



## GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

### ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE DEFEITOS EM REATORES DE NEUTRO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500KV

**LORA GALEANO MACHADO (1); THIAGO TREZZA BORGES (2); VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA(1)  
JORDÃO ENERGIA (1); UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (2)**

#### RESUMO

Os reatores de neutro são utilizados, juntamente com os reatores shunt, em sistemas de transmissão com linhas mais extensas e são solicitados, principalmente, em situações de defeitos fase-terra, visando reduzir a amplitude da corrente de arco secundário que surge após os dois extremos da fase defeituosa serem abertos, além de reduzir a sobretensão em condições de ressonância. Os para-raios dos reatores de neutro são equipamentos fundamentais para a proteção destes reatores contra surtos de sobretensão. Esse trabalho apresenta a análise da ocorrência do problema associado à queima desses equipamentos, através do programa ATP, visto a importância dos mesmos ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

#### PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Reatores de Neutro, Para-Raios, Reatores Shunt, Transitórios Eletromagnéticos.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento tecnológico, industrial e comercial no Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) se faz cada vez mais importante, visto que o mesmo realiza a interligação entre as unidades geradoras e consumidoras de todo país, possibilitando o fornecimento de energia nas diversas regiões. O SIN é composto por longas linhas de transmissão de alta, extra alta e ultra alta tensão, que transportam energia elétrica gerada nas usinas até as subestações locais para distribuição ao consumidor.

As linhas de transmissão mais extensas (200 km ou mais) apresentam elevado acoplamento capacitivo entre fases e entre fase e terra, acarretando um significativo aumento da tensão na linha em duas situações principais: a primeira é quando há rejeição de carga (chaveamento), e a segunda é em condição de carga leve, ou seja, em baixa demanda por parte dos consumidores [1]. Para minimizar alguns fatores indesejados da utilização dessas linhas de transmissão e propiciar ao sistema um melhor funcionamento, utiliza-se banco de reatores em paralelo (ou shunt) buscando o controle de tensão através da absorção de reativos. Entretanto, a compensação shunt pode contribuir para a ocorrência de ressonância na própria linha de transmissão, seja entre seus circuitos ou até mesmo entre linhas que correm em paralelo e que dividem a mesma faixa de passagem.

Ainda, no Sistema Elétrico de Potência (SEP), estatisticamente, as faltas de natureza temporária e monofásica para terra ocorrem com maior frequência, podendo impactar na qualidade do fornecimento de energia se a fase defeituosa não for isolada e religada no momento adequado. Com isso, o religamento monopolar se torna uma manobra vantajosa, uma vez que não é interrompido totalmente o fornecimento de energia, além de ser justificada pela natureza do defeito a ser resolvido.

Dessa maneira, para aumento da confiabilidade e otimização de um determinado tronco de transmissão de energia, os reatores shunt podem ser acompanhados de reatores de neutro. Os mesmos têm por função, reduzir a amplitude da corrente de arco secundário em casos de defeitos que envolvam fase-terra. Essa funcionalidade é de grande relevância, visto que, após a abertura dos extremos da fase com defeito, as fases sãs, por meio de indução, fazem com que surja a denominada corrente de arco secundário, e para que seja realizado o religamento monofásico, é necessário que essa corrente seja extinta e a tensão pós arco seja pequena, uma vez que, após a extinção do arco, o ar próximo da região com defeito continua ionizado e, caso a tensão nesse local seja muito elevada, pode ocorrer a retomada do arco secundário.

Ademais, outra funcionalidade de extrema importância dos reatores de neutro, é realizar a redução da sobretensão que pode ocorrer em situações de ressonância à frequência fundamental. Dessa maneira, os reatores de neutro conseguem deslocar o pico de tensão para outra faixa de frequência, distante da faixa de operação da frequência de 60Hz, normalizando as condições da rede.

É necessário, também, a garantia da suportabilidade dos equipamentos associados ao reator de neutro, certificando sua devida proteção contra situações adversas de surtos que possam ocorrer no sistema de transmissão. Com isso, os para-raios conectados aos reatores devem ser corretamente dimensionados, evitando contratempos indesejados e o comprometendo do pleno funcionamento dos reatores.

Há alguns anos vem surgindo situações diversas de avarias em reatores de neutro, e em seus para-raios, presentes em compensação shunt de linhas de transmissão de algumas concessionárias, sobretudo durante ocorrência de fenômenos transitórios eletromagnéticos que estão associados às manobras realizadas nas linhas, e que ocasionam desequilíbrios de tensão entre fases, comprometendo seu funcionamento efetivo.

