

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO COM CIRCUITO DUPLO EM REGIME PERMANENTE E NA OCORRÊNCIA DE UMA FALTA MONOFÁSICA

Vinicius C. de Paula, Isaque N. Gondim, Marcelo L. R. Chaves, Leandro P. Moura
Universidade Federal de Uberlândia, Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
vinicius_cp@hotmail.com, gondim.isaque@gmail.com, lynce@ufu.br, leandropm91@gmail.com

Resumo – O presente trabalho apresenta a modelagem computacional de uma linha de transmissão de 230 kV, circuito duplo, que interliga os sistemas elétricos de Vilhena (RO) e Jauru (MA). As formas de onda das tensões e correntes são analisadas ao longo da linha antes, durante e após a ocorrência de uma falta assimétrica, considerando um religamento posterior. O principal objetivo deste estudo é a análise da influência de um circuito sobre o outro durante estas diferentes condições operativas, bem como mensurar os efeitos do religamento dos disjuntores da linha em diferentes instantes de tempo.

Palavras-Chave – Modelagem de Linhas de Transmissão, Circuito Duplo, Tensão Induzida, Falta Assimétricas, Religamento de Linhas de Transmissão.

ANALYSIS OF THE OPERATION OF A HIGH VOLTAGE DOUBLE CIRCUIT TRANSMISSION LINE IN STEADY STATE AND IN THE OCCURRENCE OF A SINGLE-PHASE FAULT

Abstract – This paper presents the computational modeling of a 230 kV double circuit transmission line that interconnects the power systems of Vilhena (RO) and Jauru (MA). The voltages and currents waveforms are analyzed along the line before, during and after asymmetric fault conditions, considering a subsequent reclosing. The aim of this study is the analysis of the influence of a circuit over the other during these conditions, as well as the measuring of the effects of the circuit breakers reclosing at different instants of time.

Keywords – Transmission Lines Modeling, Double Circuit, Induced Voltage, Asymmetric Faults, Transmission Lines Reclosing.

I. INTRODUÇÃO

O consumo *per capita* de energia elétrica está atrelado ao grau de desenvolvimento de um país, dada a sua ligação direta com a produção industrial, bem como com o poder aquisitivo da população que consome cada vez mais energia

elétrica em suas residências [1]. Diante deste cenário, a ampliação da potência disponível no sistema elétrico do país é frequentemente necessária. Entretanto, este aumento de potência, na maioria das vezes, exige investimentos financeiros maciços, visto que a execução de um projeto de uma linha de transmissão capaz de transmitir elevados valores de potência envolve custos elevados com metais para construção das estruturas, cabos condutores isolados de alta tensão, capital humano, dentre outros. Neste contexto, soluções alternativas à ampliação da potência através da construção de novas linhas de transmissão são sempre bem-vindas.

Uma das técnicas comumente utilizadas com esse fim é o emprego de um circuito duplo em linhas já existentes, permitindo um expressivo aumento da potência transmissível. Deste modo, a economia que se obtém ao se adotar esta prática no lugar de se construir um novo conjunto de estruturas pode ser significativa. Na Fig. 1, observa-se o emprego desta técnica, onde cada um dos circuitos é sustentado por um dos lados da torre.

Neste contexto, o objetivo do presente estudo é analisar o comportamento de uma linha de circuito duplo sob diferentes regimes de operação e na ocorrência de distúrbios. Para isto, além da análise em regime permanente, será aplicado um curto monofásico em uma fase de um dos circuitos com o intuito de se observar os efeitos do acoplamento indutivo entre os mesmos. Ainda, será realizada uma análise das tensões na linha logo após um religamento tripolar dos disjuntores sob diferentes condições de chaveamento.

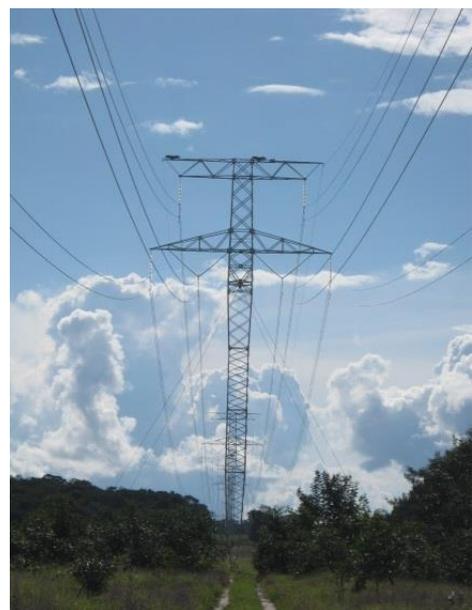


Fig. 1. Trecho da linha de transmissão Vilhena-Jauru, com o emprego de circuito duplo.



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

II. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

Neste estudo, será utilizado o *software* ATP para a modelagem da linha de transmissão conectada a duas subestações (uma em Vilhena e outra em Jauru) que, por sua vez, serão conectadas a fontes de tensão e impedâncias equivalentes ao sistema elétrico nesses pontos. Deste modo, esta seção do trabalho será dividida em três itens, a saber: modelagem da linha de transmissão, modelagem das subestações e modelagem do sistema elétrico equivalente que interconecta a linha ao SIN (Sistema Interligado Nacional).

A. Modelagem da linha de transmissão

A linha de transmissão que interconecta os sistemas elétricos de Vilhena a Jauru é composta por 766 torres distribuídas ao longo de 345,12 quilômetros. Ainda, são encontrados 6 diferentes tipos de estruturas de torres com grande predominância de dois tipos (95,7% da quantidade total de torres). Desta forma, julgou-se razoável modelar as torres considerando apenas estes dois tipos predominantes, presentes no Anexo I. A Fig. A-1 ilustra o tipo mais predominante, JDE3 (89,56%) e a Fig. A-2 ilustra o segundo tipo mais presente, JDS3 (6,4%). As torres do tipo JDE3, além da forte predominância, são distribuídas ao longo de toda a linha. Já as torres JDS3 são encontradas majoritariamente no primeiro quarto da linha (57,14%). Assim, para efeitos de modelagem, decidiu-se utilizar um equivalente para as torres JDS3 encontradas no primeiro quarto de linha e modelar o trecho restante considerando apenas a presença de torres JDE3. Deste modo, os 345,12 km foram divididos em 5 trechos de linha: o primeiro trecho é composto por torres JDS3 e possui 11,78 km e os outros 4 trechos são compostos de torres JDE3 e possuem 83,335 km cada.

