

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO
CONTROLADO DURANTE A ENERGIZAÇÃO DE
LINHA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O
SOFTWARE ATP**

**Autor: Nicholas Campos Batista
Orientador: Alex Reis**

**Brasília, DF
2018**



Nicholas Campos Batista

TÍTULO: SUBTÍTULO DO TRABALHO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

**Brasília, DF
2018**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Sobrenome do Autor, Nome Autor.

Título da Monografia: Subtítulo / Nome do Autor (em ordem normal). Brasília: UnB, 2013. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Nome do Orientador.

1. Palavra Chave. 2. Palavra chave. 3. Palavra chave3 I.
Sobrenome do orientador, Nome do orientador. II. Título.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Nicholas Campos Batista

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Nome do Curso) da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Alex Reis, UnB/ FGA
Orientador

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. (Titulação): Loana Nunes Velascoz
Membro Convidado

Brasília, DF
2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por ter me abençoado em todos os momentos da minha vida e por ter me dado condições de ter ingressado na Universidade de Brasília. Por todos os momentos vividos dentro da universidade, sou grato a Ele.

Gostaria de agradecer a minha família, especialmente, aos meus pais Emerson e Maria das Dores, aos meus irmãos Lucas e Ana Carolina, aos meus avós, Amélia, Jovino e Odete minhas tias Karla, Márcia, Vanuza e Sheila e as minhas primas Isadora e Luisa por sempre me apoiarem, darem suporte nas minhas decisões e estarem presentes em todos os momentos da minha vida.

Agradeço também, a minha namorada Thaís, por ter me acompanhado nessa jornada, me apoiado nos momentos difíceis, por ser minha melhor amiga e a melhor namorada que eu poderia ter.

Agradeço aos meus irmãos do PJR, Alexandre Vaz, Felipe Camargo, Gabriel Dias, Iago Campos, João Victor Coutinho, Matheus Brito e Vitor Calixto, e também ao Lucas Breder, pessoas que sempre estiveram comigo ao longo dessa jornada nos momentos de alegria e nos momentos de tristeza, amigos com quem eu sempre vou contar.

Agradeço, também, aos meus amigos do Énois, Álvaro Lopes, Bernardo Carrara, Guilherme Bauer, João Boavista, Mateus Martins, Matheus Ferreira, Matheus Matos, Pedro Paulo Gatto, Ricardo Moraes, Robson Antunes e Vitor Boson parceiros que estiveram comigo em vários momentos da vida.

Agradeço também aqueles que fizeram parte da FGA, em especial ao Alessandro Alcântara, João Vitor Leite e Rafael Rabetti, além do Iago Campos e Álvaro Lopes, já citados, mas que também fizeram parte dos momentos bons e ruins nesta faculdade.

Agradeço ao Prof. Dr. Alex Reis por ter me orientado nesse trabalho de conclusão de curso e por ter sido meu professor em algumas matérias na faculdade.

Em seu coração o homem planeja seu caminho, mas o Senhor determina seus passos. Provérbios 16:9

RESUMO

Sistemas elétricos de potência permanecem em condições transitórias durante um tempo infinitesimal quando comparado com o tempo no qual permanece em regime permanente. Não obstante a isso, o sistema de segurança é dimensionado em relação ao seu período transitório, onde as maiores tensões são atingidas. Manobras de energização ou religamento geram surtos e consequentemente sobretensões no sistema, tensões que podem ultrapassar valores de 4 p.u.. Embora sobretensões de manobras sejam inevitáveis, podemos limitá-las com alguns métodos, dentre eles destacam-se o uso de resistores de pré-inserção, uso de para-raios e o controle do instante do chaveamento. Neste contexto o presente trabalho tem como objetivo verificar as sobretensões obtidas durante a manobra de energização de uma linha de transmissão real e posteriormente aplicar o método do chaveamento controlado a esta linha utilizando um modelo detalhado de disjuntor, buscando observar o novo comportamento da tensão. As simulações deste trabalho foram feitas no software ATP (*Alternative Transient Program*), programa destinado a estudos de transitórios magnéticos.

Palavras-chave: Energização. Linha de transmissão. Chaveamento controlado. Sobretensão.

ABSTRACT

Electrical power systems remain transient conditions for an infinitesimal time when compared to the time in which it remains in steady state. Notwithstanding this, the safety system is sized in relation to its transient period, where the highest tensions are reached. Maneuvers of energization or reclosing generate surges and consequently surges in the system, voltages that can exceed values of 4 pu. Although surges of maneuvers are inevitable, we can limit them with some methods, among them the use of pre-insertion resistors , use of lightning rods and the control of instantaneous switching. In this context, the present work aims to verify the overvoltages obtained during the energization maneuver of an open real transmission line and later apply the method of controlled switching to this line with a detailed model of circuit breaker , thus reducing the surges generated during line energization. The simulations of this work were done in the software ATP (Alternative Transient Program), program for studies of magnetic transients.

Keywords: Energization. Transmission line. Controlled switching. Overvoltage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Onda típica de tensão na energização.....	17
Figura 2. Modelo do resistor de pré-inserção.....	18
Figura 3. Mapa eletrogeográfico da região.....	24
Figura 4. Configuração simplificada da linha de transmissão.....	25
Figura 5. Sistema implementado no ATP	28
Figura 6. Disjuntor detalhado implementado no ATP	30
Figura 7. Comportamento das Tensões entre os contatos no disjuntor detalhado....	31
Figura 8. Tensão medida na subestação Milagres – Energização por S. J. Piauí	35
Figura 9. Detalhe Tensão medida na subestação Milagres – Energização por S. J. Piauí	35
Figura 10. Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por S. J. Piauí	36
Figura 11. Detalhe Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por S. J. Piauí	36
Figura 12. Tensão medida na subestação Milagres - Energização por Milagres.	37
Figura 13. Detalhe. Tensão medida na subestação Milagres – Energização por Milagres.....	37
Figura 14. Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por Milagres...38	
Figura 15. Detalhe. Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por Milagres.....	38
Figura 16. Tensão entre os contatos do disjuntor na Barra de Milagres no momento do chaveamento controlado – Com modelo detalhado do disjuntor.....	39
Figura 17. Tensão entre os contatos do disjuntor na Barra de S.J. Piauí no momento do chaveamento controlado – Com modelo detalhado do disjuntor.....	40
Figura 18. Tensão entre os contatos do disjuntor na Barra de Milagres no momento do chaveamento controlado – Com modelo detalhado do disjuntor.....	40
Figura 19. Tensão medida na subestação Milagres – Com Modelo detalhado do disjuntor.....	42
Figura 20. Detalhe da tensão medida na subestação Milagres – Com Modelo detalhado do disjuntor.....	42
Figura 21. Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Com Modelo detalhado do disjuntor.....	43
Figura 22. Detalhe da tensão medida na subestação S. J. Piauí – Com Modelo detalhado do disjuntor	43
Figura 23. Tensão medida na subestação Milagres – Sem Modelo detalhado do disjuntor.....	44
Figura 24. Detalhe da tensão medida na subestação Milagres – Sem Modelo detalhado do disjuntor	44
Figura 25. Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Sem Modelo detalhado do disjuntor.....	45
Figura 26. Detalhe da tensão medida na subestação S. J. Piauí – Sem Modelo detalhado do disjuntor	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros elétricos das linhas de transmissão.....	25
Tabela 2– Potência nominal dos reatores de linha base de 500 kV.....	25
Tabela 3 – Potência nominal dos reatores de barra, base 500 kV.....	26
Tabela 4 – Reatância percentual do capacitor	26
Tabela 5 – Impedância equivalente de Thévenin (Configuração – 2009)	26
Tabela 6 – Principais parâmetros de simulação.....	33
Tabela 7 – Valores de tensão e desvio padrão	34
Tabela 8 – Valores de tensão obtidos nas simulações	41
Tabela 9 – Reduções das sobretensões obtidos com o chaveamento controlado....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	SOBRETENSÕES DE MANOBRA	15
2.1.1	Energização de linhas de transmissão	16
2.2	MÉTODOS DÉ LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES.....	17
2.2.1	Resistores de pré-inserção	17
2.2.2	Para-raios	19
2.2.3	Chaveamento Controlado	20
3	METODOLOGIA.....	23
3.1	FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO, ATP	23
3.2	DESCRÍÇÃO DO SISTEMA	23
3.3	ESTUDO DE ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	27
3.3.1	Premissas para estudo de energização	27
3.4	CONTROLE DE SOBRETENSÃO.....	28
3.4.1	Modelagem do Disjuntor	28
3.4.2	Instante do chaveamento controlado	31
4	RESULTADOS	33
4.1	RESULTADOS DO ESTUDO DE ENERGIZAÇÃO	33
4.2	RESULTADOS DO CONTROLE DE SOBRETENSÃO	39
5	CONCLUSÃO	46
6	BIBLIOGRAFIA	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O tempo no qual um sistema de potência está submetido a condições transitórias é ínfimo quando comparado com o tempo em que permanece em regime permanente. Todavia as condições transitórias, que possam estar associadas a descargas atmosféricas ou manobras de equipamentos elétricos, podem ocasionar sobretensões, sendo importantes para o dimensionamento do sistema de proteção (D'AJUZ et al, 1987).

Um dos critérios para a determinação dos equipamentos de proteção são as sobretensões as quais serão submetidos. Assim as sobretensões influenciam diretamente no custo do sistema de potência (CIGRE, 1999), e também influenciam na confiabilidade do sistema, uma vez que esta está relacionada aos sobretensões e a probabilidade de ruptura dos isolamentos (DANTAS, 2007). Além de gerar efeitos negativos como a degradação de qualidade de energia e a imposição de restrições operativas que tornam proibitivas algumas manobras (DANTAS, 2007).