Diante dos fatos apresentados, torna-se nítida a necessidade de um estudo aprofundado acerca da atuação dos fenômenos transitórios nos reatores de neutro, da região em questão, para verificação de sua conformidade técnica, bem como de seu para-raios de neutro. O objetivo principal do trabalho é realizar a verificação de conformidade da especificação técnica dos reatores de neutro e dos para-raios dos reatores de neutro, do seguinte conjunto de linhas de transmissão citadas acima. Duas análises são importantes do ponto de vista de especificação do reator de neutro e do para-raios do reator de neutro. São elas: análise da resposta em frequência e análise determinística da manobra de religamento monopolar.

## 2.0 CARATERÍSTICA DE FUNCIONAMENTO DOS REATORES DE NEUTRO

Os reatores shunt são utilizados constantemente no sistema de transmissão, principalmente, em linhas de alta tensão, auxiliando no controle de tensão em regime permanente e na redução das sobretensões de manobra [2]., pois o mesmo tem a função de compensar o aumento do acoplamento capacitivo entre fases através da absorção dos reativos excedentes em determinadas situações, como, por exemplo, em casos de energização de novas linhas de transmissão ou em cenários de carga leve onde não há uma grande demanda por parte dos consumidores.

Essas linhas de transmissão compensadas por reatores shunt podem sofrer com a ocorrência de ressonância entre seus próprios circuitos (em caso de LT com circuito duplo ou mais), ou com outras linhas de transmissão que estejam correndo em paralelo no mesmo trecho. Nessa condição, surgem tensões elevadas que podem acarretar na dificuldade de extinção do arco secundário, e também, no atraso do decaimento da carga residual na linha, inviabilizando as manobras de religamento monopolar e tripolar, e podendo aumentar a tensão de restabelecimento transitório, aplicada aos disjuntores, durante a manobra de eliminação de uma falta [3].

A corrente de arco secundário se deve, principalmente, ao acoplamento eletromagnético entre fases do sistema e surge por indução entre as fases sãs do circuito após a abertura de um dos polos dos disjuntores nas extremidades da fase sob defeito. Ademais, no sistema de transmissão, é predominante a ocorrência de faltas do tipo monofásica para terra, sendo necessária a realização de manobras de religamento monopolar que, para serem efetuadas, é preciso assegurar a extinção do arco secundário.

Sendo assim, os reatores de neutro são combinados aos reatores shunt devido ao fato de que, o reator de neutro tem a capacidade de limitar a amplitude da corrente de arco secundário remanescente após a abertura dos extremos da fase defeituosa em casos de curto monofásico para terra [4]. Além de ser capaz de reduzir a sobretensão que é induzida entre fases em situações de ressonância para valores menores que 40% da tensão para os casos que não apresentam o reator de neutro, minimizando efeitos indesejados no sistema de transmissão de energia, e tornando o SEP mais confiável.

Para cada linha de transmissão deve ser analisada a necessidade de incorporação do reator de neutro, devendo ser realizados estudos de religamento monopolar, considerando a frequência da rede de 56Hz à 66Hz [5]. Detectada a necessidade, o isolamento de neutro do reator shunt deve ser dimensionado considerando o equipamento.

Para o funcionamento adequado e otimizado do reator de neutro, deve-se escolher de maneira apropriada o valor de sua reatância, buscando a extinção da corrente de arco secundário mais rapidamente, bem como a redução da sobretensão induzida em condições de ressonância [1].

Em teoria, para uma LT com circuito simples, o valor a ser utilizado é dado por:

$$X_n = \frac{B1 - B0}{3TB1[B0 - (T - 1)B1]} \quad (1)$$

Onde,

B1 – Susceptância de sequência positiva da linha de transmissão;

B0 – Susceptância de sequência zero da linha de transmissão;

T – Grau de compensação shunt;

Xn– Reatância do reator de neutro.

Em casos de linhas de transmissão com circuito duplo, a indutância do reator de neutro,  $L_n$ , é representada pela equação a seguir:

$$\frac{L_n}{L_1} = \left[ \frac{1}{3} \right] \frac{K}{\frac{1}{\omega^2 C L_1} - K} \quad (2)$$

Onde,

$$C = C_1 + C_m \quad (3)$$

$$R = \frac{C - C_0}{C} \quad (4)$$

$C_1$  – Capacitância de sequência positiva da linha de transmissão;

$C_0$  – Capacitância de sequência zero da linha de transmissão;

$C_m$  – Capacitância mútua entre os circuitos;

$K$  – Grau de acoplamento entre os circuitos;

$L_1$  – Indutância de sequência positiva da linha de transmissão.

Nota-se, então, que o ajuste do reator de neutro está relacionado com o grau de compensação do reator shunt da linha de transmissão. Ou seja, se a indutância do reator de neutro é controlável, e, então, conseguimos calculá-la através das equações apresentadas. A Figura 1 mostra a curva de variação da indutância de neutro em relação ao grau de compensação shunt.