O modelo utilizado para a modelagem da linha foi o LCC, onde adotou-se o modelo de Bergeron para linhas aéreas (*Overhead Line*). Foi considerado ainda a presença do efeito pelicular (*skin effect*) e adotou-se a resistividade do solo igual a 1000 Ω .m. Além disso, considerou-se um número de condutores igual a 8, sendo 3 para cada circuito e 2 para os cabos-guarda. Ainda, para cada uma das fases, utilizou-se dois cabos condutores.

Quanto aos cabos utilizados, os condutores das fases possuem resistência CC igual a 0,071918 Ω /km a 20° C, raio interno da alma de aço de 0,299 cm e raio externo de 1,171 cm. Para os cabos-guarda, ou cabos para-raios, utilizou-se cabos de fibra ótica (OPGW) de um lado da linha e um cabo de alumínio com alma de aço (EAR 3/8") do outro. Ainda, do lado que se utilizou os cabos EAR, nos trechos mais próximos das subestações foi utilizado um outro tipo de cabo-guarda (DOTTEREL). Os cabos OPGW possuem resistência CC igual a 0,485 Ω /km a 20° C e raio externo de 6,18 cm, os do tipo EAR possuem resistência CC igual a 0,3221 Ω /km a 20° C, raio interno da alma de aço de 4,08 cm e raio externo de 6,72 cm e os cabos DOTTEREL possuem resistência CC igual a 3,368 Ω /km a 20° C e raio externo de 4,572 cm. Considerou-se também uma flecha média de 20,1 metros para os condutores das fases e de 15 metros para os cabos-guarda.

Foi realizada ainda transposição de fases em 3 pontos da linha: após o primeiro quarto do comprimento total, no meio da linha e antes do último quarto, com o objetivo de atenuar o desequilíbrio entre as indutâncias mútuas dos cabos.

Para o cálculo das resistências de aterramento, calculou-se uma média das mesmas para cada um dos 5 trechos de LCC e conectou-se uma resistência equivalente nos terminais aterrados do modelo LCC.

Apesar do presente estudo não ter como objetivo a análise de descargas atmosféricas, considerou-se a presença de um para-raio por fase nas extremidades da linha, com tensão V_{ref} igual a 380 kV.

B. Modelagem das subestações

De acordo com dados obtidos acerca das subestações, tem-se em cada uma delas e para cada circuito a presença de um reator shunt de 30 MVar e 230 kV (conectado às barras de entrada e saída da linha). Além disso, foram inseridas chaves trifásicas entre duas capacitâncias paralelas shunt (0,05 μ F por fase) imediatamente antes dos reatores, representando respectivamente o disjuntor trifásico que fará a abertura da linha e as capacitâncias de fuga dessa chave para a terra e uma outra chave trifásica com as mesmas capacitâncias de fuga, representando o disjuntor que fará o religamento das linhas.

C. Modelagem do sistema elétrico equivalente

Para a correta especificação das fontes de tensão e impedâncias equivalentes dos sistemas que serão conectadas às barras de entrada das subestações de Vilhena e Jauru, utilizou-se o *software* ANAREDE (Análise de Redes Elétricas).

Primeiramente, para as fontes de tensão, considerou-se os módulos delas iguais a:

$$V_{f-n(pico)} = \frac{230 * 10^3}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} [V] \quad (1)$$

Onde os 230 Kv equivalem à tensão fase-fase nominal eficaz da linha e $V_{F-n(pico)}$ é a tensão fase-neutro de pico igual a 187,794 kV.

Considerando-se a barra de Jauru como referência (ângulo de zero graus), o ângulo da fonte de tensão de Vilhena fornecido pelo ANAREDE foi de 6°.

Para o cálculo das impedâncias equivalentes dos sistemas, consultou-se os valores de carregamento máximo e mínimo referentes ao ano de 2016 fornecidos pelo ANAREDE, que compreende as resistências e reatâncias equivalentes de sequência positiva e sequência zero no ponto desejado. Como os valores das impedâncias de sequência negativa não são disponibilizados (geralmente, estes valores tendem a ser próximos dos valores das impedâncias de sequência positiva), utilizou-se no ATP um modelo representativo de impedância que especifica apenas sequência positiva e zero. Tem-se ainda que a potência base dos valores fornecidos pelo ANAREDE é 100 MVA. Deste modo, para os valores dispostos na Tabela 1, calculou-se a impedância e indutância base para a correta modelagem das impedâncias equivalentes dos sistemas.

Tabela 1. Resistências e Reatâncias percentuais equivalentes de seqüência positiva e negativa nos pontos de Vilhena e Jauru.

	VILHENA		JAURU	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
R1%	10,863	0,86626	0,19512	0,25096
Xd%	10,222	19,258	2,3614	2,8993
R0%	1,4E-6	1,4E-6	3,5E-6	3,2E-6
X0%	0,00999	0,00999	0,00997	0,00997

O sistema completo esquematizado no ATP pode ser visualizado na Figura A-3 do Anexo I.

III. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA LINHA SOB DIFERENTES SITUAÇÕES

A análise da operação da linha de transmissão sob regime permanente e sob condição de falta monofásica, que inclui a atuação de disjuntores, extinção da falta e o posterior religamento das linhas está presente ao longo dos itens a seguir.

