



## **Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS**

### **Análise das solicitações impostas por linhas subterrâneas sobre o sistema interligado**

**GRACITA BATISTA ROSAS (1); PABLO MOURENTE MIGUEL (2); MARCELO MENDONÇA GONÇALVES (3);  
VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA (3); HELIO PESSOA DE OLIVEIRA JR (4); MIGUEL ARMINDO  
SALDANHA MIKILITA (5); JEFERSON SHIMOMURA (6);  
COPEL (1); TgDelta (2); JORDÃO ENG. (3); ONS (4); COPEL (5); COPEL (6);**

#### RESUMO

Este informe técnico apresenta uma investigação a respeito da existência de possíveis ressonâncias associadas a inclusão da nova SE 230 kV Curitiba Centro, isolada a gás, com duas unidades de transformação de 150 MVA e da nova LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo subterrâneo no sistema interligado nacional. A investigação foi baseada principalmente nas distorções das ondas de tensão, que dependem da impedância da rede e da corrente harmônica gerada pela carga. Os resultados alcançados destacam a importância de se avaliar esse fenômeno em expansões de sistemas elétricos de potência.

#### PALAVRAS-CHAVE

Linha Subterrânea, Ressonância, Impedância Harmônica, Corrente de Inrush

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Previsões no aumento do consumo de energia elétrica tem resultado em constantes expansões no sistema elétrico brasileiro, motivando os agentes de geração, transmissão e distribuição a buscarem medidas eficazes, seguras e econômicas na construção de novas instalações. Dentre essas medidas cabe destacar as avaliações necessárias para verificar a interação de novos circuitos elétricos em sistemas de potência existentes, representados por diferentes elementos, inclusive aqueles com comportamento não linear.

A inclusão de novos circuitos em sistemas elétricos de potência (SEP) existentes resulta na interação de capacitâncias e indutâncias, alterando a impedância equivalente, vista de um determinado ponto da rede elétrica, para valores mínimos ou máximos dependendo da variação da frequência do sistema. Esta resposta da impedância do sistema em função da frequência, é denominada impedância harmônica e traduz os fenômenos de ressonância em SEP. Caso fontes de corrente com conteúdo harmônico, como as correntes de inrush que surgem durante a energização de transformadores, apresentem a predominância de uma determinada componente harmônica que coincida com uma elevada impedância harmônica, as tensões harmônicas se somam a tensão à frequência industrial e podem apresentar valores excessivos para o isolamento dos equipamentos do sistema ou sensibilizar esquemas de proteção, causando o desligamento de algumas áreas desse sistema.

Neste contexto este informe técnico tem como objetivo investigar possíveis fenômenos de ressonância com a inclusão no sistema interligado nacional do novo empreendimento de transmissão, necessário para o atendimento do aumento da demanda da cidade de Curitiba. O empreendimento contempla a nova SE 230 kV Curitiba Centro, isolada a gás, com duas unidades de transformação de 150 MVA e a nova LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo subterrâneo. A investigação foi realizada para a etapa de projeto básico do referido empreendimento.

## 2.0 - O FENÔMENO DE RESSONÂNCIA

Da teoria de circuitos elétricos sabe-se que os circuitos que contêm capacitâncias e indutâncias podem ter uma ou mais frequências nas quais a impedância equivalente vista de um determinado ponto do circuito, pode ser mínima ou máxima, resultando em ressonâncias série e paralela, respectivamente (1).

Para avaliarmos o fenômeno de ressonância série e paralela de um circuito consideremos os circuitos ilustrados na Figura 1.

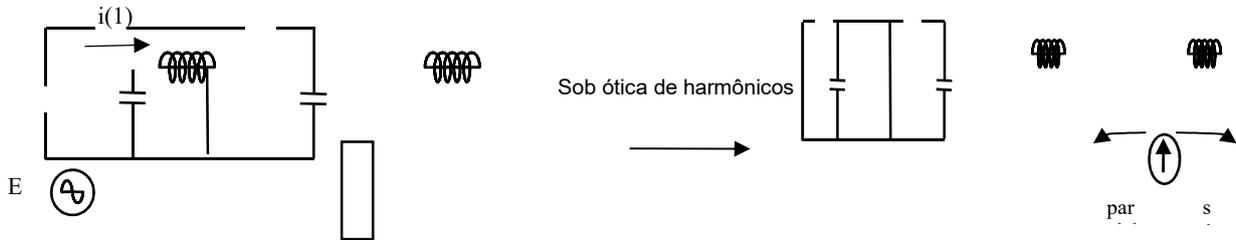


FIGURA 1 – Circuito elétrico monofásico equivalente para ressonâncias série e paralela