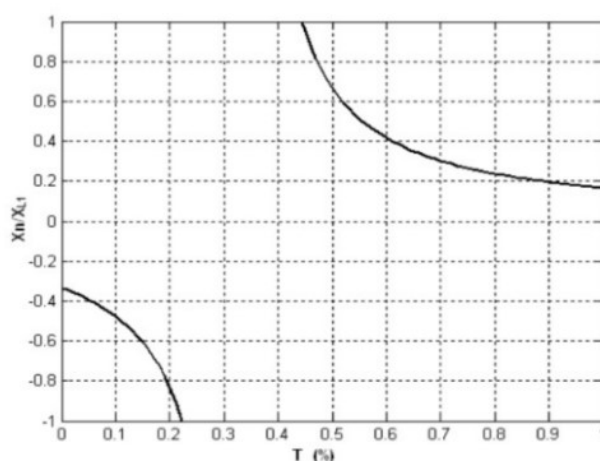


Figura 1 – Curva de variação da indutância de neutro em relação ao grau de compensação shunt.

Considerando  $X_n$  a indutância de neutro e  $X_{L1}$  indutância de sequência positiva do reator shunt, e, analisando a Figura 1, temos que, somente quando o grau de compensação ( $T$ ) é maior que  $1/3$  que a indutância de neutro poderá ser ajustada e atuar de forma efetiva. Quando  $T$  é igual a  $1/3$ , significa o ponto de neutro do reator shunt está desconectado. Já, para o valor de  $T$  menor do que  $1/3$ ,  $X_n$  passaria a ter características capacitivas, o que não é desejado [4].

Entretanto, a partir das considerações feitas, percebe-se que, quando a indutância de neutro é controlável, a faixa de regulação de tensão do banco de reatores shunt é limitada. Com isso, seu valor é geralmente determinado de acordo com o máximo grau de compensação do reator de derivação, e não precisa ser ajustado de forma controlável [4]. Assim, consegue-se otimizar as características de funcionamento do reator de neutro juntamente ao banco de reatores em derivação conectado na linha de transmissão.

## 2.1 REDUÇÃO DA SOBRETENSÃO INDUZIDA EM CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA

Quando o terminal de neutro dos reatores, que estão conectados em paralelo com as linhas de transmissão, é ligado diretamente à terra, pode ocorrer fenômenos atrelados à frequência de ressonância em situações, por exemplo, em que a LT é retirada de operação, ou quando é executado o religamento monopolar após uma de suas fases ser aberta devido a uma falta fase-terra.

Condições de ressonância se estabelecem quando um determinado circuito que possui reatâncias capacitivas e indutivas lineares é excitado a uma tensão com frequência igual à frequência natural [6]. Ou seja, para uma linha de transmissão que possui compensação em derivação, no momento que os parâmetros do reator shunt são combinados aos da capacitância da LT levemente carregada, a corrente do circuito passa a ser limitada apenas pela resistência presente no mesmo. Porém, como esse valor de resistência é muito pequeno em vista das reatâncias, este faz com que a corrente atinja níveis mais altos, causando o efeito de tensões elevadas através dos reatores nessas circunstâncias.

A Figura 2 mostra curva de um circuito linear e o momento em que ele passa pela condição de ressonância. Considera-se, para análise a seguinte equação de corrente:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (5)$$

Onde,

$X_L$  – Reatância indutiva do reator shunt da linha de transmissão;

$X_C$  – Reatância capacitiva da linha de transmissão;

$R$  – Resistência da linha de transmissão;

$I$  – Corrente que flui através linha de transmissão;

$E$  – Tensão na linha de transmissão.

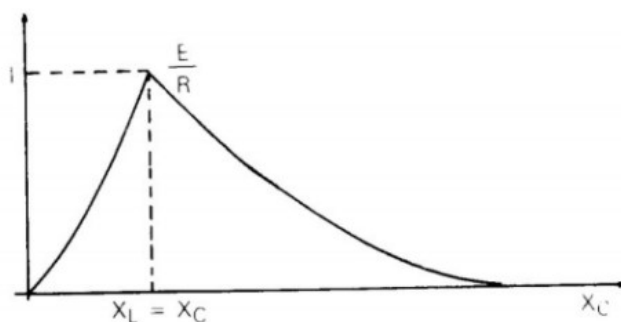


Figura 2– Gráfico de Corrente versus Impedância de um circuito linear em condição de ressonância

Na situação em que uma das fases do circuito foi submetida a um curto-circuito monofásico-terra, é possível que surja uma sobretensão induzida na fase defeituosa que está isolada, visto que há uma interação entre a capacitância desta com as demais fases que se encontram normalizadas. A Figura 3 ilustra uma situação em que um circuito típico do sistema de potência, compensado por banco de reatores em derivação, apresenta duas fases em operação, enquanto uma delas está aberta sob atuação de defeito monofásico.