A. Análise da operação da linha sob condição de regime permanente

Com o objetivo de analisar a influência de um circuito no outro durante o regime permanente, primeiramente simulou-se um caso para as impedâncias equivalentes máximas do sistema, mantendo o circuito 2 desconectado do mesmo durante todo o período de simulação. Deste modo, só houve fluxo de potência através do circuito 1.

As tensões e correntes de linha eficazes resultantes nas fases A, B e C do circuito 1 em Vilhena, no meio da linha e em Jauru, respectivamente, foram: 234,35 kV e 89,59 A, 234,35 kV e 91,55 A e 234 kV e 94,73 A em Vilhena, 237,64 kV e 81,8 A, 238,50 kV e 83,2 A e 239,54 kV e 75,53 A no meio da linha e 231,57 kV e 101,5 A, 231,57 kV e 95,37 A e 231,57 kV e 92,88 A em Jauru.

As potências ativas transportadas pelas 3 fases foram: na fase A, saem 10,35 MW de Vilhena e chegam 11,28 MW em Jauru; na fase B, saem 11,19 MW de Vilhena e chegam 10,68 MW em Jauru; na fase C, saem 11,52 MW de Vilhena e chegam 10,53 MW em Jauru. Como a potência trifásica fornecida por Vilhena é 0,57 MVA maior que a potência trifásica entregue a Jauru, o incremento de potência ao longo da fase A pode ser justificado por uma transferência de potência das fases B e C para a fase A devido ao acoplamento magnético existente entre as fases. A transposição de fases atenua este fenômeno, mas como elas só foram feitas em três pontos da linha, as indutâncias mútuas entre as fases continuam diferentes entre si. Ainda, de posse dos valores acima, é possível calcular o percentual de perdas por efeito Joule da transmissão que resultou em 1,724%.

No circuito 2, que está desconectado do sistema, as correntes analisadas apresentaram valores nulos, como esperado. As tensões, por sua vez, apresentaram valores elevados, entre 17 kV e 45 kV (valores de linha eficazes). A fase A do circuito 2, que se situa na parte mais “interna” da estrutura da torre apresentou os valores mais baixos de

tensão, entre 17 kV e 18 kV. A fase B, por sua vez, que se situa na parte mais “externa” da torre, apresentou os maiores valores de tensão, entre 44 kV e 46 kV. A fase C apresentou valores mais próximos da fase B, entre 39 kV e 42 kV. Na Fig. 2, pode-se observar o comportamento das tensões no meio da linha no circuito 2. A presença de tensões de valores elevados neste circuito mesmo quando este se encontra desconectado do sistema é justificada devido ao acoplamento magnético existente entre os dois circuitos, uma vez que nesta condição o circuito 1 transmite mais de 30 MVA de potência. Em todas as figuras a seguir, as formas de onda em vermelho pertencem às fases A, as verdes pertencem às fases B e as azuis pertencem às fases C.

Ao energizar o circuito 2, ainda considerando a impedância equivalente máxima, observa-se que as tensões do circuito 1 ao longo da linha aumentaram em cerca de 0,6% a 1,3% em relação às tensões medidas quando apenas o circuito 1 foi energizado. As correntes diminuíram em cerca de 18% a 30%, uma vez que o agora o circuito 2 também contribui com o fluxo de potência ao longo da linha.

A potência trifásica fornecida por Vilhena através do circuito 1, para esta nova situação, é de 23,62 MW e a potência trifásica entregue a Jauru é de 23,171 MW, o que resulta em perdas percentuais ao longo da linha de 1,9%. Pelo circuito 2, Vilhena fornece 23,577 MW e Jauru recebe 23,138 MW, resultando em um valor de perdas percentuais ao longo da linha de 1,862%. A distribuição do fluxo de potência através das três fases continua desigual e a fase A continua “recebendo” potência ativa das outras fases em ambos os circuitos.

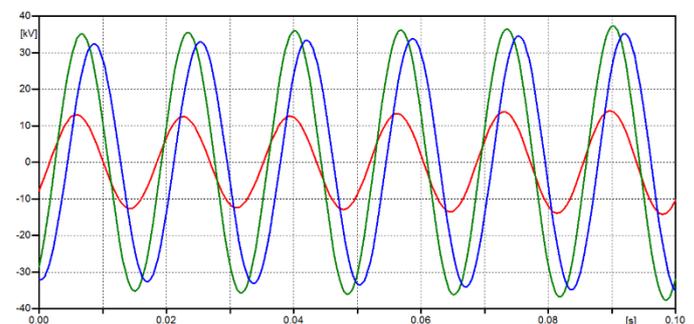


Fig. 2. Tensões fase-neutro no meio da linha para as fases A, B e C do circuito 2, quando este se encontra desconectado do sistema.

Ao se simular o mesmo caso considerando a impedância equivalente mínima com ambos os circuitos energizados, as tensões ao longo da linha aumentaram cerca de 0,6% a 1,4% em relação ao mesmo caso com impedância equivalente máxima. As correntes, por sua vez, diminuíram cerca de 30% nas fases A, cerca de 15% nas fases B e apresentaram pequenas variações nas fases C.

A potência trifásica fornecida por Vilhena através do circuito 1, para este novo caso, foi de 17,344 MW e a entregue em Jauru é de 16,928 MW, resultando em perdas percentuais ao longo da linha de 2,398%. Pelo circuito 2, Vilhena entrega 17,303 MW e Jauru recebe 16,898 MW, resultando em perdas de 2,34%. Aqui, mais uma vez, observou-se que a potência entregue a Jauru através da fase A é maior do que fornecida por Vilhena, enquanto as outras 2 fases, principalmente a fase B, compensam gerando uma potência bem maior que a entregue a Jauru.