Sob a ótica de harmônicos as cargas do sistema podem se apresentar como fontes de corrente harmônica  $i_1(h_p)$  e  $i_2(h_s)$ . Neste caso para a frequência de ressonância paralela  $h_p$ , o valor de reatância indutiva  $X_{L1}(h_p)$  e a reatância capacitiva  $X_{C1}(h_p)$  serão muito próximas ou iguais, e, portanto, a impedância harmônica equivalente será elevada, resultando em uma elevada tensão harmônica, que pode danificar o capacitor  $X_{C1}(h_p)$ . A impedância equivalente deste circuito é determinada por:

$$Z_{eq}(h_p) = -j \frac{X_{L1}(h_p)X_{C1}(h_p)}{X_{L1}(h_p) - X_{C1}(h_p)} \quad (1)$$

Logo a tensão é determinada por:

$$V_1(h_p) = Z_{eq}(h_p) \cdot i_1(h_p) \quad (2)$$

Tem-se para o circuito onde circula a corrente harmônica  $i_1(h_p)$  um fenômeno de ressonância paralela.

A ressonância paralela será alcançada quando  $X_{L1}(h_p) - X_{C1}(h_p) \approx 0$ , ou seja,  $2\pi h_p L_1 \approx \frac{1}{2\pi h_p C_1}$  ou  $h_p \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$

Na frequência de ressonância série  $h_s$ , o valor de reatância indutiva  $X_{L2}(h_s)$  e a reatância capacitiva  $X_{C2}(h_s)$  serão muito próximas ou iguais, e, portanto, a impedância harmônica equivalente será muito pequena ou nula, resultando em uma elevada corrente harmônica, que pode danificar o capacitor  $X_{C2}(h_s)$ . Tem-se para o circuito onde circula a corrente harmônica  $i_2(h_s)$  um fenômeno de ressonância série.

$$i_2(h_s) = -j \frac{V_2(h_s)}{X_{L2}(h_s) - X_{C2}(h_s)} \quad (3)$$

A ressonância série será alcançada quando  $X_{L2}(h_s) - X_{C2}(h_s) \approx 0$ , ou seja,  $2\pi h_s L_2 \approx \frac{1}{2\pi h_s C_2}$  ou  $h_s \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}$

Em diversas situações, o fenômeno de ressonância paralela pode ocorrer em uma determinada frequência, enquanto a ressonância série pode ocorrer em outra frequência. A Figura 2 a seguir ilustra a resposta em frequência de um circuito com ressonâncias paralela e série (1).

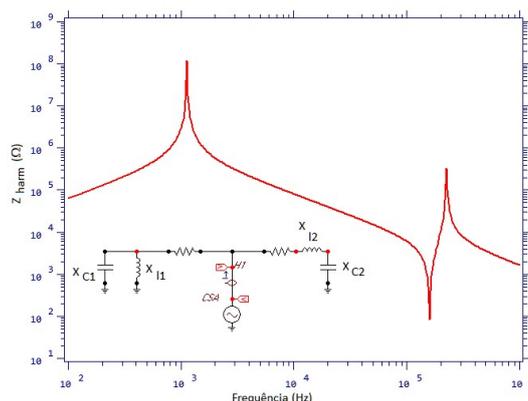


FIGURA 2 – Curva de resposta em frequência de um circuito com ressonâncias paralela e série

Na frequência fundamental, a impedância harmônica vista de uma barra é igual à impedância de curto-circuito, porém ao longo do espectro de frequências harmônicas tem-se uma complexa associação de ressonâncias série e paralela.

Aumentando-se a frequência, o efeito das várias capacitâncias (shunt) dos componentes da rede vai se tornando mais pronunciado, posto que a reatância capacitiva diminui e a corrente de fuga através dos capacitores aumenta. Os bancos de capacitores, por apresentarem uma capacitância elevada, direcionam os pontos de ressonância para frequências mais baixas.

As ressonâncias série dificilmente ocorrem longe dos pontos onde se caracteriza uma fonte de harmônicos, posto que as reatâncias indutivas se somam e a frequência de ressonância se torna muito baixa, inclusive abaixo de 60Hz, o que já não mais representa frequência de ressonância harmônica. Já para o caso da ressonância paralela a tensão pode ser muito elevada mesmo com correntes muito baixas, praticamente prescindindo da energia oriunda da fonte. Logo as ressonâncias paralelas podem ocorrer em pontos distantes da fonte de harmônico (2).