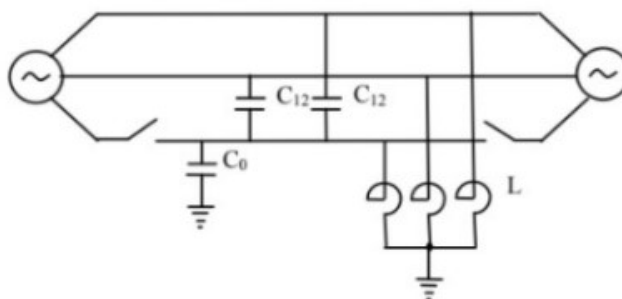


Figura 3 – Linha de Transmissão com compensação shunt e aplicação de defeito monofásico.

No sistema apresentado, considera-se  $C_0$  a capacitância fase-terra da linha de transmissão, e  $C_{12}$  a capacitância entre as fases. Foi denotado como  $L$  o banco de reatores em paralelo com a linha e diretamente aterrado (sem o reator de neutro). Supondo que  $X_{L0}$  e  $X_{L1}$  são as componentes de sequência zero e positiva do reator shunt, respectivamente, e  $\omega = 2\pi f$  (sendo  $f = 60\text{Hz}$ ), então conseguimos obter a condição de surgimento da frequência de ressonância no caso de falta fase-terra, ocasionando a sobretensão induzida na fase sob defeito. São desenvolvidas as relações a seguir.

$$3\omega(2C_{12} + C_0) = \frac{2}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L0}} \quad (6)$$

Considerando que, em linhas de transmissão de alta tensão, usualmente são conectados 3 reatores monofásicos em paralelo, um em cada fase do circuito, então temos  $X_{L1} = X_{L0}$ , já que  $X_{L0} = X_{L1} + 3X_n$  e  $X_n = 0$ , a equação (6) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\omega(2C_{12} + C_0) = \frac{1}{X_{L1}} \quad (7)$$

$$X_{L1} = \frac{1}{\omega(2C_{12} + C_0)} \quad (8)$$

$$X_{L1} = X_c \quad (9)$$

Contudo, para que se consiga reduzir o efeito de ressonância e mitigar a sobretensão causada por esse fenômeno, deve-se ter uma relação em que a reatância de sequência zero deve ser maior que a reatância de sequência positiva ( $X_{L1} < X_{L0}$ ), o que é impossível para um grupo de três reatores monofásicos conectados em cada fase do circuito, como já comentado.

Para alcançar a relação desejada, a indutância  $X_n$  é inserida no ponto neutro do reator de shunt para terra, desempenhando o seguinte papel para o alcance da inequação desejada:

$$X_{L0} = X_{L1} + 3X_n \quad (10)$$

Dessa forma, consegue-se atender ao requisito solicitado, uma vez que  $X_n$  é, agora, diferente de zero.

A indutância de neutro tem a capacidade de interromper a interação entre as fases que provoca a aparição da frequência de ressonância, impossibilitando o aumento da tensão na frequência natural do sistema.

## 2.2 REDUÇÃO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

Em caso de falta monofásica terra nos sistemas de transmissão AT, EAT e UAT; é realizado o religamento monopolar para melhorar a estabilidade da operação do sistema, aumentando a confiabilidade do mesmo [4]. Entretanto, a corrente de arco secundário e a tensão de restabelecimento (pós-arco) que surgem, nesses casos, são altas, e difíceis de serem extintas, causando problemas para a execução do religamento monopolar.

A corrente de arco secundário é a corrente induzida que flui pelo ponto de falta. Ela é causada pela interação da capacitância entre as fases em operação e a fase sob defeito, além da indutância mútua entre estas. Dessa forma, a corrente de arco secundário é constituída por duas parcelas, sendo a componente capacitiva que possui o papel principal na maior parte das situações em que não existe a compensação; e a outra é fornecida pelo surgimento de uma força eletromotriz causada pela corrente que passa através da indutância mútua.

A Figura 4 ilustra a interação entre as componentes capacitiva e indutiva das fases sãs com a fase sob defeito.

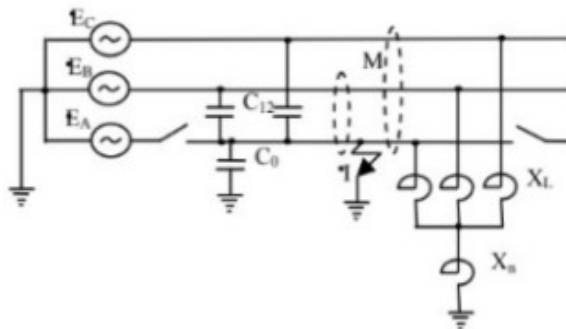


Figura 4 – Interação da capacitância entre fases e indutância mútua no circuito equivalente após a abertura da fase defeituosa.

A tensão de restabelecimento surge após a extinção do arco secundário, e, se não for devidamente atenuada, pode resultar na formação da corrente de arco secundário novamente, pois o ar no local ainda se encontra ionizado. Sendo assim, deve-se garantir a redução da corrente de arco secundário e da tensão pós-arco para que o religamento monopolar seja efetuado com sucesso. Utiliza-se então, o reator de neutro  $X_n$  representado na Figura 4.