B. Análise da operação da linha na ocorrência de uma falta monofásica em condições de religamento críticas e ideais

Para a análise da operação sob falta no circuito 1, considerou-se o caso onde a corrente de falta resultasse no valor mais elevado. Como as impedâncias equivalentes dos sistemas de Vilhena e Jauru são diferentes, bem como as resistências médias de aterramento estimadas foram diferentes ao longo do trecho, simulou-se diferentes casos de curtos nas extremidades da linha e no meio da mesma. O caso onde a corrente de pico resultou no maior valor foi para um curto na fase A na entrada da linha pelo lado de Jauru (valor de pico de 7006,7 A imediatamente após a ocorrência da falta). Na Figura 3, observa-se a magnitude da corrente do curto presente entre 0,1139 s e 0,3 s. Ainda, após a atenuação do nível DC presente no instante inicial do curto, a corrente tende a se estabilizar com valor de pico acima de 6440 A.

Em seguida, de modo a se observar os efeitos do religamento, inicialmente a linha opera em regime permanente nas mesmas condições do item anterior (ambos os circuitos energizados e impedâncias equivalentes máximas do sistema). Na sequência, o curto da Fig. 3 é aplicado na fase A do circuito 1 na entrada da linha pelo lado de Jauru e no tempo igual a 0,2 segundos ocorrem aberturas tripolares dos disjuntores do circuito 1 situados nas duas extremidades da linha. Em 0,3 s o curto é eliminado e após outro intervalo de tempo, a ser explicitado em seguida, ocorrem os religamentos dos dois disjuntores.

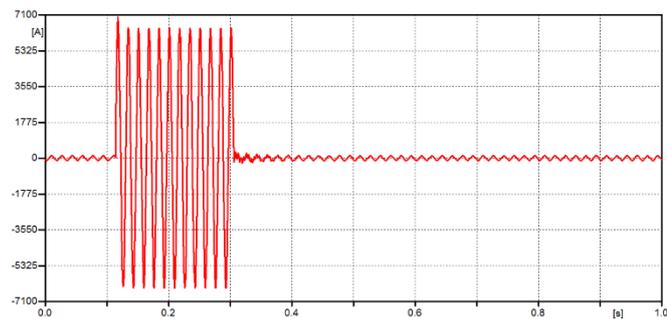


Fig. 3. Corrente na fase A no disjuntor da subestação de Jauru com um curto fase-terra aplicado entre os instantes 0,1139 s e 0,3 s.

No primeiro caso, o religamento ocorrerá em condições críticas, no instante em que a tensão da fase A nas entradas dos disjuntores passar pelo seu valor máximo (no instante 0,5164 s em Vilhena e no instante 0,51648 s em Jauru).

Na Fig. 4, observa-se o efeito do religamento na tensão da fase A na entrada da linha em Vilhena. A tensão fase-neutro de pico positivo durante o primeiro ciclo foi de 299,61 kV e a de pico negativo foi de -333,39 kV. Na Fig. 5 temos a mesma situação após o religamento do disjuntor em Jauru. A tensão fase-neutro de pico positivo durante o primeiro ciclo foi de 208,84 kV e a de pico negativo foi de -247,18 kV. Ressalta-se que a tensão fase-neutro nominal de pico da linha é 187,794 kV.

Na Fig. 6 é possível observar o pico positivo do primeiro ciclo após o religamento em Jauru com maior detalhamento, onde é possível observar o efeito da reflexão de ondas.

No segundo caso, considerou-se condições mais próximas das ideais. Para isto, o religamento dos disjuntores se dará no instante em que as tensões da fase A na entrada dos disjuntores passarem o mais próximo possível de zero. Dadas as condições, o disjuntor em Vilhena será religado no instante 0,70443 s e o

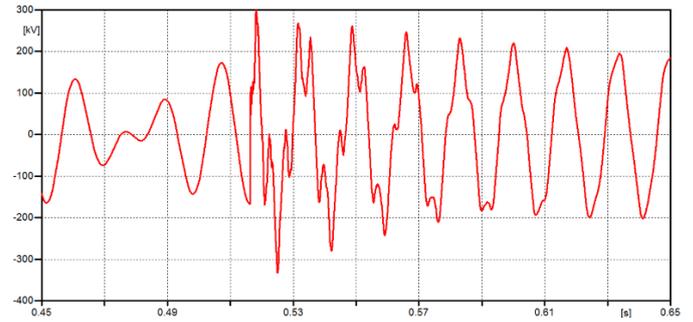


Fig. 4. Tensão fase-neutro na fase A na entrada da linha de Vilhena após o religamento tripolar em condição crítica.

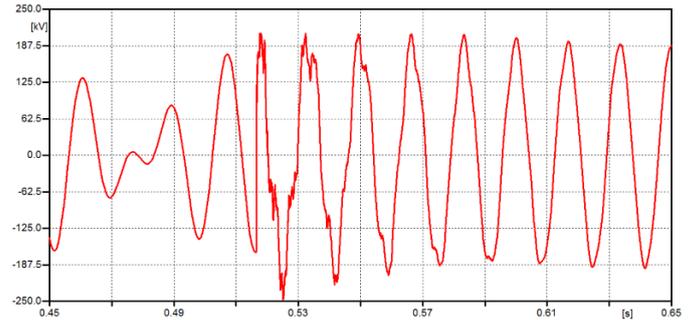


Fig. 5. Tensão fase-neutro na fase A na entrada da linha de Jauru após o religamento tripolar em condição crítica.

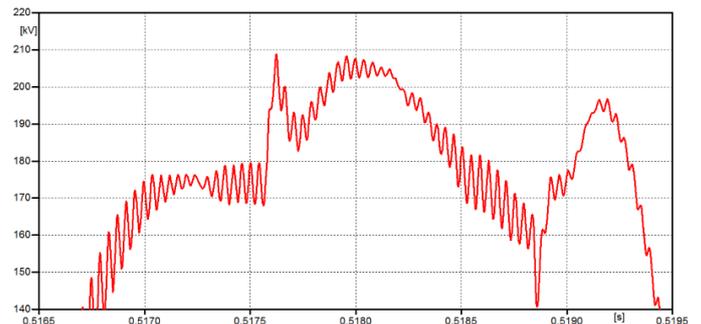


Fig. 6. Pico positivo do primeiro ciclo da tensão fase-neutro na entrada da linha de Jauru logo após o religamento do disjuntor em condição crítica.

disjuntor em Jauru será religado no instante 0,70478 s.