Um exemplo de corrente com conteúdo harmônico é a corrente de inrush que surge durante a energização de um transformador, devido à não linearidade do núcleo magnético e que pode atingir valores elevados. Essas correntes, que apresentam componentes diferentes da frequência industrial, circulam no sistema elétrico, principalmente no transformador energizado. Se a impedância da rede para algumas destas frequências for elevada, aparecerão elevadas sobretensões em função da circulação dessas correntes harmônicas, distorcendo a onda de tensão. A tensão resultante da soma da tensão à frequência industrial com as tensões harmônicas pode resultar em valores excessivos para o isolamento dos equipamentos do sistema ou mesmo sensibilizar esquemas de proteção, causando o desligamento de algumas áreas do sistema (2).

Uma maneira de prever possíveis sobretensões na energização de transformadores é conhecer a impedância harmônica da rede. Uma vez conhecida essa impedância, o passo seguinte é determinar o espectro harmônico da corrente de inrush, que resulta da interação do transformador com a rede. As características de saturação do transformador são predominantes na definição das correntes de inrush, cabendo a configuração da rede um papel secundário na sua definição, logo essa corrente pouco varia em função da configuração da rede. Em geral, os casos mais preocupantes são aqueles que apresentam impedâncias elevadas para as frequências onde a corrente harmônica também seja elevada.

As correntes de inrush são calculadas para cada projeto para que se verifique como o sistema se comporta em função da corrente de inrush. Os seguintes pontos são importantes:

- Se o sistema for fraco (pouca capacidade de suprir reativos) poderá ocorrer um importante afundamento de tensão, inclusive nas subestações próximas, que poderá provocar desarme (dropout) de reles e causar desligamentos inesperados;
- A interação entre os harmônicos da corrente de inrush (que são conhecidos 2º, 3º, 5º) com a impedância harmônica do sistema e com a proteção;
- A ressonância que preocupa em relação à corrente de inrush, é a ressonância paralela, pois uma corrente já atenuada pode encontrar no sistema uma elevada impedância harmônica e resultar em elevadas sobretensões.

### 3.0 - MODELAGEM DO SISTEMA

As simulações realizadas a fim de investigar fenômenos de ressonância com a inclusão da nova SE 230 kV Curitiba Centro, isolada a gás, com duas unidades transformadoras de 150 MVA e da nova LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo subterrâneo no sistema interligado nacional foram realizadas através de simulações computacionais no software ATP. O sistema elétrico utilizado para a simulação está ilustrado na Figura 3 e foi modelado, conforme as diretrizes para elaboração de projetos básicos do Operador Nacional do Sistema - ONS (3).