Para o cenário da linha de transmissão com banco de reator shunt sem o uso do reator de neutro, torna-se difícil a compensação total da capacitância entre as fases da linha. Entretanto, ao incluir o reator de neutro, com o valor dimensionado de forma adequada, no ponto de conexão do reator em derivação com a terra, este consegue compensar de maneira completa a parcela da corrente de arco secundário que se dá através capacitância fase-fase da linha. Como essa parcela é a mais significativa, e para esta é alcançado um valor próximo de zero, pode-se, facilmente, extinguir a corrente de arco secundário e reduzir a tensão pós arco, garantindo a confiabilidade do religamento monopolar.

### 3.0 SIMULAÇÕES

#### 3.1 MODELAGEM DO SISTEMA

Desde o final de 2013 vem ocorrendo diversas avarias nos reatores de neutro presentes no trecho em que estão compreendidas as subestações de 500/230kV Cuiabá e Ribeirãozinho e, 500kV Rio Verde Norte e Marimbondó 2, sobretudo durante ocorrência de fenômenos transitórios que ocasionam desequilíbrios de tensão entre fases. O estudo de caso desenvolvido busca avaliar a conformidade técnica dos reatores de neutro e dos para-raios dos reatores de neutro, presentes nas linhas de transmissão especificadas, além de propor uma solução para a situação.

A rede elétrica equivalente foi definida para atender aos estudos realizados nas: LT 500 kV Cuiabá – Ribeirãozinho, LT 500 kV Ribeirãozinho – Rio Verde Norte e LT 500 kV Rio Verde Norte – Marimbondó 2. As barras das subestações (SE) 500/230kV Cuiabá e Ribeirãozinho, e 500kV Rio Verde Norte e Marimbondó 2 são os pontos de partida para definir a rede elétrica equivalente que é usada como base para desenvolvimento das análises.

Os procedimentos de rede do ONS [7] classificam essas subestações, que fazem parte da região que será estudada, como “Barras Zero”, e a partir delas o sistema da rede elétrica equivalente precisa atender, no mínimo, duas barras além dessa região onde se localizam as Barras Zero. Esse é um critério que busca dar uma orientação básica quanto à definição da rede que será retida, e ao aplicá-la, é necessário analisar outros conceitos importantes nos estudos dos fenômenos eletromagnéticos.

Um conceito importante, nesse sentido, é a distância elétrica entre uma barra e outra. Distanciar duas barras além da região de estudo pode implicar, em alguns casos, em estar limitando a rede equivalente a uma região eletricamente curta. Dito isso, considera-se uma distância elétrica adequada na representação dos fenômenos transitórios, um raio aproximado de 500 km a partir da região que será estudada.

A Figura 7 apresenta, de forma simplificada, o diagrama unifilar da rede elétrica equivalente, destacando a região de estudo, ou seja, as Barras Zero. A rede elétrica equivalente foi desenvolvida no programa ANAFAS e representada no ATP.

Além disso, para a execução das simulações, foi ajustado o fluxo de potência no ATP, de acordo com o caso em que é considerado o patamar de carga leve do programa ANAREDE, que seria o pior cenário para estudos de transitórios, tendo em vista essa configuração conta com um menor número de máquinas geradoras despachadas, o que implica em um menor nível de curto-circuito a montante da manobra.

#### 3.2 DADOS DOS EQUIPAMENTOS

Determinados equipamentos, no programa ATP, foram modelados de acordo com seus dados de placa disponibilizados pelo fabricante devido a necessidade da fiel reprodução dos acontecimentos em campo que possam estar ocasionando o problema estudado.

Sendo assim, foram detalhadamente modelados, para as simulações os seguintes equipamentos: reatores de linha de transmissão e de barra das subestações e linhas presentes no trecho de interesse, bem como seus respectivos para-raios; e, analogamente, os reatores de neutro junto aos seus para-raios, cujos são os objetos de estudo deste trabalho.

#### 3.3 MANOBRA DE RELIGAMENTO MONOPOLAR

Para as análises necessárias neste trabalho são desenvolvidos estudos de transitórios eletromagnéticos de ressonância por indução em situações de utilização de religamento monopolar e entre linhas paralelas [14] para as linhas de transmissão com compensação por reatores em derivação correspondentes ao trecho que engloba a SE 500 kV Cuiabá, SE 500 kV Ribeirãozinho, SE 500 kV Rio Verde Norte e SE 500 kV Marimbondó 2.

São realizadas duas análises detalhadas dentro da manobra de religamento monopolar, para a validação da conformidade técnica dos reatores de neutro e de seus para-raios.