Nas Figs. 7 e 8, observa-se o comportamento da tensão na fase A nas duas extremidades da linha antes e após o religamento dos disjuntores conforme as condições supracitadas. Nota-se que os valores de pico logo após o religamento são bem menores que os do caso anterior. A tensão fase-neutro na entrada da linha em Vilhena alcança um primeiro valor de pico negativo de -214,38 kV e o maior valor de pico positivo, de 216,71 kV, é atingido quase 4 ciclos depois do religamento. A tensão na entrada da linha em Jauru atinge -203,09 kV no primeiro pico negativo e 193,48 kV no primeiro ciclo positivo.

A Tabela 2 facilita a comparação entre as condições de chaveamento críticas (religamento com a tensão da fase A na entrada dos disjuntores passando por seus valores máximos) e as condições de chaveamento ideais (religamento com a tensão da fase A na entrada dos disjuntores igual a zero). Percebe-se uma grande diferença entre os valores de tensão de pico nestas duas condições. Em Vilhena, por exemplo, após o religamento, a tensão na fase A na entrada da linha

em Vilhena atingiu 1,77 p.u. no pico negativo sob condições críticas de chaveamento e 1,14 p.u. no pico negativo sob condições ideais, o que representa um aumento de 55,26%.

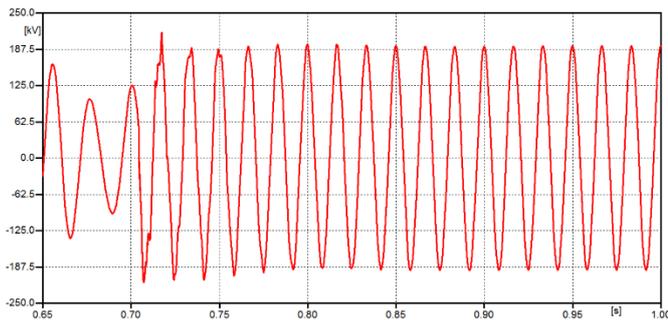


Fig. 7. Tensão fase-neutro na fase A na entrada da linha de Vilhena após o religamento trifásico em condição ideal.

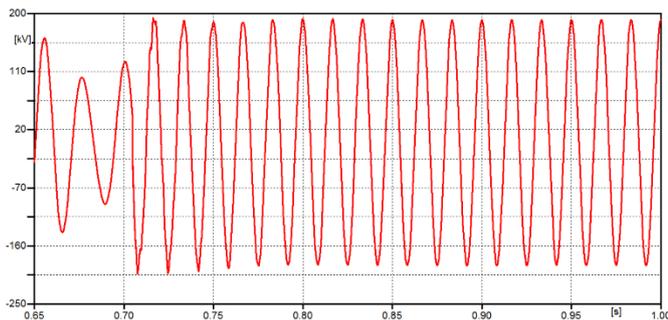


Fig. 8. Tensão fase-neutro na fase A na entrada da linha de Jauru após o religamento trifásico em condição ideal.

Tabela 2. Valores de tensão na fase A nas extremidades da linha em p.u. após o religamento tripolar sob diferentes condições de chaveamento (tensão nominal de 187,794 kV fase-neutro pico).

	Pico Pos. Chav. Crítico	Pico Pos. Chav. Ideal	Pico Neg. Chav. Crítico	Pico Neg. Chav. Ideal
Vilhena	1.595	1.154	1.775	1.141
Jauru	1.112	1.030	1.316	1.081

C. Análise das tensões induzidas em um circuito sobre o outro na ocorrência de distúrbios

Neste item, o comportamento das tensões ao longo do circuito 2 é analisado na ocorrência dos mesmos distúrbios e das mesmas condições de chaveamento no circuito 1 descritas no item anterior. Na Fig. 2, observou-se o perfil das tensões do circuito 2 no meio da linha em regime permanente enquanto este se encontrava desconectado do sistema. Entretanto, estas mesmas tensões podem atingir valores bem mais elevados após a ocorrência da falta monofásica, de modo que, mesmo desconectado do sistema, o circuito 2 apresentou valores de tensão acima de 300 kV, como ilustra a Fig. 9. Com o objetivo de facilitar a visualização das formas de onda, apenas as tensões e correntes na fase A são analisadas nas Figs. 9-11, uma vez que o comportamento das mesmas nas fases B e C é similar.

É importante ressaltar que estes valores elevados de tensão induzida só são atingidos quando os reatores estão presentes, devido à alta capacidade de armazenamento de potência dos mesmos (30 MVar). Ainda, como eles estão aterrados, há um caminho para a circulação de elevadas correntes, como se

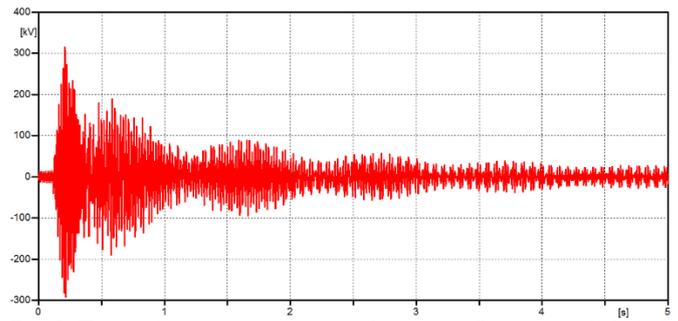


Fig. 9. Tensão fase-neutro na fase A do circuito 2, no meio da linha, quando desconectado do sistema, na ocorrência de uma falta monofásica no circuito 1 com a presença de reatores.