Sobretensões transitórias são ondas eletromagnéticas de curta duração que sobrepõem as ondas do sistema elevando as tensões. Existem dois tipos principais de sobretensões: sobretensões internas (manobras ou curto-circuito) e externas (advindas de descargas atmosférica em sua maior parte) (D'AJUZ et al, 1987). A importância da origem das sobretensões está relacionada com a tensão nominal da linha, sendo que para linhas de extra-alta tensão (EAT) e linhas de ultra-alta tensão (UTA) as sobretensões devido a manobras são determinantes e para linhas de tensões mais baixas os sobretensões devidos as descargas atmosféricas são os determinantes (D'AJUZ et al, 1987). A título de exemplificação, sobretensões devidos a manobras em sistemas tensões nominais entre 500 kV e 800 kV sem nenhum tipo de medidas mitigadoras, podem provocar sobretensões em torno de 4 p. u. (ARAUJO et al, 2005).

Com isso medidas para diminuir as sobretensões são de extrema importância. Tradicionalmente, uma das tecnologias aplicáveis a esse problema são os disjuntores

com resistores de pré-inserção, mesmo sendo eficientes para a situação, tem como grande desvantagem seu alto custo de implantação (VALERO, 2007).

Outro método de mitigação é o uso de para raios em pontos estratégicos da linha. Este método é usado para mitigação de sobretensões tanto para descargas atmosféricas quanto para surtos devidos a manobras (VALERO, 2007).

O chaveamento controlado, método de mitigação o qual será objeto de estudo nesse trabalho, é outra solução para o problema de sobretensões causadas por manobras na linha de transmissão. Este método tem como fundamento controlar, por meio de análise dos sinais de corrente e tensão, o momento de energização ou desligamento da linha, tendo como objetivo encontrar o momento ótimo para efetuar manobra, evitando assim sobretensões nas manobras.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é a realização do estudo de energização com o método de chaveamento controlado na linha de transmissão que interliga as subestações de São João do Piauí e Milagres.

Objetivos específicos são:

- Estudo de Energização da linha para determinação do pior caso de energização;
- Modelagem de um disjuntor detalhado utilizando o *Model*s, para aplicação do método de chaveamento controlado;
- Simulação da energização da linha com o chaveamento controlado utilizando o disjuntor detalhado;
- Análise comparativa das sobretensões sem o chaveamento controlado e com o chaveamento controlado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A organização deste estudo consiste em 5 capítulos, onde:

- Capítulo 1: Tem como objetivo introduzir o assunto estudo com as considerações iniciais, mostrando a problemática abordada, e os objetivos do trabalho.
- Capítulo 2: A fundamentação teórica necessária para o estudo. Sendo composta por conceitos básicos acerca de sobretensões de manobra e métodos de limitação dessas sobretensões.
- Capítulo 3: Este capítulo apresenta o *software ATP*, ferramenta utilizada nas simulações necessárias para o estudo, bem como a descrição do sistema elétrico simulado, as premissas para estudo de energização. Apresenta também a metodologia do disjuntor detalhado e do instante ótimo determinado.
- Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos no estudo de energização e com a implementação do chaveamento controlado.
- Capítulo 5: Traz as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Este acontecimento existe quando há alterações na topologia da rede, sendo elas por meio de energização ou religamento da linha, manobras de cargas indutivas e capacitivas, eliminação de faltas, rejeição de carga, entre outras. (SANT'ANA, 2008; DANTAS, 2007)

Existe um caráter probabilístico nas sobretensões de manobra, desta forma, para uma determinada manobra podem existir diferentes valores de sobretensão que dependem, por exemplo, do instante na onda em que ocorre a manobra. Assim as ocorrências de sobretensão depende, em sua maioria, do número de faltas que devem ser eliminadas em uma linha e a frequência de manobras de chaveamento no sistema. Estas não podem ser totalmente impedidas, mas podem ter seus impactos minimizados através de métodos de proteção, como por exemplo, resistores de pré inserção, para raios e compensações. (DANTAS, 2007).

Este estudo terá como foco as sobretensões proveniente de energização de linhas de transmissão trifásica. D'AJUZ *et al* (1987) cita os parâmetros do sistema que mais influenciam a ocorrência de sobretensões em manobras de energização.

- Parâmetros da fonte:
 - a. Potência de curto-circuito;
 - b. Tensão de pré-manobra
- Parâmetro da linha de transmissão:
 - c. Comprimento da linha;
 - d. Grau de compensação;
 - e. Perdas no condutor;
 - f. Presença de equipamentos de proteção;
 - g. Resistência de aterramento do sistema;

- h. Valor da tensão residual na linha;
- Parâmetro de manobra:
 - i. Ponto na onda de tensão onde o disjuntor é fechado;
 - j. Tempo de inserção do disjuntor;
 - k. Dispersão entre os contatos.

2.1.1 Energização de linhas de transmissão

A energização de linhas de transmissão deve ser analisada sob o ponto de vista trifásico, uma vez que as três fases não são fechadas simultaneamente, em função do fechamento das três fases não acontecerem no mesmo instante, isto ocorre pois existe uma dispersão mecânica entre os contatos do disjuntor e de existir, também, uma aleatoriedade da formação do arco elétrico. Pelo fato do fechamento das três fases não ocorrerem simultaneamente existem ondas de tensão trafegando nas demais fases, ainda não energizadas, por causa do acoplamento magnético entre elas, estas ondas se superpõem aos transitórios de energização dos quando os demais polos se fecham. Estes transitórios se propagam na linha até chegar no terminal, que normalmente estará em aberto, assim estas ondas são refletidas. Consequentemente as maiores sobretensões são obtidas nesse momento (D'AJUZ et al, 1987; DANTAS, 2007). Ao se estudar este fenômeno, afim de se obter as sobretensões máximas, é necessário simular um elevado números de casos variando o momento de fechamento dos disjuntores, buscando simular a dispersão mecânica dos mesmos, como indica a ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2011). Com isso será possível obter um histograma das sobretensões máximas.

A Figura (1) apresenta um oscilograma típico de uma manobra de energização em uma fase de uma linha de transmissão, obtida através de simulação no software ATP. Na imagem pode-se observar o que até o instante t_0 não existe tensão na linha.

Logo após o mesmo instante, depois que a linha foi energizada, nota-se que o sinal aumenta abruptamente e de forma irregular, este período de maior tensão é o regime transitório, em que existem sobretensões. Após este período que dura alguns milissegundos, observa-se o período permanente onde não existe mais sobretensão devido a energização, a tensão se mantém uniforme.

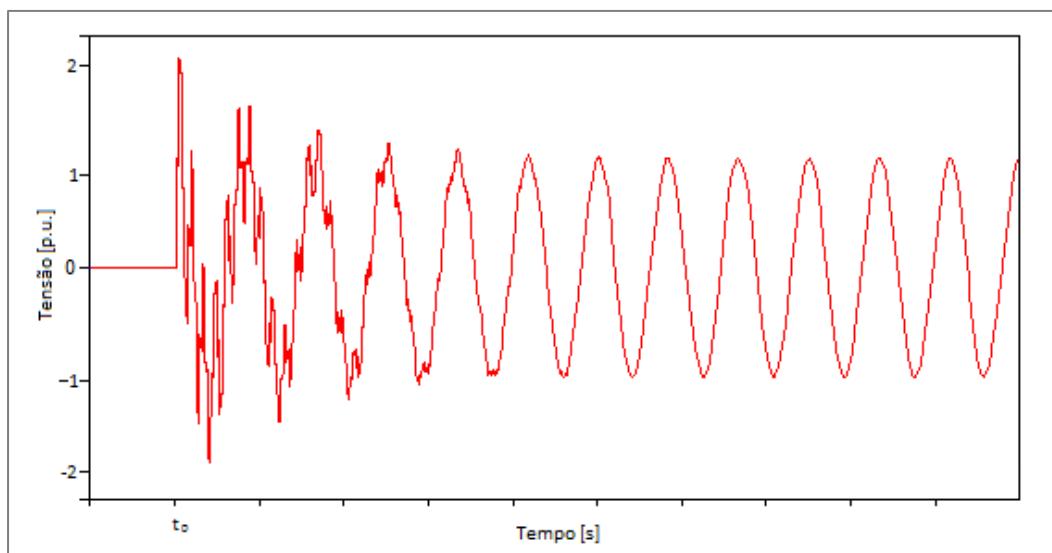


Figura (1) Onda típica de tensão na energização. (Soares, 2017)

2.2 MÉTODOS DE LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES

As sobretensões em um sistema de transmissão não podem ser evitadas e nem totalmente suprimidas. No entanto existem métodos que podem limitar as amplitudes, evitando assim danos aos equipamentos, ou custos elevados para aumentar a isolação dos equipamentos (D'AJUZ et al, 1987).

Nesta seção será dada ênfase aos três principais métodos de limitação de sobretensões advindas de manobras de energização: resistor de pré-inserção, pararaios e o chaveamento controlado.

2.2.1 Resistores de pré-inserção

O resistor de pré-inserção é dos métodos mais tradicionais para limitar sobretensões advindas de manobras. Este resistor é instalado junto a câmera dos disjuntores.