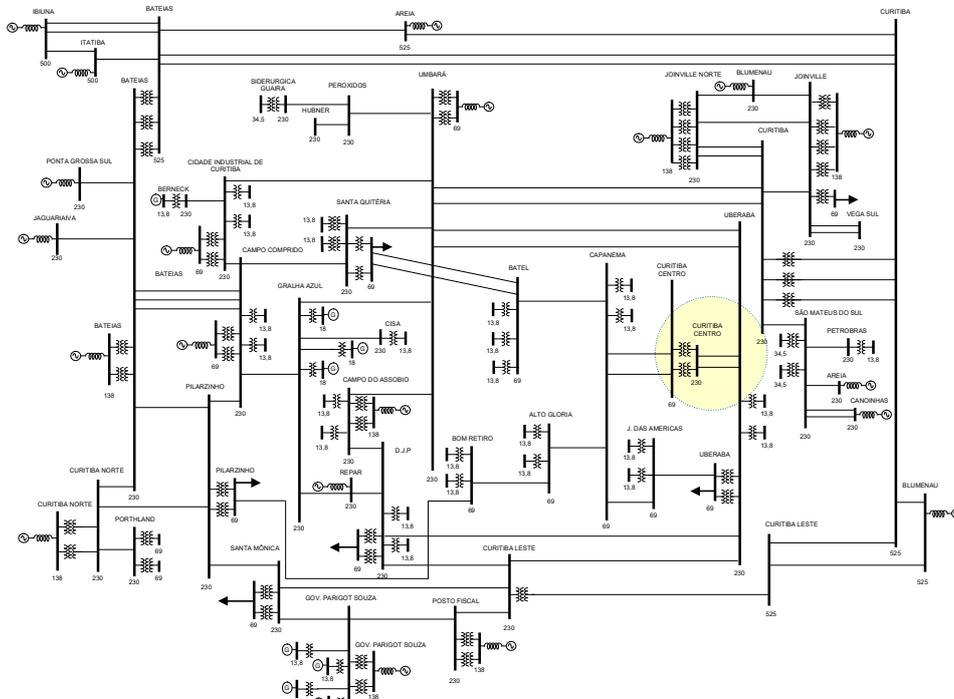


FIGURA 3 – Região Modelada SE 230 kV Curitiba Centro

### 3.1 Modelagem da Linha Subterrânea

A LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, possui dois circuitos trifásicos subterrâneos de aproximadamente 8 quilômetros de extensão. Cada circuito da linha é transposto de forma individual e adotada uma formação vertical plana, exceto nos pontos de travessia por perfuração direcional, onde é usada uma formação trifólio. A transposição é realizada nos condutores e não nas blindagens. Cada circuito passa por nove transposições, ou seja, 3 ciclos de transposição completos em cada circuito. O aterramento da linha é feito por cross-bonding, de forma a reduzir a tensão induzida nas blindagens dos cabos. As blindagens são aterradas em cada extremidade da linha. A cada ciclo completo de transposição as blindagens das três fases são conectadas e aterradas localmente. Nos pontos intermediários de transposição, as blindagens são mantidas isoladas e conectadas à terra por meio de um limitador de surtos. A Figura 4 ilustra o diagrama de aterramento da blindagem com cross-bonding.

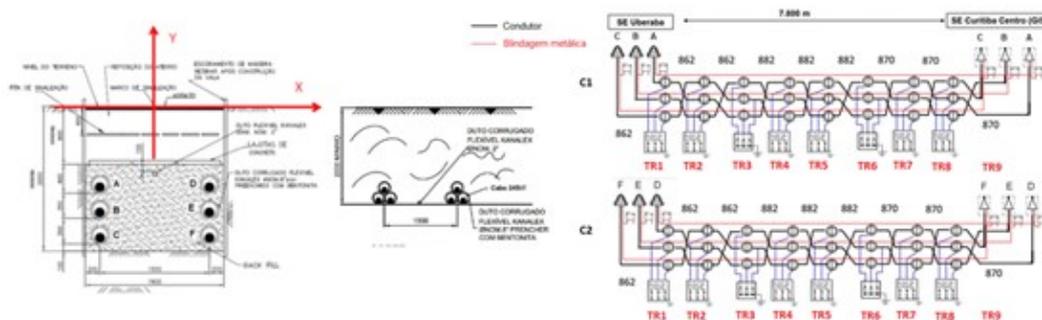


FIGURA 4 – Diagrama do aterramento da blindagem com cross-bonding

A linha em questão, sendo formada por dois circuitos trifásicos, possui 6 cabos, o que corresponde a 12 modos de propagação. Os modos de 1 a 6 são os modos de retorno pelo solo, ou seja, das blindagens para o solo, e

apresentam uma maior atenuação e baixa velocidade de propagação. Os modos de 7 a 12 são os modos de propagação de transitórios eletromagnéticos entre os condutores e a blindagens, apresentando menor atenuação e velocidade de propagação mais elevada.

#### 4.0 - RESULTADOS

A investigação sobre fenômenos de ressonância com a inclusão da nova SE 230 kV Curitiba Centro, isolada a gás, com duas unidades transformadoras de 150 MVA e da nova LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo subterrâneo no sistema interligado nacional, foi realizada em duas etapas. A primeira contempla as avaliações associadas as impedâncias harmônicas e as grandezas elétricas envolvendo o transformador manobrado. A segunda etapa contempla as avaliações associadas aos afundamentos das tensões e as correntes de neutro dos transformadores na vizinhança da subestação 230 kV Curitiba Centro, onde os transformadores estão sendo manobrados.

#### 4.1 Impedância Harmônica

As simulações realizadas a fim de identificar as impedâncias harmônicas foram realizadas para barras de 230 kV que fazem conexão da linha subterrânea Curitiba Centro - Uberaba. Os casos simulados estão descritos na Tabela 1 e ilustrados na Figura 5.