A primeira é chamada análise determinística, onde são simulados os casos mais críticos no ATP, separadamente, para cada trecho estabelecido nos parágrafos anteriores, considerando a manobra de religamento monopolar realizada em cada terminal da linha de transmissão correspondente ao caso, de maneira a monitorar as tensões nos terminais das subestações manobradas (sobretensões transitórias), tensões nos terminais dos reatores de neutro, bem como a máxima energia dissipada pelos para-raios da linha e pelos para-raios dos reatores de neutro.

A segunda análise é de resposta em frequência onde é feito um estudo para verificação da sobretensão induzida na fase aberta (sob defeito) e nas fases sãs, dentro da faixa operativa da rede, de 56 Hz a 66 Hz, com finalidade de localizar possíveis situações de ressonância [3].

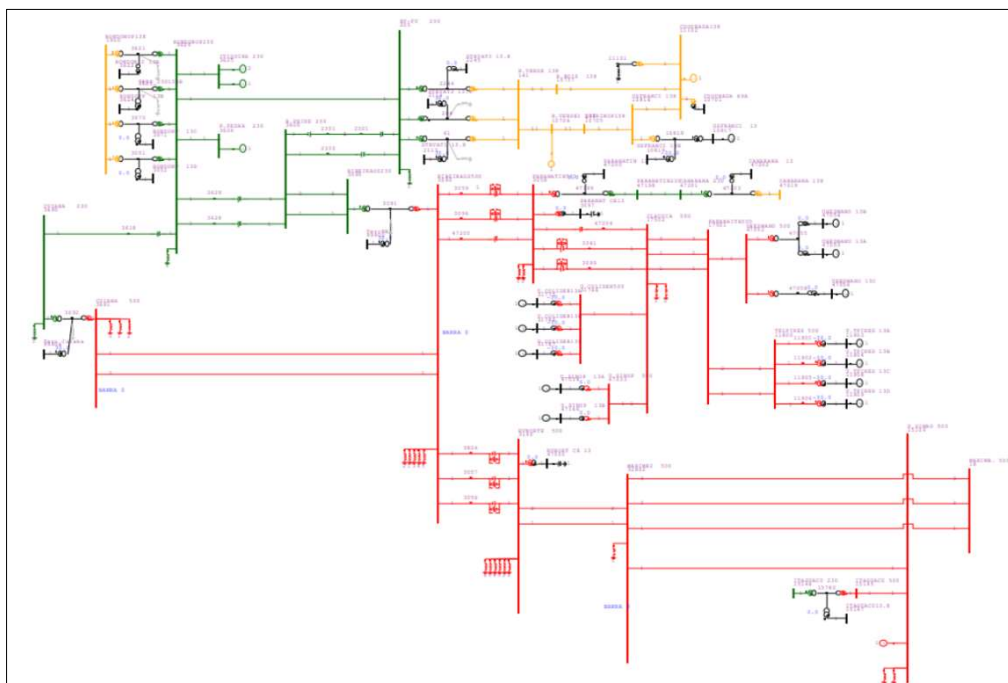


Figura 5 – Diagrama unifilar de parte da rede equivalente no ANAFAS

### 3.4 ANÁLISE DETERMINÍSTICA

A análise determinística foi realizada no domínio do tempo, estabelecido nas configurações do ATP, e seguindo a sequência de eventos relacionada abaixo:

1. É aplicada a falta monofásica em 35 ms;
2. O disjuntor mais próximo da subestação onde a falta foi aplicada faz a identificação da ocorrência e abre, nesse terminal, a fase sob defeito após 60 ms do evento anterior;
3. Esse disjuntor envia um comando para o disjuntor mais próximo do extremo do outro terminal da linha de transmissão para que este também seja aberto. Isso ocorre após 15 ms do evento 2.
4. Considera-se a extinção do arco secundário com sucesso em, aproximadamente, 70 ms (4 ciclos) após a abertura dos dois terminais da linha;
5. Considera-se o acréscimo do tempo morto (pós-arco) de 1 s para iniciar, então, o religamento monopolar. Além disso, considerou-se o tempo de simulação de 1,3s e o passo de integração de 3 $\mu$ s.

Para o trecho da LT 500 kV Cuiabá – Ribeirãozinho, com a manobra de religamento monopolar sendo realizada tanto no terminal de Cuiabá quanto no terminal de Ribeirãozinho, o caso apresentado, sendo esse o mais crítico, ocorreu com a aplicação do defeito na fase C do circuito 2, próximo do terminal de Ribeirãozinho.

Para o trecho da LT 500 kV Ribeirãozinho – Rio Verde Norte, com a manobra de religamento monopolar sendo realizada tanto no terminal de Ribeirãozinho quanto no terminal de Rio Verde Norte, o caso apresentado, sendo esse o mais crítico, ocorreu com a aplicação do defeito na fase A do circuito 3, próximo do terminal de Rio Verde Norte.