Este método, pode ser visto, como um fechamento sequencial de duas chaves, ilustrado na Figura 1. No primeiro momento, após o comando para a manobra de energização ou religamento, os contatos da chave auxiliar se fecham, inserindo assim o resistor em série. Após um certo intervalo de tempo, o contato principal fecha curto-circuitando o resistor em série, trazendo, assim, a tensão da fonte para a linha. (DANTAS, 2007)

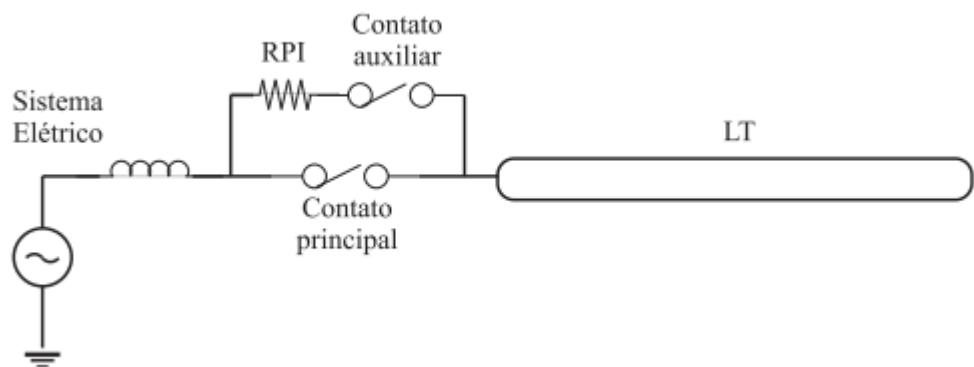


Figura (2) Modelo do resistor de pré-inserção (DANTAS, 2007)

A energização da linha acontece em dois estágios o primeiro onde o resistor reduz a tensão do surto aplicando um divisor de tensão que se estabelece entre o resistor e a linha. No segundo, com o resistor curto-circuitado a fonte energiza linha com uma tensão adequada. Um dos problemas desse método aparece na segunda etapa, no momento que o resistor é curto-circuitado, ocorre, novamente, uma sobretensão. Mesmo que esta sobretensão seja consideravelmente menor que a oriunda da energização, ela deve ser levada em consideração. Portanto a escolha adequada do valor e do tempo de inserção do resistor assegura a eficiência deste método. (DANTAS, 2007; GREGORY, 2016)

Foram listadas as principais características do resistor de pré-inserção no trabalho de Valero (2007):

- Tempo de inserção

A condição a ser obedecida é que o resistor não deve ser curto-circuitado antes que a primeira reflexão das ondas de tensão/corrente na extremidade aberta retorne ao terminal da fonte, isto é, o tempo de permanência da onda deve ser duas vezes o tempo de trânsito da linha.

- Valor do resistor de pré-inserção

O valor ótimo do resistor depende, basicamente, dos seguintes fatores: potência de curto circuito da fonte, comprimento e grau de compensação da linha.

- Energia dissipada

Com o aumento no valor do resistor, a corrente que flui através dele diminui, levando-o a absorver menos energia, assim ao se dimensionar o resistor ele deve ser correspondente ao valor ótimo e que atenda as condições pré-determinadas de máxima sobretensão permitida e de energia dissipada.

As empresas de energia estão abandonando o uso desse método devido à baixa confiabilidade, alto custo agregado e custo de manutenção. Por ser um conjunto de mecanismo e peças que acrescentam até duas câmaras de manobra, dependendo da tensão da linha, implicando no aumento do número de componentes, trazendo maior possibilidade de falha e maior custo de manutenção e reposição de peças. Além da possibilidade de substituição deste método por outros menos tradicionais, como chaveamento controlado e para-raios. (DANTAS, 2007; GREGORY, 2016)

Foi estudado a eliminação de resistores de pré-inserção em uma das linhas administradas pela Bonneville Power Admisntration (BPA) em Legate et al (1988). A BPA teve grandes dificuldades com esses resistores devido a suas falhas mecânicas, uma vez que os resistores possuem muitos componentes e operações mecânicas.

2.2.2 Para-raios

De maneira fundamental, os para-raios são formados de blocos de resistores não lineares, podendo ter ou não gaps em série, os quais entram em condução

quando a magnitude da tensão nos seus terminais supera um determinado valor (GREGORY, 2016).

Os para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) foram introduzidos para sistemas de EAT com alta capacidade de dissipação de energia e facilidade de instalação (VALERO, 2007). A utilização de para-raios em pontos estratégicos da linha de transmissão, em alguns casos, elimina o uso de resistores de pré-inserção, como mostra o estudo de SEYEDI *et al* (2005). Em outros casos existe a necessidade de associar os para-raios com outro método de limitação, seja ele o chaveamento controlado ou os resistores de pré-inserção. Sendo o chaveamento controlado, muitas vezes a melhor opção, visando os custos e a complexidade do projeto.

Valero (2007), apresenta as características dos para-raios:

- Tensão Nominal:

Valor máximo eficaz de tensão para o qual o para-raio foi projetado e possui condições de operar de maneira satisfatória durante o ensaio.

- Níveis de Proteção

Os níveis de proteção são definidos pelas tensões residuais que aparecem através de seus terminais durante a sobretensão transitória.

- Capacidade de Absorção de Energia

A capacidade de absorção de energia tem que ser especificada de maneira adequada a fim de evitar danos aos equipamentos elétricos.

2.2.3 Chaveamento Controlado

Chaveamento controlado é um método para eliminação dos efeitos indesejáveis das sobretensões de manobra. Este método ocorre devido a equipamentos com a capacidade de identificar o momento ideal de fechamento ou abertura dos contatos do disjuntor, através dos sinais de tensão e corrente (ROHANI ET AL 1995; GREGORY, 2016). No caso de energização e religamento os as tensões

entre os contatos de cada polo do disjuntor constituem os sinais de referência e o momento ideal ocorre nas passagens por zero destes sinais (DANTAS, 2012).

Os componentes básicos de um chaveamento controlado são o disjuntor e o sincronizador, este também conhecido como controlador. Este último elemento se caracteriza como um dispositivo eletrônico que controla que a operação de manobra do disjuntor, de forma que ela aconteça em um instante ótimo (VALERO, 2007). É apontado por VALERO (2007) os princípios básicos de funcionamento do sincronizador:

- Reconhecer a forma ou padrão do seu sinal de referência;
- Prever o ponto ideal da onda de tensão para a manobra do disjuntor.

A referência Carvalho et al (1995) estuda redução dos surtos de manobra, utilizando a técnica de chaveamento controlado associado a para raios nos terminais da linha de transmissão. As simulações de energização e religamento da linha de 500 kV foram feitas pelo software ATP. Representando por meio de distribuição estatística o tempo de operação do disjuntor e a estimativa do instante ótimo para o chaveamento, foram obtidos resultados os quais confirmam a eficiência da associação do chaveamento controlado com o uso de para raios como forma de reduzir os surtos de manobras (GREGORY, 2016).

Foi proposto por Dantas (2012) uma nova metodologia para o chaveamento controlado, a qual se aplica ao religamento rápido de linhas de transmissão. O método de chaveamento controlado proposto por esse autor, se caracteriza por meio da análise das características das cargas residuais na linha. Tal método consiste em estimar o sinal de referência em instantes futuros, possibilitando assim a determinação de instantes apropriados para o religamento de fases. O método proposto é eficaz para redução de sobretensões de manobra e ainda permite a identificação do instante de extinção de defeitos do tipo fase-terra e fase-fase-terra, viabilizando a manobra de religamento rápido de LT.

Legate et al (1988) concluíram que os resistores de pré-inserção podem ser eliminados das linhas de extra-alta tensão e serem substituídos por chaveamento

controlado com o auxílio de para-raios de óxidos metálicos. O chaveamento controlado juntamente com os para-raios possuem uma complexidade mecânica consideravelmente menor que os resistores de pré-inserção. Assim além e possuírem um custo menor estão menos propensos a falhas mecânicas, sendo um método mais confiável que o anterior. Nesta referência dois métodos de chaveamento controlado são utilizados (GREGORY, 2016):

- O fechamento escalonado, este método consiste no chaveamento de cada polo do disjuntor com intervalo aproximado de um ciclo, respeitando o tempo necessário para a extinção da tensão transitória provocada pelo acoplamento eletromagnético entre as fases;
- Fechamento controlado, chaveamento independente para cada polo quando as tensões nos terminais de cada fase têm a mesma intensidade.

Os estudos foram feitos por simulações digitais, utilizando o programa *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) e por teste em campo. Estes estudos apresentaram resultados positivos, concluíram que o chaveamento controlado associado aos para-raios nos terminais podem substituir os resistores de pré-inserção nas linhas de extra-alta tensão (GREGORY, 2016).

O chaveamento controlado com o fechamento dos polos do disjuntor no instante em que a tensão tem valor próximo a zero, a fim de reduzir ou não gerar a parcela transitória, durante a manobra de energização foi trabalhado por Valero (2007). Neste trabalho foi comparado a energização da linha com para raio e com o chaveamento controlado associado ao para-raio, com isso foi observado que houve a redução da sobretensão e ainda a forma de onda apresenta menor conteúdo harmônico (VALERO, 2007).

3 METODOLOGIA

3.1 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO, ATP

O ATP, *Alternative Transient Program*, é um programa para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica. Com este programa digital, redes complexas e sistemas de controle de estrutura arbitrária podem ser simulados. Por meio deste software é possível modelar sistemas elétricos de forma a conseguir configurações similares as reais. (EEUG, 1987)

O ATP realiza simulações para redes polifásicas utilizando a matriz de admitância de barras. A formulação matemática do programa consiste no método de Bergeron, para parâmetros distribuídos, e na regra integração trapezoidal para parâmetros concentrados. (EEUG, 1987)

O ATPDraw, um dos recursos existentes na plataforma ATP, foi utilizado para a implementação do sistema elétrico simulado neste trabalho. Este recurso consiste em um processador gráfico que permite criar e editar um sistema elétrico contendo modelos de dispositivos pré-definidos. Assim, nesse ambiente, arquivos são criados no ATP de maneira de fácil manuseio. A interface disponibiliza uma série de equipamentos para a realização de estudos de sistemas de potência. (EEUG, 1987)

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A linha de transmissão analisada neste estudo interliga as subestações de S.J. do Piauí (PI) e Milagres (CE), com tensão nominal de 500kV. Esta linha já foi licitada e se encontra em construção segundo o relatório Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, 2015. A Figura (3) apresenta o mapa eletrogeográfico da região onde a linha de transmissão simulada no ATP se encontra. A linha está destacada dentro da região delimitada pela linha laranja.