Tabela 1 – Casos de Simulação Impedância Harmônica da Rede

Barra	Caso	LT 230 kV Subterrânea Curitiba Centro - Uberaba
Curitiba Centro 230 kV	1	Com a linha
	2	Sem a linha
Uberaba 230 kV	3	Com a linha
	4	Sem a linha

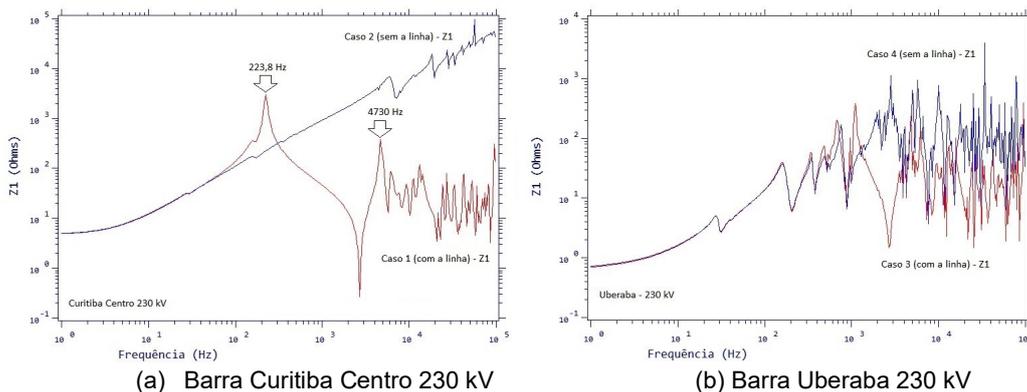
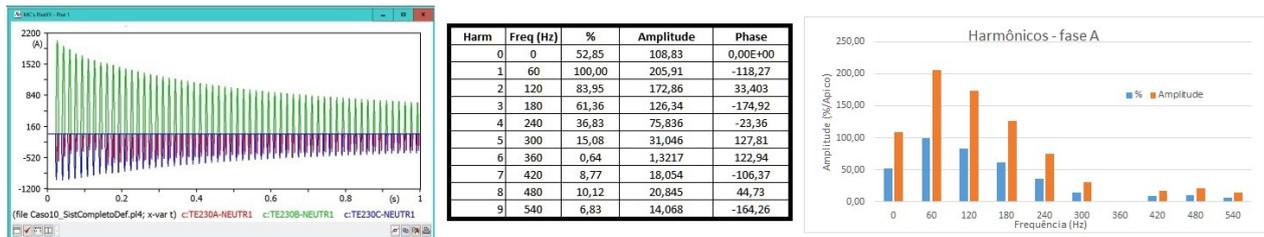


Figura 5 – Impedância harmônica de seqüência positiva

A Figura 5 (a) ilustra o aumento da impedância harmônica vista pela barra de Curitiba Centro 230 kV para a frequências de menor ordem, com a inclusão da linha subterrânea, como era de se esperar em função do elevado efeito capacitivo dessa linha. Observa-se que ocorre uma ressonância paralela na frequência de 223,8 Hz, com um módulo de impedância igual a 2905 Ω. A Figura 5 (b) ilustra para impedância harmônica vista pela barra de Uberaba 230 kV, onde para frequências de ordem mais elevada observa-se a inversão do comportamento de ressonância paralela para ressonância série.

#### 4.2 Corrente de Inrush

Durante do transformador TR2 de 150 MVA na SE 230kV Curitiba Centro, com o TR1 já energizado e o sistema pleno, alcançou-se o maior valor da corrente de inrush conforme ilustrado na Figura 6 (a) e a decomposição por análise de Fourier dessa corrente pode ser vista na Figura 6 (b), onde é possível observar que o harmônico que apresenta amplitude com o maior percentual da componente fundamental é o 2º harmônico.



(a) corrente de inrush b) espectro de frequência da corrente de inrush  
 Figura 6 – Amplitude e espectro da corrente de inrush no caso mais severo

### 4.3 Corrente no Neutro do Transformador

A Figura 7 ilustra as correntes no neutro de transformador durante a manobra de energização. A ilustração dos valores eficazes destas correntes serve para confirmar os ajustes da função de proteção de sobrecorrente temporizada no neutro – 51N.