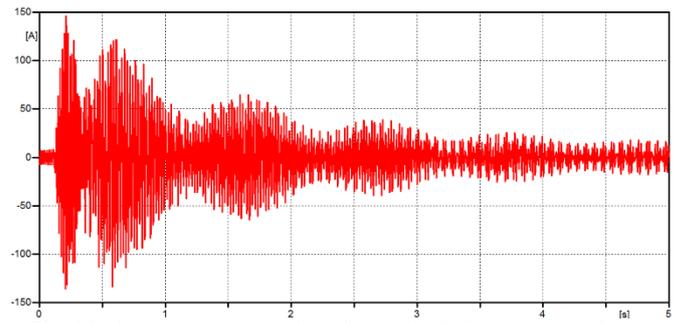


Fig. 10. Corrente no reator da subestação de Jauru conectada ao circuito 2.

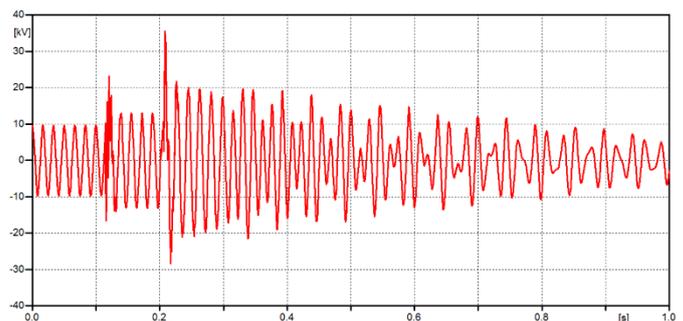


Fig. 11. Tensão fase-neutro na fase A do circuito 2, no meio da linha, quando desconectado do sistema, na ocorrência de uma falta monofásica no circuito 1 sem a presença de reatores.

observa na Fig. 10. O comportamento oscilatório dos picos de tensão e corrente nas Figs. 9 e 10 mesmo após a extinção da falta e o religamento do circuito 1 é resultado de uma troca de energia entre o campo magnético dos reatores e o campo elétrico dos capacitores shunt da linha. Além disso, a resistência inerente ao circuito atua no sentido de amortecer o valor dessa energia através da dissipação térmica da mesma.

Na Fig. 11, pode-se observar que ao se desconectar os reatores do circuito 2, as tensões induzidas neste, mesmo após a ocorrência da falta, atingem valores de pico quase 9 vezes menores do que quando na presença dos reatores.

Por fim, quando a linha está sem compensação (sem a presença dos reatores) e os disjuntores desconectam um dos circuitos devido à presença de uma falta, as tensões neste circuito mantém um valor próximo do que possuíam no momento da abertura do disjuntor, como ilustra a Fig. 12. Este valor pode ser não-nulo e depende do instante em que os disjuntores atuam. Nesta situação, o religamento não é efetuado, o curto ainda é eliminado no instante 0,3 s e o circuito 2 se encontra desenergizado e sem compensação. A

tensão na fase A é nula após a abertura dos disjuntores pois a falta lhe proporciona o mesmo potencial da terra após um período transitório.

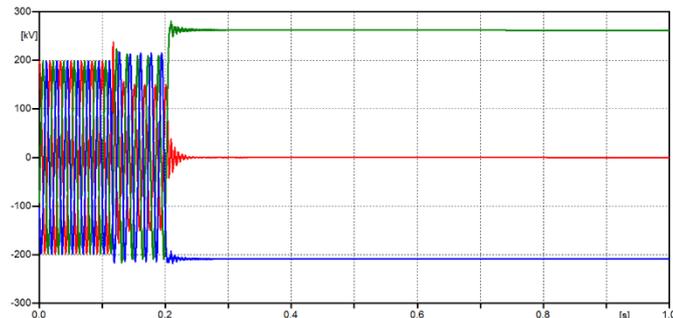


Fig. 12. Tensões no meio da linha no circuito 1 não-compensado, com o circuito 2 desenergizado e não-compensado, antes e durante a ocorrência de uma falta e após a abertura dos disjuntores.

Na Fig. 13 é possível se observar com maior detalhamento a tensão na fase B da Fig. 12. Após os transitórios decorrentes do chaveamento dos disjuntores, é possível observar que o valor da tensão decresce ao longo do tempo. Esse amortecimento é resultado da dissipação térmica de energia na resistência dos cabos devido à corrente que circula através dos mesmos e das capacitâncias shunt da linha.

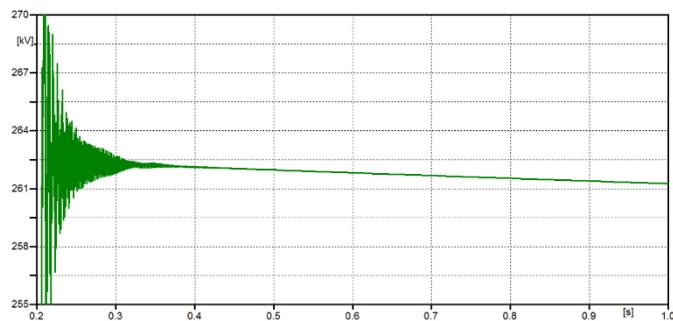


Fig. 13. Detalhe da tensão na fase B da Fig. 12.

Da mesma forma, as tensões induzidas no circuito 2 têm comportamento análogo às tensões do circuito 1, porém apresentam valores menores. Como pode se observar na Fig. 14, após os transitórios de chaveamento, a tensão na fase A tende a oscilar acima dos 9 kV, na fase B acima dos 3 kV e na fase C abaixo dos -3 kV.

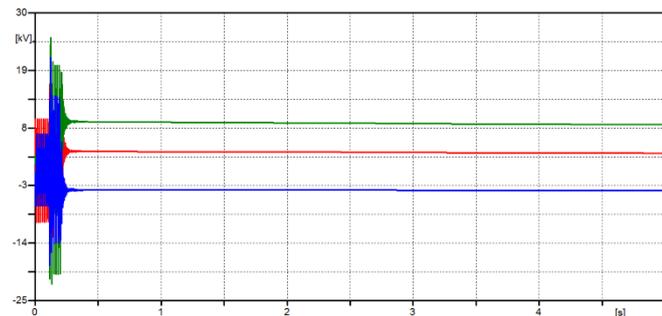


Fig. 14. Tensões no meio da linha no circuito 2 desenergizado e não-compensado quando as tensões no circuito 1 se comportam como ilustrado na Fig. 12.