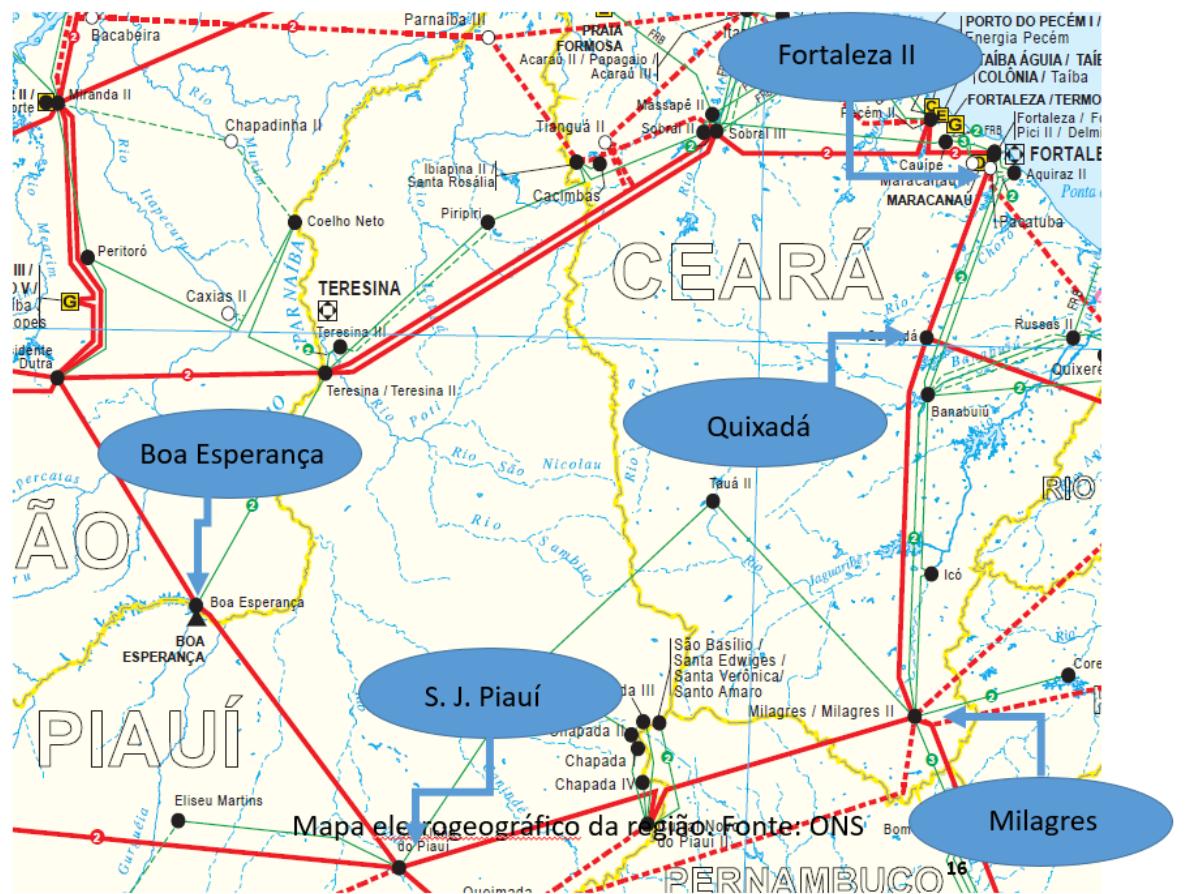


Figura (3) – Mapa eletrogeográfico da região. (ONS)

A implementação do sistema externo foi reproduzida por meio do equivalente de Thévenin, onde as fontes foram ajustadas para fornecer uma tensão de 500 kV. O diagrama unifilar subsequente, Fig. (3), nos apresenta a configuração implementada no programa ATP.

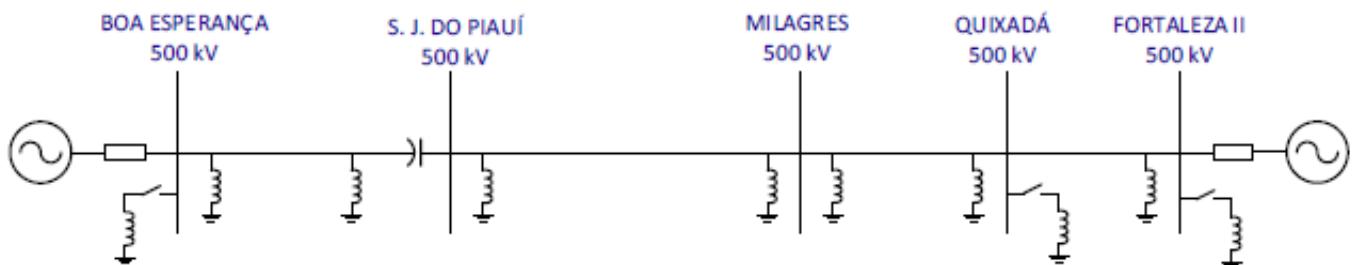


Figura (4) – Configuração simplificada da linha de transmissão (GREGORY, 2016)

Todos os dados apresentados nas tabelas 3.1 a 3.5 foram obtidos das teses referências (DANTAS, 2012) e (GREGORY, 2016).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de sequência positiva e zero das linhas de transmissão simuladas.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos das linhas de transmissão.

Linha de Transmissão	Sequência Positiva			Sequência Zero			Comp. (km)
	R ₁ (Ω/km)	X ₁ (Ω/km)	Y ₁ (μΩ/km)	R ₀ (Ω/km)	X ₀ (Ω/km)	Y ₀ (μΩ/km)	
Fortaleza - Quixadá	0,0260	0,2820	5,8770	0,2230	0,9000	3,4100	137,8
Quixadá - Milagres	0,0260	0,2820	5,8810	0,2420	0,8720	3,4480	268,7
Milagres - S.J.Piaui	0,0186	0,2670	6,1240	0,4930	1,3390	2,8900	400,0
S.J.Piaui - B.Esperança	0,0246	0,3219	5,1200	0,3763	1,4110	3,0640	233,8

A Tabela 2 apresenta a potência nominal dos reatores de linha de compensação, considerando tensão base em 500 kV.

Tabela 2– Potência nominal dos reatores de linha base de 500 kV.

Linha de Transmissão	Subestação	Potência (MVar)	X ₀ /X ₁
Fortaleza - Quixadá	Fortaleza	150	
Quixadá - Milagres	Quixadá	150	
Quixadá - Milagres	Milagres	150	
Milagres - S.J.Piaui	Milagres	180	
Milagres - S.J.Piaui	S.J.Piaui	180	
S.J.Piaui - B.Esperança	S.J.Piaui	100	1,72
S.J.Piaui - B.Esperança	B. Esperança	100	1,73

A Tabela 3 apresenta a potência nominal dos reatores de barra nas subestações onde se encontram, com valor base de 500 kV.

Tabela 3 – Potência nominal dos reatores de barra, base 500 kV.

Subestação	Potência (MVAr)	X_0/X_1
Fortaleza	150	1,00
Quixadá	150	1,00
B. Esperança	1,05	1,00

A linha de transmissão que interliga São João do Piauí à Boa Esperança possui um capacitor conectado em série, a reatância percentual deste capacitor é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Reatância percentual do capacitor

Linha de Transmissão	Subestação	Reatância (%)
S.J.Piaui - B.Esperança	S.J.Piaui	2,11

Os valores da impedância equivalente Thévenin, de sequência positiva e zero, vista das gerações às barras das subestações, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Impedância equivalente de Thévenin (Configuração – 2009)

Subestação	Sequência Positiva		Sequência Zero	
	$R_1 (\Omega)$	$X_1 (\Omega)$	$R_0 (\Omega)$	$X_0 (\Omega)$
Fortaleza	3,90	106,61	1,98	24,49
B. Esperança	0,41	273,33	7,79	100,94

Com os parâmetros apresentados nas tabelas acima, foi montado o sistema no software ATPDraw e simulado conforme as premissas apresentadas na subseção a seguir.

3.3 ESTUDO DE ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O estudo de energização tem como base as diretrizes do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) para este estudo apresentados no Submódulo 23.3. Este estudo tem como objetivo determinar o pior caso de sobretensão quando o chaveamento é feito em um instante aleatório.

3.3.1 Premissas para estudo de energização

Os Procedimentos de Rede do sistema de transmissão brasileiro, em Submódulo 23.3 define que estudos estatísticos devem ser realizados em situações em que haja a necessidade de quantificar as solicitações transitórias de formar a considerar as características probabilísticas dos equipamentos de manobra. Devido a aleatoriedade dos instantes de operação dos disjuntores, os Procedimentos de Rede definem que sejam simulados, pelo menos, duzentos casos, para assegurar a representação estatística dos estudos. (ONS 2011)

Estudos estatísticos de manobra devem ser feitos utilizando disjuntores modelados como chave estatística. Os tempos de operação individuais de cada uma das três fases devem seguir uma distribuição gaussiana de probabilidade associada à dispersão do instante de fechamento dos contatos principais. (ONS 2011)

A chave estatística simula o tempo de dispersão entre os disjuntores, tendo em vista que o processo de fechamento do disjuntor é um processo mecânico. Dessa forma para simulação foi usado um desvio, tempo de dispersão, de 0,0055 segundos. Logo, para cada simulação a chave estatística apresentará um instante de tempo aleatório, obedecendo o tempo de fechamento e o desvio previamente estipulados, para cada fechamento de cada fase.

Seguindo as diretrizes e critérios para estudos estatísticos foi implementado o sistema de transmissão de energia de Boa Esperança (PI) até Fortaleza (CE), com o foco de simular as sobretensões de manobra de energização na linha de transmissão entre São João do Piauí (PI) a Milagres (CE).

O Anexo 1 apresenta o sistema implementado no ATPDraw, sistema em conformidade com as características apresentadas na seção anterior e com as diretrizes para estudos estatísticos da ONS.

3.4 CONTROLE DE SOBRETENSÃO

Para o controle de sobretensão o método utilizado foi o chaveamento controlado, como já explicado na seção 2.2.3, consiste em controlar o instante de chaveamento para que a manobra ocorra no momento ótimo, no caso da energização, que o fechamento dos polos ocorra o mais próximo do zero possível, evitando, assim, sobretensões indesejáveis.