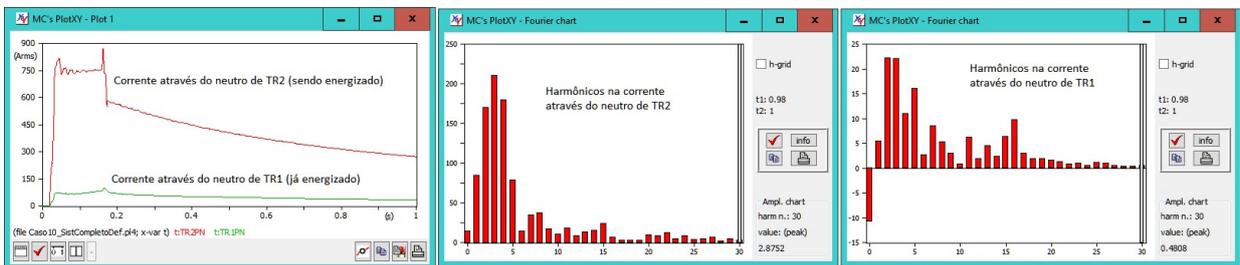


Figura 7 – Corrente através do neutro nos transformadores da SE Curitiba Centro durante a energização de TR2

### 4.4 Sobretensões nos Transformadores

Conforme ilustrado na Figura 5(b) a ressonância paralela ocorre nas proximidades do 4º harmônico (240 Hz) com uma amplitude de 2905 Ω. Como o 4º harmônico apresenta uma amplitude de 75,8 A<sub>crista</sub> para esta frequência, a amplitude de tensão durante a energização do transformador chega a 211 kV (1,12 pu), para a barra de 230 kV da SE Curitiba Centro, conforme ilustrado na Figura 8.

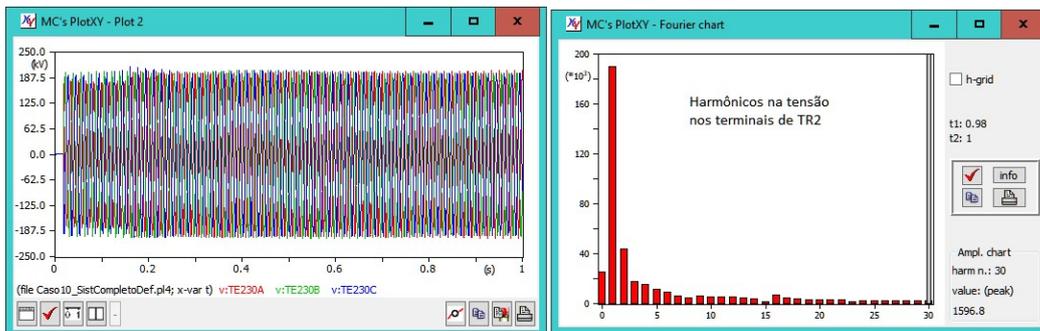


Figura 8 – Tensão nos terminais do transformador TR2 durante a energização

### 4.5 Sobretensões na Linha de Transmissão Subterrânea

Durante a energização do transformador TR2 de 150 MVA na SE 230kV Curitiba Centro (com o TR1 já energizado) avaliou-se também as sobretensões ao longo da linha subterrânea, conforme ilustrado na Figura 9, e não foram encontrados problemas com sobretensões.

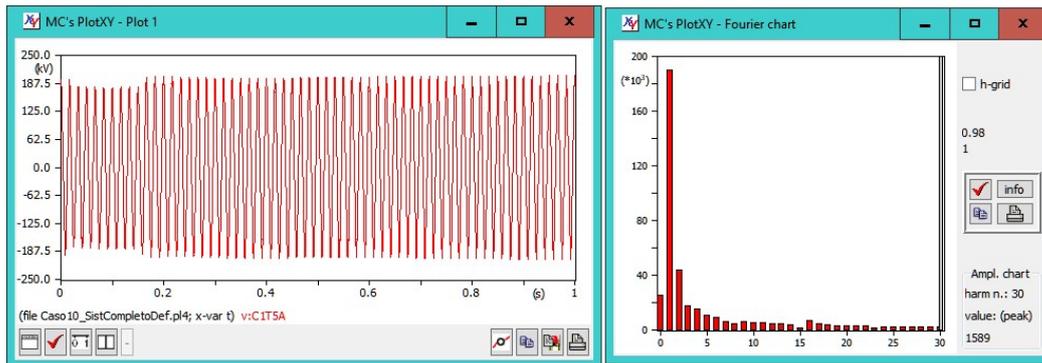


Figura 9 – Tensão na fase A circuito 1, meio da linha subterrânea Curitiba Centro – Uberaba