Caso o circuito 2 esteja energizado e compensado no momento em que os disjuntores do circuito 1 sem compensação o desconectarem do sistema, oscilações induzidas pela corrente do circuito 2 serão sobrepostas ao fenômeno ilustrado na Fig. 12. Essa situação é ilustrada na

Fig. 15. A tensão da fase A, por exemplo, que possuía um potencial bem próximo ao da terra antes do curto ser eliminado em 0,3 segundos, passa a apresentar oscilações cujo valor pico-a-pico chega próximo dos 20 kV.

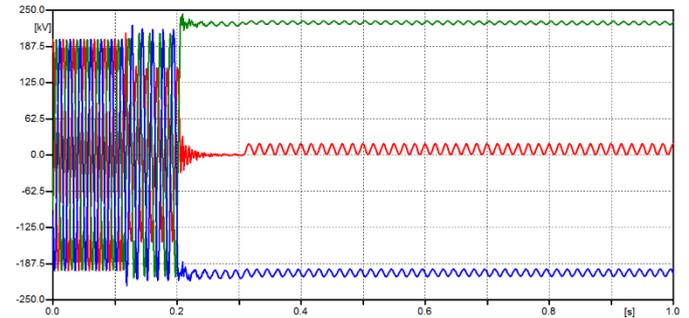


Fig. 15. Tensões no meio da linha no circuito 1 não-compensado, com o circuito 2 energizado e compensado, antes e durante a ocorrência de uma falta e após a abertura dos disjuntores.

De acordo com a análise dos casos das Figs. 12 e 15, sugere-se que seja avaliada a viabilidade de se implementar um sistema que aterriza as duas extremidades da linha após a abertura dos disjuntores, de modo que as fases B e C também possam ter o mesmo potencial da terra.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado um estudo acerca da operação de uma linha de transmissão de 230 kV e 345 km que possui circuito duplo. Para isto, algumas simplificações foram feitas de modo que todo o sistema elétrico envolvido na operação desta linha pudesse ser representado *no software* ATP de maneira satisfatória, considerando os objetivos do estudo.

Concluiu-se que devido ao acoplamento magnético existente entre os circuitos, mesmo na ocasião onde somente um dos circuitos é energizado, o outro circuito pode apresentar valores de tensão significativos, podendo atingir quase 0.2 pu de tensão sob operação em regime permanente. Notou-se também que, naturalmente, há uma redistribuição do fluxo de potência quando ambos os circuitos são energizados. Observou-se ainda que, devido ao número insuficiente de transposições, a distribuição do fluxo de potência entre as fases de um mesmo circuito pode variar bastante, de modo que uma fase pode transferir potência para a outra ao longo da linha.

Em relação às condições de religamento dos disjuntores da linha, averiguou-se que quando a tensão na entrada do disjuntor passa pelo seu valor máximo, os transitórios de tensão da linha são mais severos do que quando o religamento ocorre no instante em que a tensão na entrada do disjuntor passa por zero. Em Vilhena, que foi o caso mais crítico, a tensão na entrada da linha chegou a 1,77 p.u. em condições críticas de religamento contra 1,14 p.u. em condições ideais de religamento.

Ainda, observou-se o efeito da indução de tensão de um circuito sobre o outro na ocorrência de uma falta monofásica. Quando um dos circuitos se encontra desconectado do sistema, mas ainda está compensado nas suas extremidades (quando na presença dos reatores das subestações), as tensões induzidas nele pelo outro circuito atingem valores quase 9 vezes maiores do que os valores apresentados no caso em que os reatores não estão

presentes. Assim, sugere-se que os reatores sejam desconectados do circuito quando este estiver desenergizado.

Por fim, analisou-se o comportamento das tensões em um circuito isolado pelos disjuntores em suas extremidades, sem compensação. As tensões tendem a oscilar em torno de um valor que pode ser não-nulo e depende do instante em que o disjuntor atua no sentido de interromper a corrente de curto. Este valor tende a decrescer com o passar do tempo, mas em uma velocidade muito pequena, proporcional ao valor da resistência dos cabos e à condutância shunt da linha.

Diante deste cenário, para futuros estudos e análises, sugere-se que seja projetado um sistema de aterramento para as duas extremidades da linha tanto com o objetivo de reduzir o efeito das tensões induzidas em um circuito desenergizado quanto para aumentar o amortecimento das tensões na linha não compensada após o isolamento da mesma pelos disjuntores.

REFERÊNCIAS

- [1] R. D. Fuchs, “Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas”, Livros Técnicos e Científicos Editora, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1977.