O disjuntor tem uma grande influência no instante de fechamento dos polos, uma vez que o fechamento pode ocorrer até 3 ciclos depois do comando, dependendo do disjuntor. Deste modo foi feita uma modelagem mais detalhada do disjuntor, esta é apresentada na seção 3.4.1, a seguir.

3.4.1 Modelagem do Disjuntor

Os modelos de disjuntores presentes no ATP são modelos simplificados, o que é suficiente para maioria dos estudos. Porem para uma simulação de energização de linha onde o instante exato de fechamento dos contatos é muito importante, o modelo simplificado não é mais suficiente. Na primeira parte desse trabalho foi utilizado uma chave estatística para encontrar os piores casos de simulação.

Para a segunda parte do trabalho onde a técnica de chaveamento controlado foi adicionada na energização de linha, para um estudo mais realístico foi preciso um modelo detalhado do disjuntor para especificar de forma mais real o instante do comando de fechamento dos polos para que a energização aconteça no instante ótimo possível.

Devido a influência do disjuntor no instante de fechamento, foi preciso estudar o comportamento da tensão entre os contados do disjuntor e da rigidez dielétrica entre eles quando os contatos começam a ser aproximar. Com objetivo de poder criar uma lógica para o fechamento do disjuntor na linguagem Models e implementa-la no ATP.

3.4.1.1

Os contatos do disjuntor não se fecham no instante que o comando de fechamento é dado, existe um atraso. Este atraso deve-se ao tempo que demora para a tensão entre os polos ($U_c(t)$), superar a tensão de quebra da resistência do dielétrico ($U_{bcl}(t)$) existente entre os contatos do disjuntor, formando um arco elétrico. Assim quando o módulo da tensão entre os polos do disjuntor é igual a tensão de quebra de resistência considera-se que o disjuntor está fechado. Pode-se assumir que $U_{bcl}(t)$ varia de maneira linear de acordo com a distância dos contatos, isto é apresentado pela Equação (1) (BAK *et al*, 2018). A figura (5) a seguir, apresenta o comportamento da tensão entre os contatos do disjuntor ($U_c(t)$) e a rigidez dielétrica entre os contatos do disjuntor ($U_{bcl}(t)$) após o comando de fechamento.

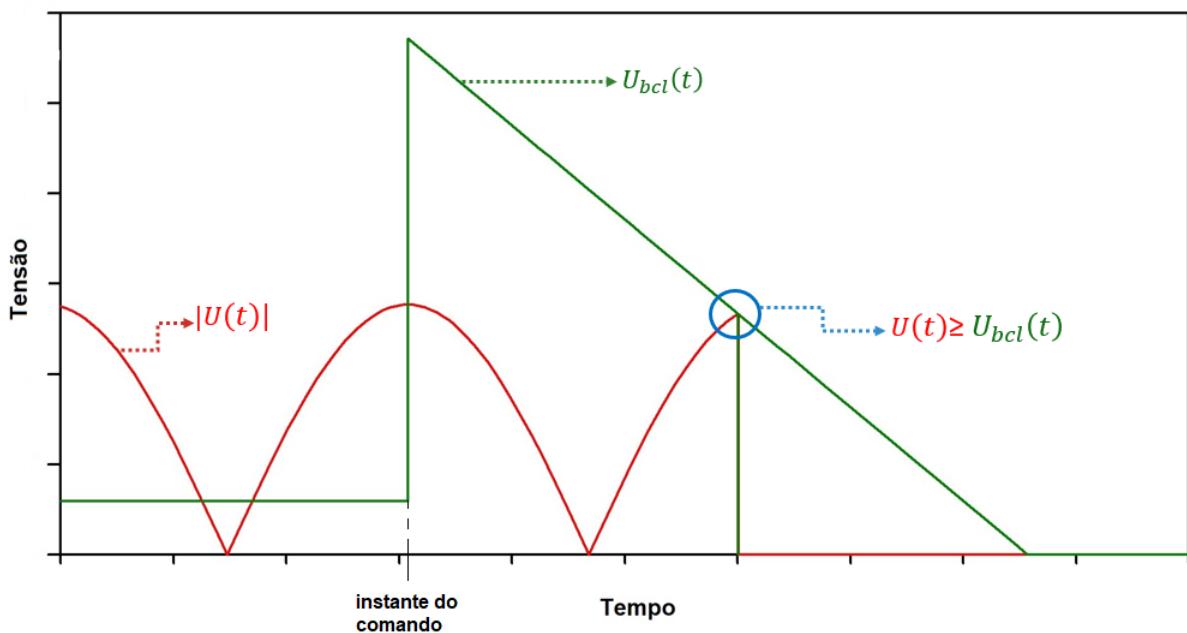


Figura (4) – Comportamento da tensão e da rigidez dielétrica entre os contatos do disjuntor.

$$U_{bcl}(t) = U_{cpeak} - A_2(t - t_{fechamento}) \quad (1)$$

Com,

$$U_{cpeak} = Kpp * Kaf \sqrt{\frac{2}{3}} U \quad (2)$$

Onde $t_{fechamento}$ é o instante do comando de fechamento do disjuntor. A_2 é a taxa de variação da resistência dielétrica dos contatos expressa em V/s a medida que a distância dos contatos diminui (na simulação $A_2 = 3 \cdot 10^7$ (BAK *et al*, 2018)), e U_{cpeak} (V) é a tensão máxima entre os contatos do disjuntor. Esta tensão é calculada em função da tensão nominal da linha vezes *first pole to clear factor* (Kpp), este fator para um sistema trifásico isolado é de 1,5, multiplicado, também, pelo fator de amplitude transiente (Kaf), este fator é a razão entre o valor máximo da tensão de recuperação transitória e a tensão de recuperação em condições nominais (DUFOURNET, 2008). O documento IEEE C37.04 apresenta Kaf como 1,4 para a condição de 100% da corrente interrompida (BAK *et al*, 2018).

Utilizando estes equacionamentos foi implementado na linguagem *Models* a lógica de fechamento do disjuntor. A Figura (6) apresenta o disjuntor detalhado implementado no ATP. O *Models* recebe as informações de tensão antes e depois dos contatos do disjuntor, assim ele consegue comparar a tensão dos contatos com a tensão máxima da rigidez dielétrica e enviar o sinal para o fechamento das fases.

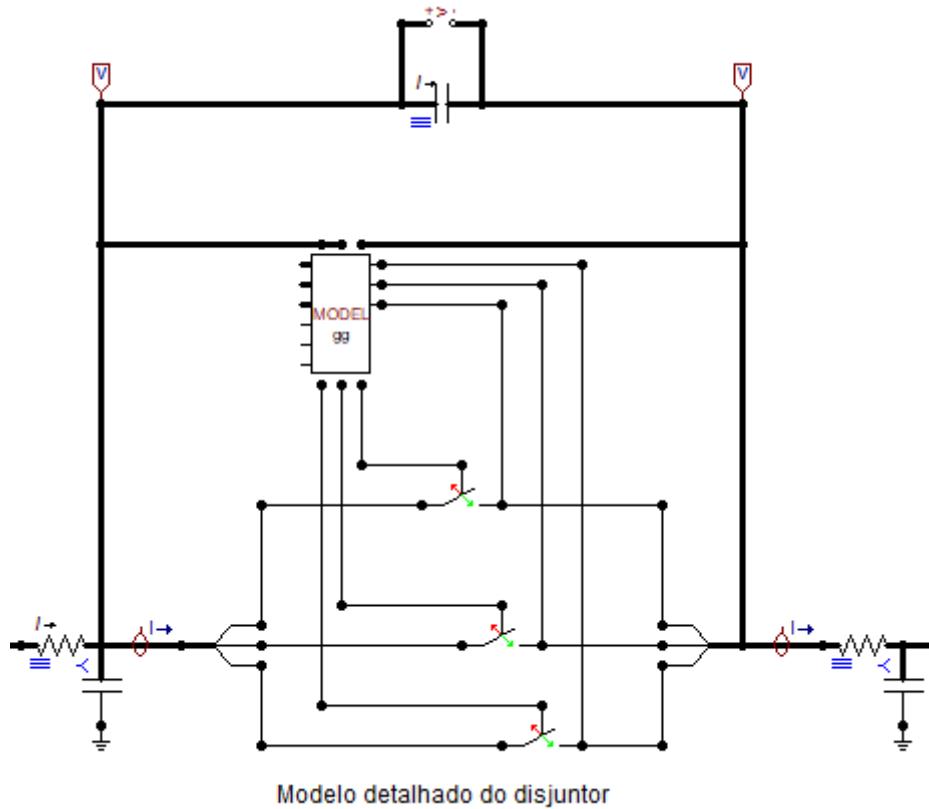


Figura (6) – Disjuntor detalhado implementado no ATP

Em seguida, a Figura (7) expõe o comportamento das tensões no disjuntor detalhado para um instante qualquer de fechamento. É possível observar, na figura, as tensões entre os contatos do disjuntor das fases A, B e C, além da função $U_{bcl}(t)$ no instante de fechamento. Nesta figura podemos ver o atraso do fechamento das fases em relação ao comando de fechamento.