Para o trecho da LT 500 kV Rio Verde Norte – Marimbond 2, com a manobra de religamento monopolar sendo realizada tanto no terminal de Rio Verde Norte quanto no terminal de Marimbond 2, o caso apresentado, sendo esse o mais crítico, ocorreu com a aplicação do defeito na fase A do circuito 2, próximo do terminal de Rio Verde Norte.

### 3.5 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Essa análise foi realizada no domínio da frequência, estabelecida nas configurações do ATP, para a faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz como mencionado anteriormente no item 3.3.



As simulações apresentam as variações de tensão nos terminais das subestações dos trechos avaliados no estudo, em um intervalo de frequência determinado, supondo uma fase do circuito aberta, buscando avaliar se há sobretensão devido à condição de ressonância na frequência fundamental de operação do sistema.

Sendo assim, são monitoradas as tensões nos terminais das linhas para verificar se ocorrem picos de tensão acima dos valores da tensão admissível de operação para linhas de transmissão de 500 kV que, de acordo com o ONS [3], corresponde à 550 kV (1,1 pu). A variação da frequência utilizada para coleta de dados de tensão foi de  $\Delta f = 1$  dentro do espectro de frequência determinado.

#### 4.0 ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Através dos resultados extraídos das simulações determinísticas para execução da manobra de religamento monopolar, consegue-se observar as máximas tensões nos terminais das subestações e nos reatores de neutro, além das máximas energias dissipadas nos para-raios de linha e dos para-raios de neutro.

Esses dados são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Terminal de Manobra	Terminal Monitorado	Tensão máxima (kV pico)	Energia Dissipada nos Para-Raios da Linha (kJ)	Tensão máxima nos Reatores de Neutro (kV pico)	Energia Dissipada nos Para-Raios de Neutro (kJ)	Status dos Para-raios de neutro
Cuiabá 500 kV	Cuiabá	552,82	0,304	126,1	168,3	Não Superado
	Ribeirãozinho	730,29	24,64	112,5	1219,4	Superado
Ribeirãozinho 500 kV	Cuiabá	777,50	274,7	125,7	150,1	Não Superado
	Ribeirãozinho	637,01	1,422	112,5	1125,7	Superado
Ribeirãozinho 500 kV	Ribeirãozinho	532,30	0,313	118,5	8,129	Não Superado
	Rio Verde Norte	722,04	80,35	97,17	544,3	Superado
Rio Verde Norte 500 kV	Ribeirãozinho	756,24	135,3	120,0	5,416	Não Superado
	Rio Verde Norte	593,80	1,275	97,16	479,9	Superado
Rio Verde Norte 500 kV	Rio Verde Norte	666,15	2,031	103,0	3575,2	Superado
	Marimondo 2	736,43	40,04	124,6	51,41	Não Superado
Marimondo 2 500 kV	Rio Verde Norte	758,71	113,6	103,0	3804,1	Superado
	Marimondo 2	480,84	0,267	125,0	59,62	Não Superado

Tabela 1 – Tensão e energia dissipada nos para-raios nos terminais das subestações estudadas.

Nota-se que os para-raios dos reatores de neutro estão subdimensionados para a maioria dos casos em Ribeirãozinho e Rio Verde Norte, ou seja, os valores de máxima suportabilidade de energia dissipada nos para-raios dos reatores de neutro, próximos dos terminais dessas subestações, estão sendo superados, uma vez que seus valores máximos de capacidade são, respectivamente, 576 kJ e 480 kJ.

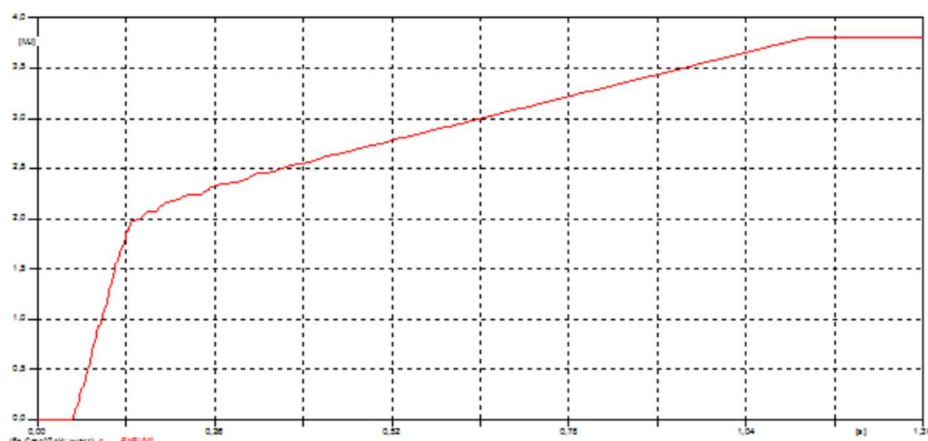


Figura 6 – Energia dissipada nos para-raios dos reatores de neutro de RV Norte C2 - Religamento pelo terminal de Marimondo 2

Ressalta-se ainda que os dados de tensão máxima nos terminais das respectivas linhas de transmissão apresentam altos valores, entretanto os mesmos se encontram dentro do esperado para uma manobra de religamento monopolar, cujos valores podem chegar à, aproximadamente, 2 pu.