#### 4.6 Corrente no Neutro dos Transformadores das Barras Vizinhas

Um ponto de especial interesse decorre do fato que ao se energizar um transformador de grande porte (acima de 100 MVA), se observa um aumento na corrente de neutro em todos os transformadores na vizinhança do transformador sendo energizado. A Figura 10 ilustra a variação do valor instantâneo e eficaz da corrente de neutro no Transformador da subestação 230 kV Uberaba. Conforme mencionado anteriormente, a verificação das correntes no neutro dos transformadores serve para confirmar o ajuste da proteção temporizada de corrente no neutro dos transformadores – 51N. Usualmente o transitório na corrente de neutro dos transformadores vizinhos desaparece rapidamente e assim a proteção de corrente de neutro, função 51N, não chega a ser ativada.

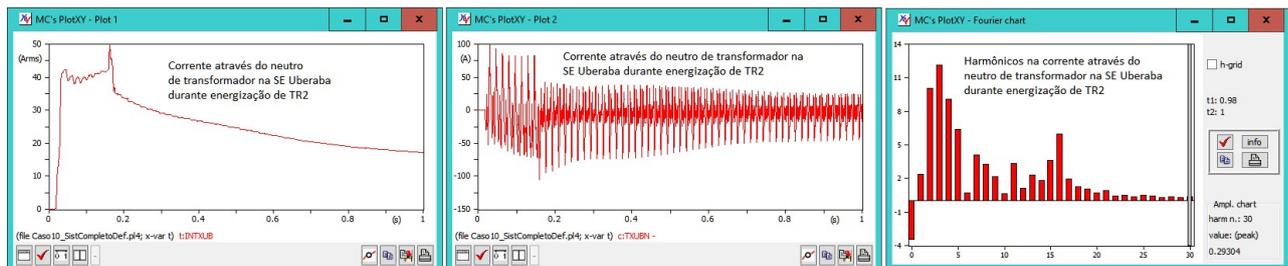


Figura 10 – Corrente através do neutro de transformador na SE Uberaba durante energização de TR2

#### 4.7 Afundamento das Tensões na Barras Vizinhas Barras Vizinhas

O transitório na corrente de neutro decorre do fato de que ao energizar um transformador uma das fases apresenta uma corrente de partida elevada e isso implica em um afundamento de tensão nessa fase. A Figura 11 mostra o afundamento de tensão nas barras Curitiba Centro 230 kV e Uberaba 230 kV. O afundamento de tensão, inclusive nas subestações próximas, poderá provocar desarme (dropout) de relés e causar desligamentos inesperados. Segundo os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (4), denomina-se afundamento momentâneo de tensão o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms, na frequência de 60 Hz) e inferior ou igual a 3 (três) segundos.