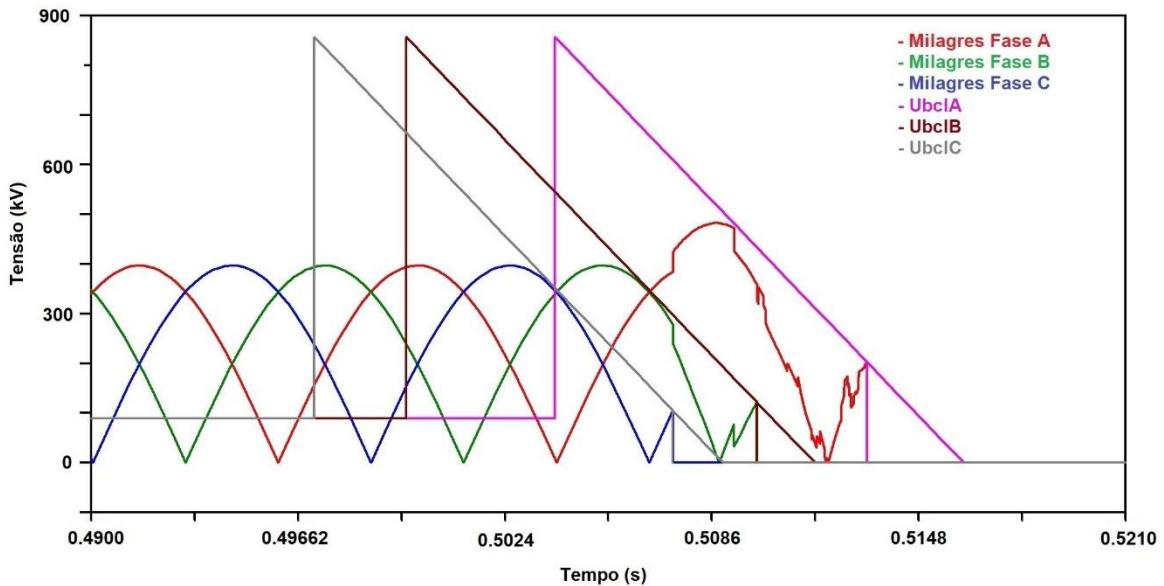


Figura (7) – Comportamento das Tensões entre os contatos no disjuntor detalhado. (Autoria própria)

3.4.2 Instante do chaveamento controlado

O chaveamento controlado, como já explicado anteriormente, é uma técnica de controle de sobretensões, onde controla-se o instante no qual ocorre o fechamento ou abertura do disjuntor, para que isto aconteça em um momento ótimo, e as sobretensões sejam amenizadas.

O instante ótimo de energização de uma linha de transmissão ocorre no momento em que a tensão entre os polos do disjuntor é nula. Como as três fases da linha são defasadas entre si, a energização de cada fase dá-se em tempos diferentes,

teoricamente, um atraso de 60 graus entre as fases, devido ao acoplamento magnético das fases, isto não é tão preciso.

Com o modelo do disjuntor detalhado implementado tem-se a função a $U_{bcl}(t)$ e as funções da tensão de cada fase, como é apresentado pela Figura (5), assim energização de cada fases ocorre quando a tensão se iguala a função $U_{bcl}(t)$. Sabe-se que o instante ideal é na passagem da tensão entre os polos do disjuntor seja zero, como mencionado anteriormente. Todavia, com o modelo de disjuntor implementado, não é possível que o fechamento dos polos ocorra no zero, devido a inclinação da função $U_{bcl}(t)$, o que é possível observar na Figura (7). Deste modo, procura-se fechar os polos o mais próximo possível do zero. Sem o modelo detalhado do disjuntor é possível fechar os contatos com a tensão nula entre eles, assim foi simulado a energização com o disjuntor detalhado e sem ele.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE ENERGIZAÇÃO

Com objetivo de identificar os piores casos de sobretensão durante a energização da linha de transmissão que interliga Milagres a São João do Piauí, foi feita uma simulação no software ATP, utilizando a chave estatística. A simulação seguiu as premissas mostradas na seção 3.3 deste trabalho. A Tabela 6 apresenta os principais parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 6 – Principais parâmetros de simulação

Parâmetro	Descrição
Passo de Integração	10^{-6}
Tempo de Simulação (s)	2,0
Tipo de Simulação	Domínio do Tempo
Instante de Fechamento do Disjuntor (s)	0,5
Distribuição	Gaussiana
Desvio (s)	0,0055

Ao final da simulação dos duzentos casos o programa gera, como resultado, uma análise estatística informando a média das tensões máximas de cada caso, assim como o desvio padrão. Como o estudo estatístico é feito por uma distribuição Gaussiana, é gerado também, uma tabela de distribuição dos picos de sobretensão, com esta tabela pode-se identificar qual foi a maior sobretensão, o pior caso.

Foram estudadas duas situações de energização:

- Situação 1: Energização da linha de transmissão por meio da barra de Milagres e com a barra de São João do Piauí sendo energizada 0.005s depois.

- Situação 2: Energização da linha de transmissão por meio da barra de São João do Piauí e com a barra de Milagres sendo energizada 0.005s depois.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos com a simulação do sistema no software ATP, sendo estes: o valor máximo de tensão do pior caso simulado, a média das tensões máximas de cada caso simulado e o seu desvio padrão. Os valores de tensão foram observados nas subestações de Milagres e de São João do Piauí, nas duas situações estudadas.

Tabela 7 – Valores de tensão e desvio padrão

ENERGIZAÇÃO POR S. J. PIAUÍ			
Subestação	Tensão Média (p.u.)	Desvio Padrão	Tensão Máxima (p.u.)
Milagres	1,88	0,241	3,22
S. J. Piauí	1,95	0,213	2,79
ENERGIZAÇÃO POR MILAGRES			
Subestação	Tensão Média (p.u.)	Desvio Padrão	Tensão Máxima (p.u.)
Milagres	1,87	0,194	2,46
S. J. Piauí	1,94	0,203	2,92

Na Tabela 7 podemos observar que os piores casos de sobretensão ultrapassam os 3 p.u., isto prova que esta linha precisa de algum método de controle de sobretensão.

Após a simulação dos duzentos casos, foram simulados os piores casos de sobretensão de cada subestação para cada situação de energização. As Figuras (8) a (12) abaixo mostram o gráfico Tensão versus Tempo da energização da linha de transmissão destes casos.

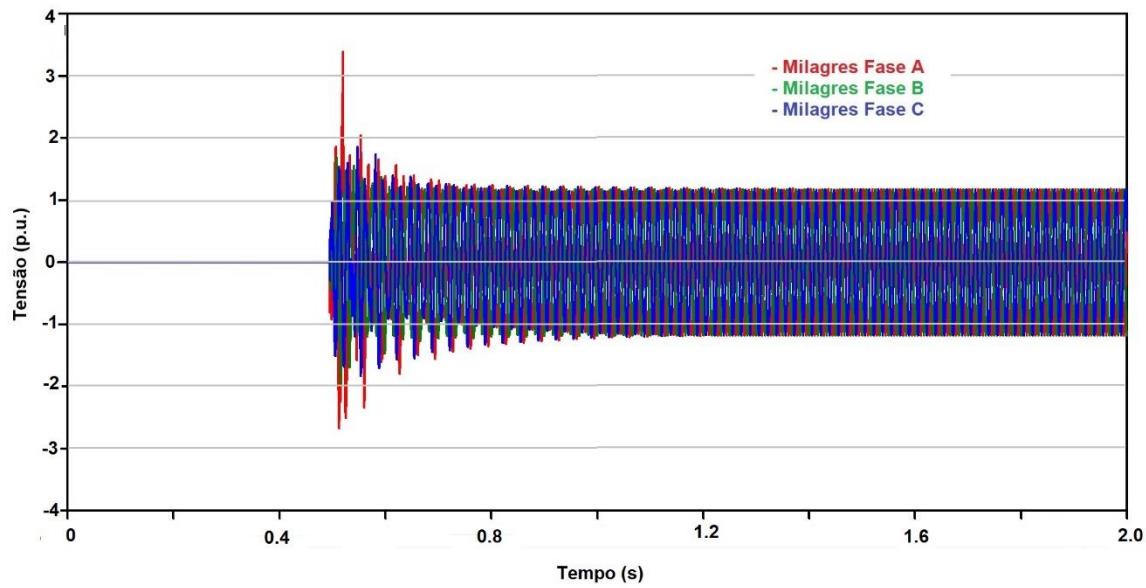


Figura (8) – Tensão medida na subestação Milagres – Energização por S. J. Piauí

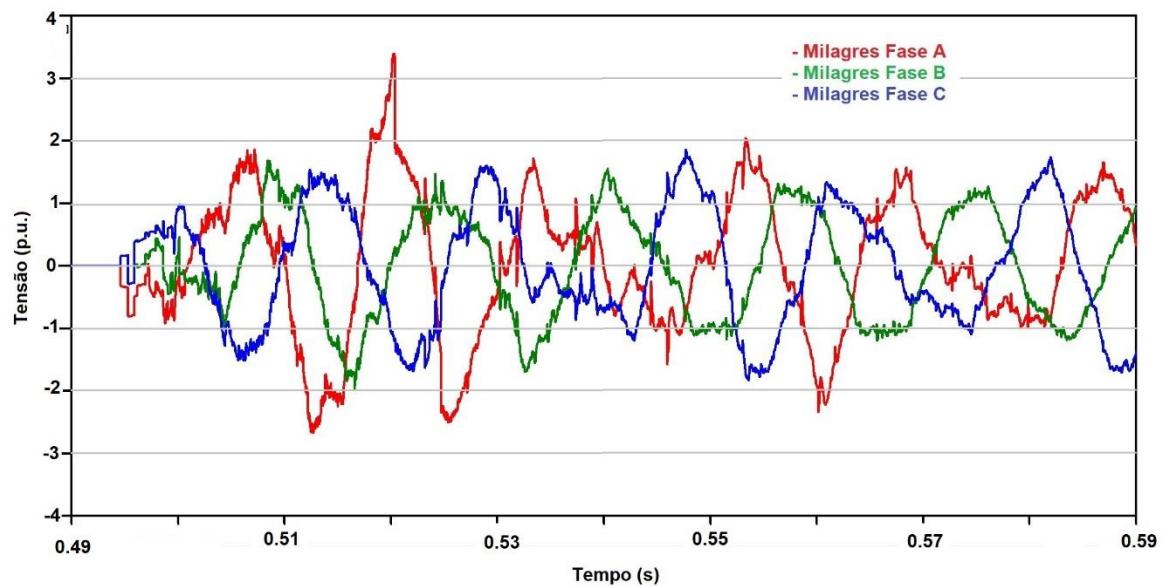


Figura (9) – Detalhe Tensão medida na subestação Milagres – Energização por S. J. Piauí