Os para-raios utilizados nas linhas de transmissão estão atendendo a necessidade do caso, pois as máximas energias dissipadas em todas as simulações apresentadas, não superam suas capacidades máximas, que, para os três trechos avaliados é de 5460 kJ.

Além disso, a máxima tensão admitida nos terminais dos reatores de neutro, de 140 kV, estão de acordo com os valores obtidos nos resultados apresentados neste capítulo, não superando sua capacidade. Observa-se apenas

que os valores de tensão nos reatores de neutro da Tabela 1 são dados em pico, ou seja, deve-se dividi-los por  $\sqrt{2}$  para obtenção dos valores de tensão eficaz.

Já para as simulações de resposta em frequência, é avaliado se há o surgimento de sobretensões (acima da tensão de operação do sistema de 500 kV) nas fases sãs e na fase sob defeito. Através dos resultados apresentados é entendido que não há ocorrência de picos de tensão em nenhum dos terminais das linhas de transmissão analisadas para a faixa de frequência de operação da rede. Ou seja, os reatores de neutro estão dimensionados de maneira adequada, atuando de forma a distanciar da frequência operacional do sistema possíveis situações que provoquem condições de ressonância na rede e, consequentemente, evitando o surgimento de sobretensões nessa faixa.

Então conclui-se que os reatores de neutro estão bem dimensionados e desempenhando seu papel adequadamente. Entretanto, os para-raios dos reatores de neutro se encontram subdimensionados, não sendo ideal para utilização em tais equipamentos das linhas de transmissão em que estão instalados, pois os mesmos estão sendo superados em relação à máxima energia dissipada.

## 5.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] K.S, Meera; BHURAT, Puneeth. Research on Operating Characteristic and Controllability of the Neutral Inductance of Shunt Reactor. IEEE, Singapura: IEEE, 2016.
- [2] IEEE, Power Engineering Society. Guide for the Protection of Shunt Reactors. New York: Power System Relaying Committee, 2006. 29 p.
- [3] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão: Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão. Rio de Janeiro: ONS, 2013. 230p.
- [4] CHEN, Baichao; XEN, Yan. Neutral Grounding Reactors For Shunt Compensated EHV Transmission Lines. IEEE, Chengdu: IEEE, 2009.
- [5] FRONTIN, Sérgio O. Equipamentos de Alta Tensão: Prospeção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. Brasília: Goya Editora LTDA., 2013. 934p.
- [6] D'AJUZ, Ary. Transitórios elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro: FURNAS e EDUFF, 1987. 300 p.
- [7] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos. Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3. Rio de Janeiro: ONS, v 2, 2018.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Lora Galeano Machado, brasileira, natural do Rio de Janeiro, 29 anos. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2019) pela Universidade Federal Fluminense (UFF), além de formação técnica (2009) no curso de Eletrônica pelo Centro Federal Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ). Atualmente trabalha como Engenheira Eletricista de Sistemas de Potência na área de Estudos Elétricos na Jordão Energia, com ênfase maior em regime permanente (análises de curto-circuito, fluxo de potência, estabilidade eletromecânica e qualidade de energia elétrica) e coordenação de projetos. Atuação, também, na área de transitórios eletromagnéticos, anteriormente, enquanto estagiária na empresa. Ainda em Estudos Elétricos, foi estagiária em Furnas.

- (2) THIAGO TREZZA BORGES  
 Thiago Trezza Borges nasceu em Belo Horizonte (MG) em 1981. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista em 2003 na Universidade Federal de Juiz de Fora e o Mestrado em 2006 na mesma instituição. Em 2012 recebeu o grau de doutor da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Desde de 2005 trabalha na Petrobras como engenheiro de equipamentos. Desde 2013 também é professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense (UFF). Seus interesses de pesquisa são sistemas elétricos industriais, sistemas de transmissão, subestações e otimização de sistemas elétricos.
- (3) VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA  
 Formado na UFF em 1992, Mestrado em Computação em 2009. Com grande experiência em estudos regime permanente, transitório eletromecânico, transitório eletromagnético, comissionamento, modelagem e ajuste de equipamento de controle, tais como: Reguladores de Tensão, Reguladores de Velocidade, PSS. Grande experiência na modelagem de SVC, HVDC, Usinas Solares e Eólica no ATP e ANATEM. Com participação nos estudos de HVDC

no Brasil. Trabalhou em Furnas de 1993 à 2000 e no ONS de 2000 à 2008. Hoje é sócio da empresa Jordão Energia, empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de P&D.