ANEXOS

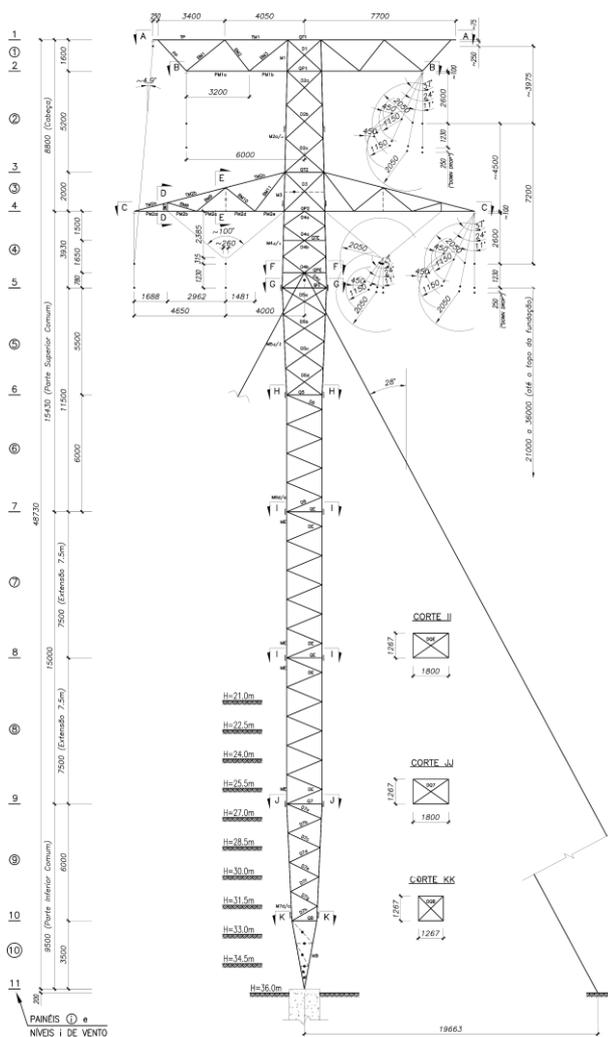


Fig. A-1 Estrutura JDE3 da linha de transmissão.

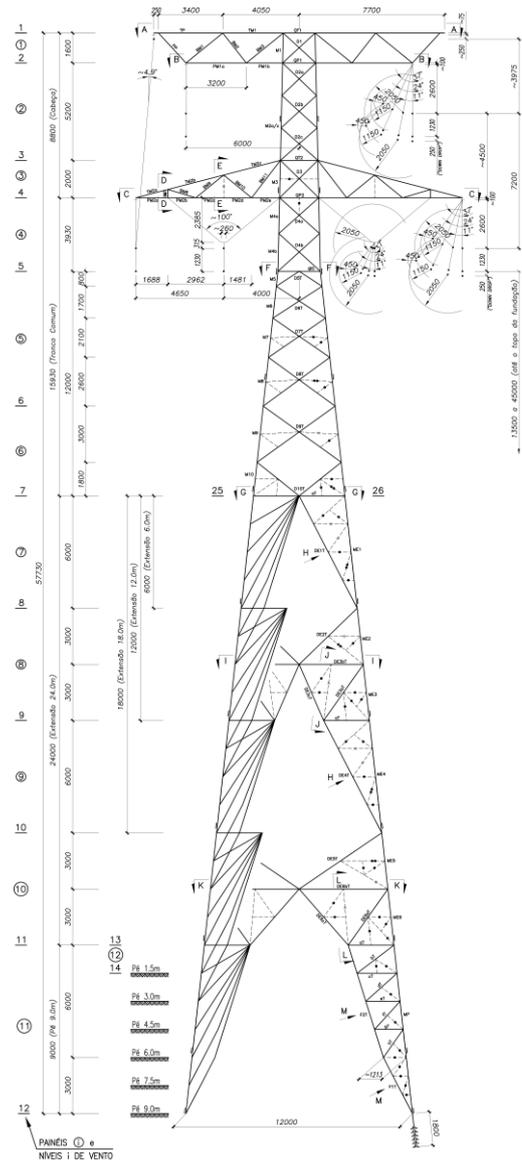


Fig. A-2 Estrutura JDS3 da linha de transmissão.

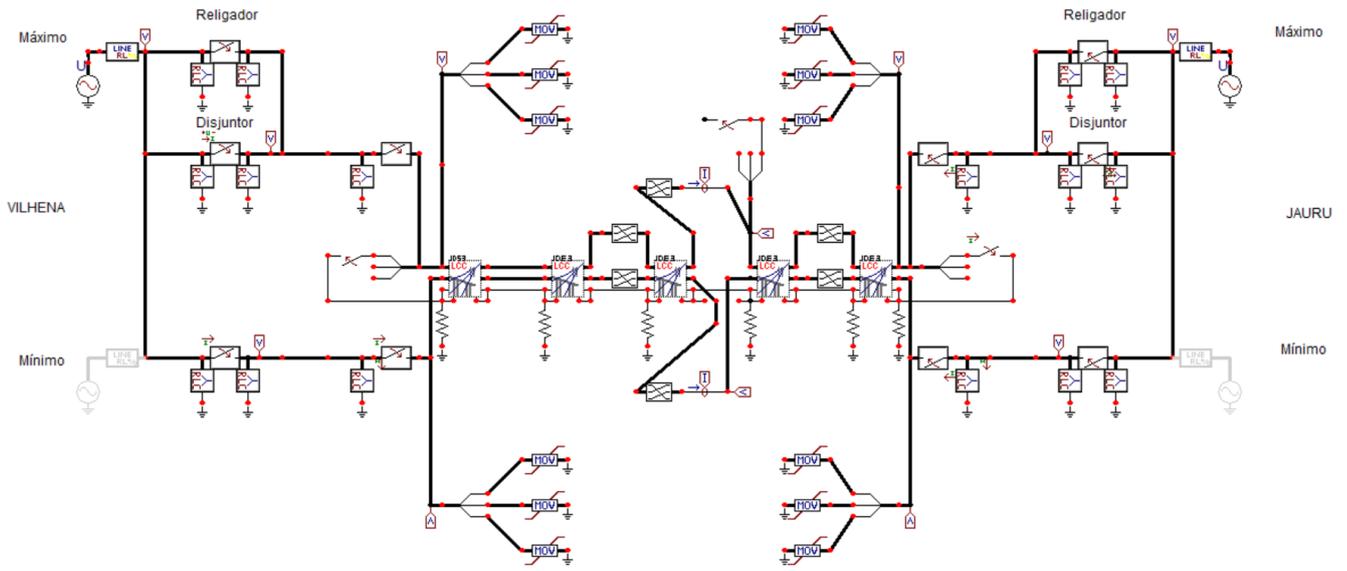


Fig. A-3 Sistema elétrico completo modelado no ATP.