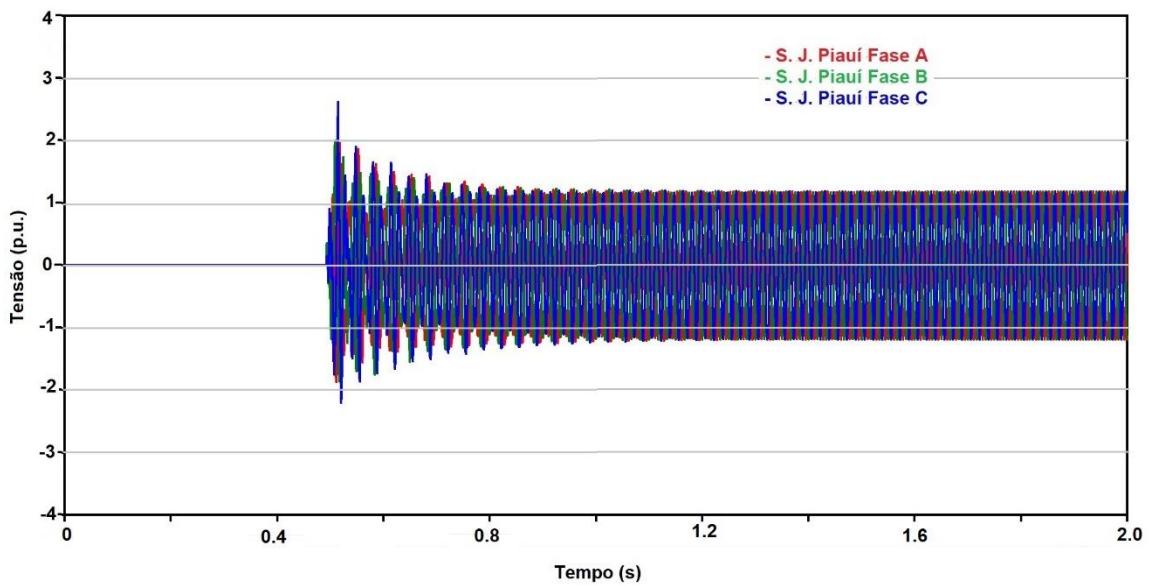


Figura (10) – Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por S. J. Piauí

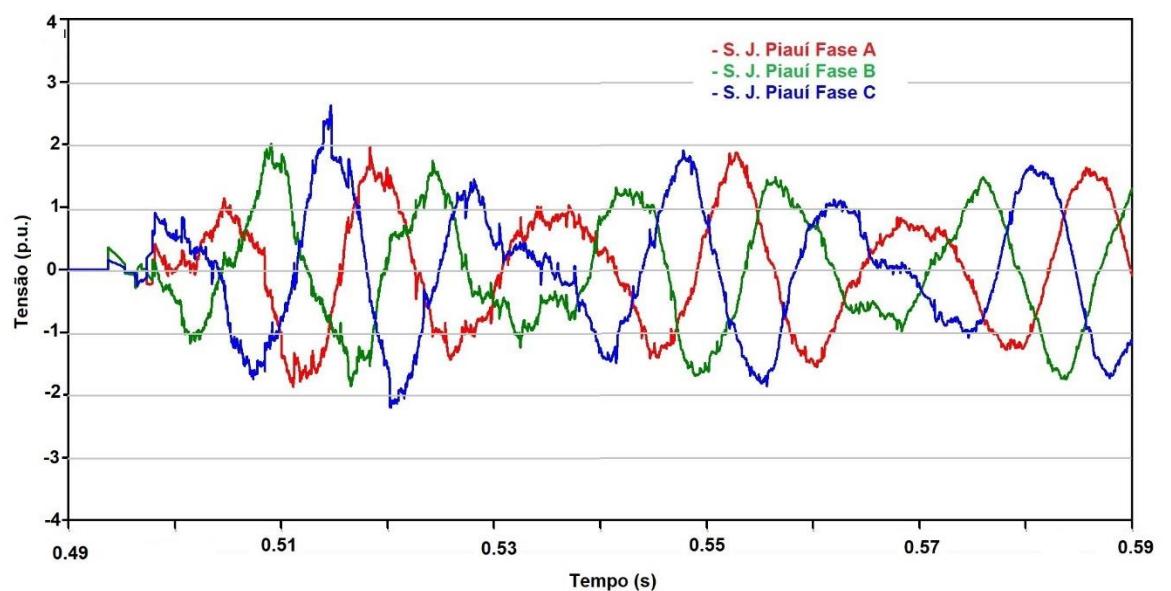


Figura (11) – Detalhe Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por S. J. Piauí

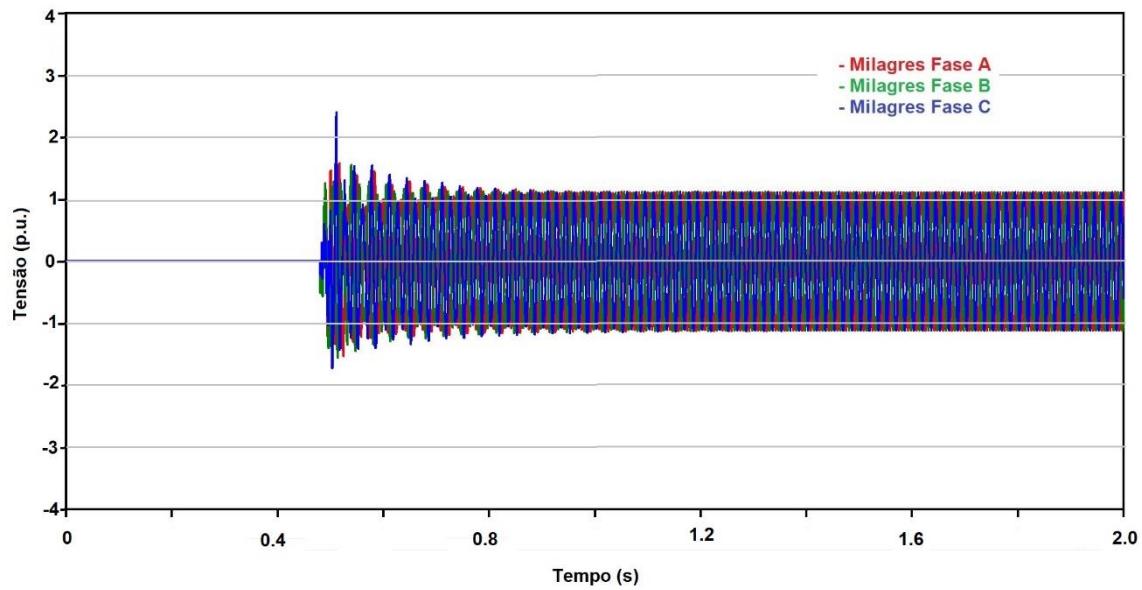


Figura (12) – Tensão medida na subestação Milagres - Energização por Milagres

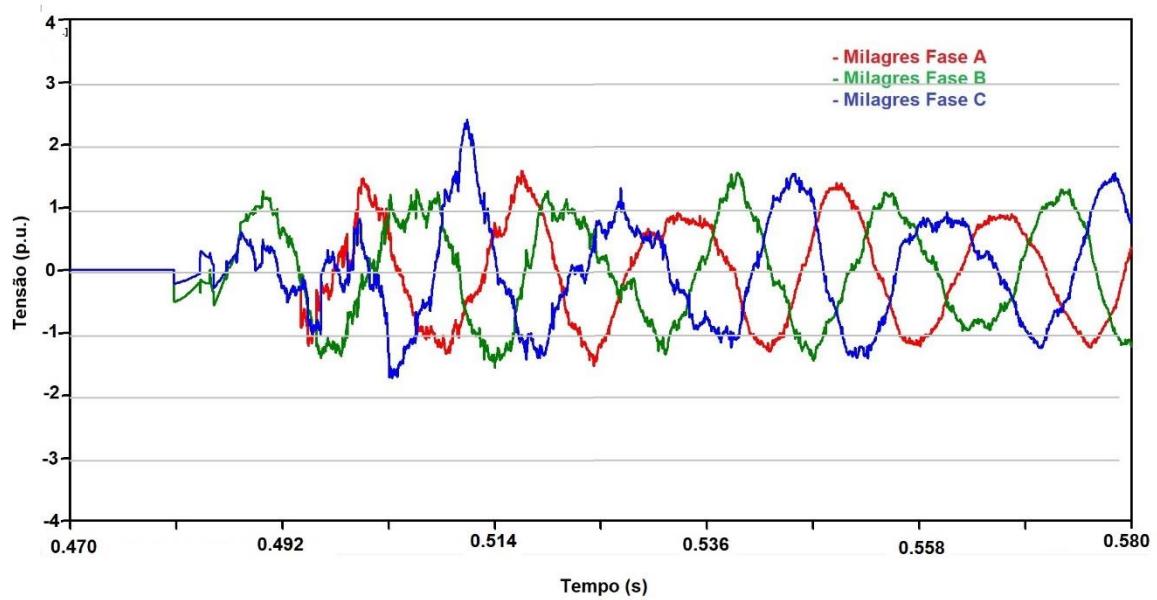


Figura (13) – Detalhe. Tensão medida na subestação Milagres – Energização por Milagres