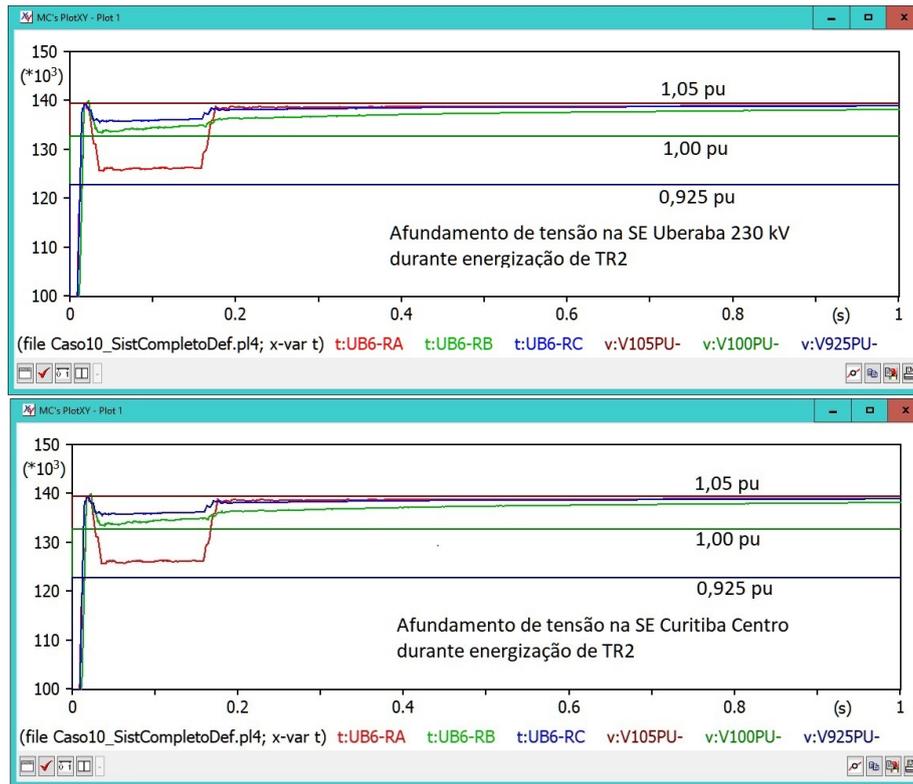


Figura 11 – Afundamento no valor da tensão eficaz durante a energização de TR2

## 5.0 - CONCLUSÃO

Dos resultados alcançados observou-se que a presença da linha subterrânea alterou a impedância harmônica do sistema vista pela barra da subestação 230 kV Curitiba Centro, elevando a impedância para frequências de menor ordem, como era de se esperar em função do elevado efeito capacitivo dessa linha. Identificou uma ressonância paralela próxima da frequência harmônica de 4ª ordem, no valor de 2905  $\Omega$ .

A corrente de inrush presente durante a energização do transformador apresentou para a frequência harmônica de 4ª ordem, um percentual de 37% da componente fundamental. A combinação da impedância harmônica com a corrente de inrush não resultou em sobretensões sustentadas nos transformadores.

O impacto da energização dos transformadores foi avaliada no afundamento das tensões em barras vizinhas a subestação objeto de estudos e não foram identificados valores significativos de afundamento das tensões.

Esse impacto foi avaliado também nas correntes de neutro dos transformadores da vizinhança a fim confirmar ajustes de proteção.

Os resultados apresentados neste trabalho ressaltam a importância de avaliar o impacto da inclusão de novos circuitos no sistema interligado nacional.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Resende, J.W., Harmônicos em Redes Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2010.
- (2) D’Ajuz, A. et al., Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão. Furnas Centrais Elétricas S.A., 1987.
- (3) Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificações das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão – Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.
- (4) Submódulo 25.6 – Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica – frequência e tensão. Operador Nacional do Sistema Elétrico.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Gracita Batista Rosas** é graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com Especialização em Proteção de Sistemas pela Universidade Federal de Itajubá, mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Paraná – UFPR e desde 2017 é aluna de Doutorado em Engenharia Elétrica da UFPR. Atualmente participa da Equipe de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Sistemas de Transmissão, da divisão de Planejamento e Estudos Elétricos da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

**Pablo Mourente Miguel** é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, com mestrado e doutorado pela COPPE/UFRJ. Atualmente é engenheiro consultor na empresa TgDelta Engenharia e Consultoria Ltda – Rio de Janeiro.

**Marcelo Gonçalves** é Engenheiro Eletricista com formação em Sistema de Potência, graduado pela Universidade Federal Fluminense – UFF. Atualmente trabalha na Empresa Jordão Engenharia, sendo responsável pela área de estudos elétricos envolvendo fenômenos de transitórios eletromagnéticos. Tem conhecimento em Fluxo de Potência – ANAREDE, Curto-Circuito – ANAFAS, ATP-EMTP – Transitórios Eletromagnéticos.

**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.

**Hélio Pessoa de Oliveira Júnior** é graduado e pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente é engenheiro eletricista do Operador Nacional do Sistema – ONS, responsável por estudos de engenharia, dimensionamento e aquisição de equipamentos para o planejamento de longo e médio prazo, como também estudos pré-operacionais e de recomposição de sistemas, além de participar de assuntos de regulamentação setorial, da elaboração de Anexos Técnicos para Editais de Leilões de Transmissão e do acompanhamento de projeto das transmissões em corrente contínua dos complexos do Madeira e Belo Monte.

**Miguel Armindo Saldanha Mikilita** é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com Especialização em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Itajubá e mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Paraná – UFPR. Atualmente participa da Equipe de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Sistemas de Transmissão, da divisão de Planejamento e Estudos Elétricos da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

**Jeferson Shimomura** é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Possui vasta experiência em projetos eletromecânicos, elétricos, civis e de subestações em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Possui experiência também em instruções técnicas operacionais relacionadas a implantação de subestações no âmbito destes sistemas. Atualmente gerencia o Departamento de Engenharia de Subestações da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.