Figura 10.

Tabela 2 – Casos de Chaveamentos Simulados

Caso	Descritivo	Medição	Condição da LTS	
1.a	Resposta em Frequência	Brasília Geral	Sem a LTS	
1.b			Com a LTS	
1.c			Com a LTS – B. Sul Aberto	
2.a		Brasília Sul	Sem a LTS	
2.b			Com a LTS	
2.c			Com a LTS – B. Geral Aberto	
3.a	Chaveamento de Capacitor em Samambaia 345 kV	Brasília Geral	Sem a LTS	
3.b			Com a LTS	
4.a		Brasília Sul	Sem a LTS	
4.b			Com a LTS	
5.a	Chaveamento de Capacitor em Brasília Sul 138 kV	Brasília Geral	Sem a LTS	
5.b			Com a LTS	
6.a		Brasília Sul	Sem a LTS	
6.b			Com a LTS	
7.a		Chaveamento de Capacitor em Brasília Sul 230 kV	Brasília Geral	Sem a LTS
7.b				Com a LTS
8.a	Brasília Sul		Sem a LTS	
8.b			Com a LTS	
9.a	Chaveamento de Capacitor em Bandeirantes 345 kV		Brasília Geral	Sem a LTS
9.b				Com a LTS
10.a		Brasília Sul	Sem a LTS	
10.b			Com a LTS	
11.a		Chaveamento de Capacitor em Barro Alto 230 kV	Brasília Geral	Sem a LTS
11.b				Com a LTS
12.a	Brasília Sul		Sem a LTS	
12.b			Com a LTS	



Figura 9 – Resposta em Frequência

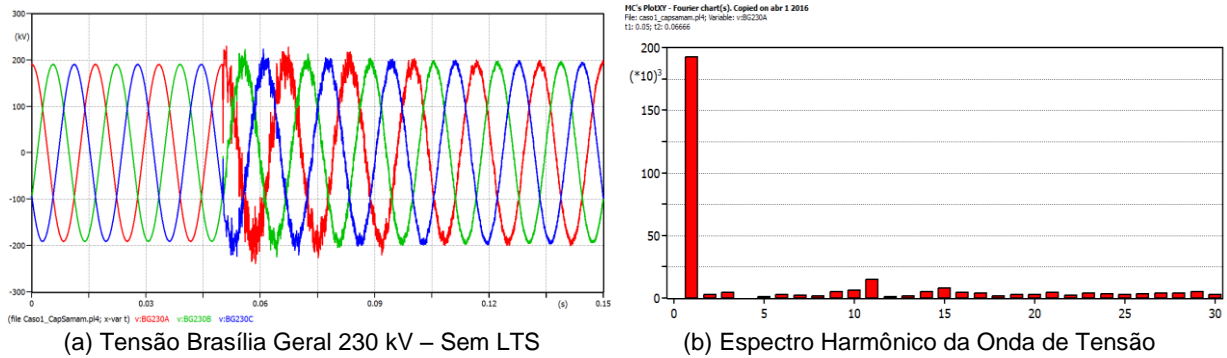


Figura 10 – Chaveamento de Capacitor em Samambaia 345 kV – B. Geral

Tabela 3 – Valores do Espectro Harmônico da Onda de Tensão

Harmônico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amplitude (kV)	191.960	2.569	4.364	549	817	2.220	2.155	1.398	4.492	5.918	15.322	1.787	1.066	5.022	7.583
Amplitude (%)	100,0%	1,3%	2,3%	0,3%	0,4%	1,2%	1,1%	0,7%	2,3%	3,1%	8,0%	0,9%	0,6%	2,6%	4,0%
Harmônico	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Amplitude (kV)	4.688	3.840	1.099	2.732	3.357	3.821	2.967	3.263	2.916	2.566	3.580	3.464	4.085	4.102	2.262
Amplitude (%)	2,4%	2,0%	0,6%	1,4%	1,7%	2,0%	1,5%	1,7%	1,5%	1,3%	1,9%	1,8%	2,1%	2,1%	1,2%

THD=12,593%

6.0 - CONCLUSÃO

As simulações foram realizadas com as seguintes etapas:

- Foi representado um equivalente de rede com um raio de aproximadamente 300 km de distância do ponto de conexão da LTS, cobrindo assim o critério de afastamento mínimo de duas barras além da região de estudo conforme recomendado pelo ONS;
- A LTS foi modelada com as suas características físicas em todos detalhes e definida a melhor representação no ATP, e o mesmo foi feito no PSCAD visando a validação do modelo da LTS;
- Foi calculado a resposta em frequência da rede equivalente sem e com a LTS;
- Foi calculada a resposta em frequência da LTS para identificar a frequência característica da linha no ATP e no PSCAD;
- Foram chaveados os principais elementos capacitivos próximos a LTS;
- Foram energizadas as Linhas no entorno da LTS, além das manobras de religamento tripolar com sucesso e rejeição de carga;
- Foi realizado o cálculo do espectro harmônico da onda de tensão nos terminais da LTS após os chaveamentos e as energizações.

Baseado nas simulações realizadas com o programa ATP, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Em todas as simulações não foram verificados problemas de ressonância na LTS;
- As tensões na capa metálica ficaram muito abaixo do limite de suportabilidade dos cabos, tanto em valor absoluto como para a taxa de crescimento.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) RT/013/2012 - DISCHARGE IN THE TERMINAL OF PHASE C - SE PAL4 - 23/04/2012X

(2) Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos – Submódulo 23.3 – ONS.

(3) Relatório B2034672, Troubleshooting on Porto Alegre 4-9 cable fault – Task 3 – Part I: Description of the ATP model, 20/082012 – CESI ref. B2026314.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Venilton Rodrigues de Oliveira

Engenheiro Eletricista Sênior, com formação em Sistemas de Potência, com conhecimento do Sistema Elétrico Brasileiro. Com grande experiência em estudos regime permanente, transitório eletromecânico, comissionamento, modelagem e ajuste de equipamento de controle, tais como: Reguladores de Tensão (RT), Reguladores de Velocidade (RV), estabilizador de sistemas de potência (PSS), compensadores estáticos (SVC), capacitor série controlável (TCSC). Grande experiência com programas de simulação, entre eles: ANAREDE, ANATEM, ANAFAS, PACDYN, PSCAD/EMTDC e algum conhecimento nos seguintes programas ATP/EMTP e Eurostag.

Hoje é sócio da empresa Jordão Engenharia, uma empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento.

Marcio Americo

Engenheiro Eletricista Sênior, formado pela UFF em 1992, com ênfase em Sistemas de Potência, com mestrado na UFRJ em 1996 na área de Eletrônica de Potência.

Atuou por 10 anos no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás). Hoje é sócio da empresa Jordão Engenharia, uma empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento.

Experiência em estudos de Fluxo de Potência – ANAREDE, Estabilidade – ANATEM, Curto Circuito – ANAFAS, ATP – EMTP – Transitórios Eletromagnéticos. Também atua em projetos de eficiência energética para grandes empresas nacionais e internacionais, além de ministrar palestras e treinamentos em empresas e universidades.

Marcelo Mendonça Gonçalves

Engenheiro Eletricista com formação em Sistemas de Potência. Conhecimento em Fluxo de Potência – ANAREDE, Estabilidade – ANATEM, Curto Circuito – ANAFAS, ATP – EMTP – Transitórios Eletromagnéticos.