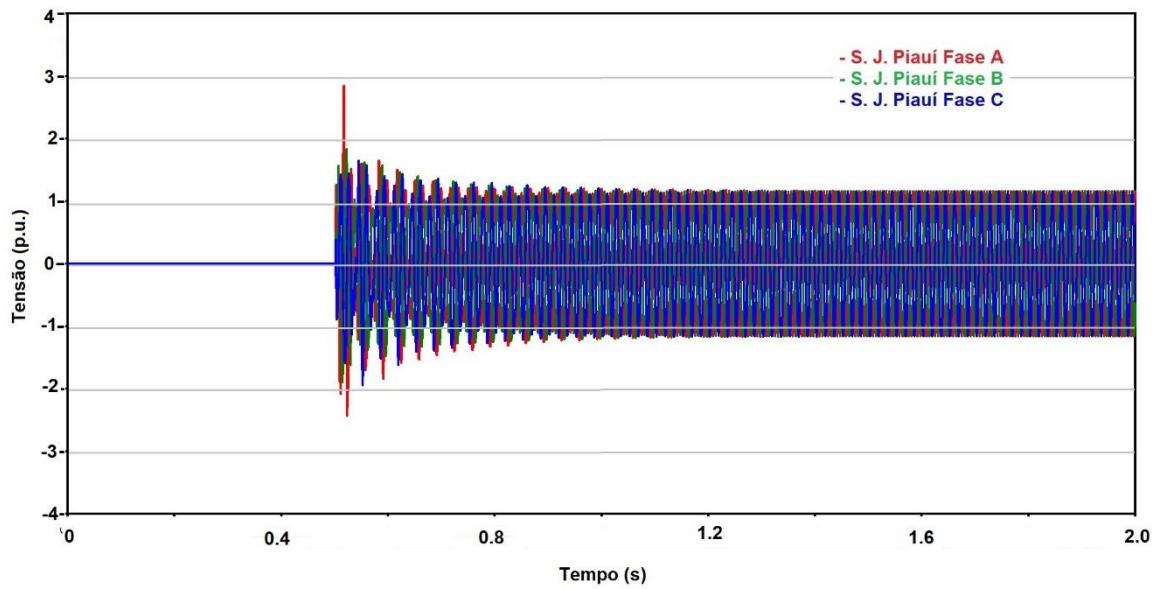


Figura (14) – Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por Milagres

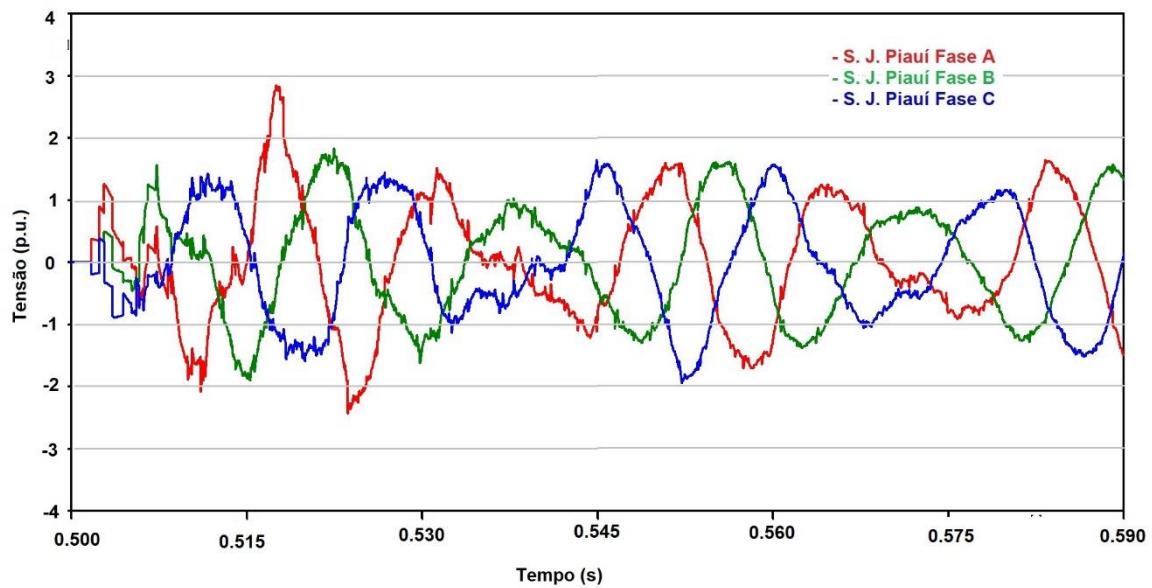


Figura (15) – Detalhe. Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Energização por Milagres

4.2 RESULTADOS DO CONTROLE DE SOBRETENSÃO

Nesta seção apresenta-se os resultados das simulações feitas com o método de chaveamento controlado. O método chaveamento controlado foi aplicado com e sem o modelo detalhado do disjuntor, uma vez que com este modelo não foi possível, como explicado na seção 3.4.2, fechar os contatos do disjuntor no momento ideal, tensão nula entre os contatos. Assim executando a simulação de energização com o chaveamento controlado sem o modelo detalhado do disjuntor é possível comparar a eficiência do método com o modelo do disjuntor com o disjuntor ideal.

Na seção anterior foram simulados dois tipos de situação, energizando a linha pela barra de Milagres e pela barra de São João do Piauí. Porém existe um acoplamento magnético muito forte entre as fases, assim a energização da linha foi feita por milagres e logo em seguida os contatos do disjuntor da barra de S. J. Piauí foram fechados, ambos no melhor momento possível. Desta forma evita-se que o efeito do acoplamento magnético aumente muito, tornando a passagem pelo instante ótimo imprevisível.

As figuras a seguir apresentam o momento em que ocorreu o chaveamento controlado com e sem o modelo detalhado de disjuntor.

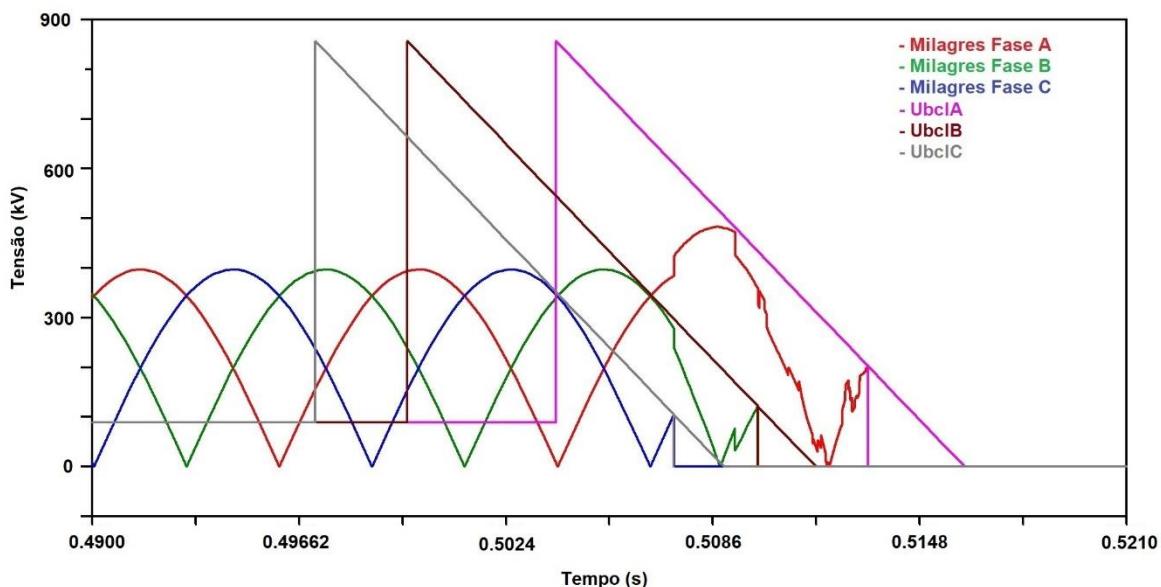


Figura (16) – Tensão entre os contatos do disjuntor na Barra de Milagres no momento do chaveamento controlado – Com modelo detalhado do disjuntor

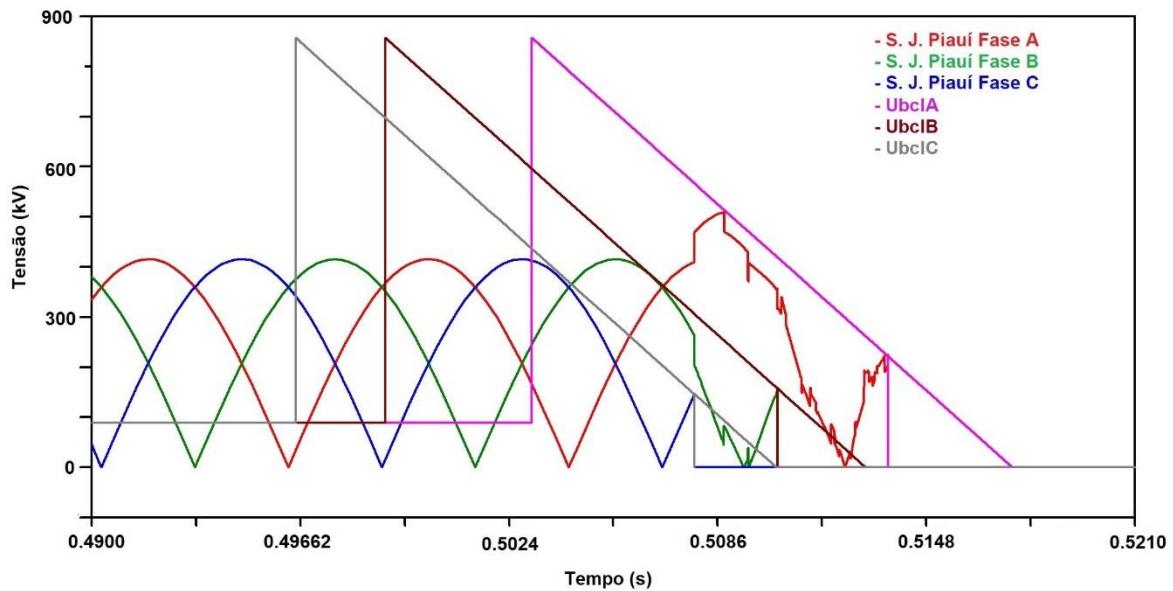


Figura (17) – Tensão entre os contatos do disjuntor na Barra de S.J. Piauí no momento do chaveamento controlado – Com modelo detalhado do disjuntor

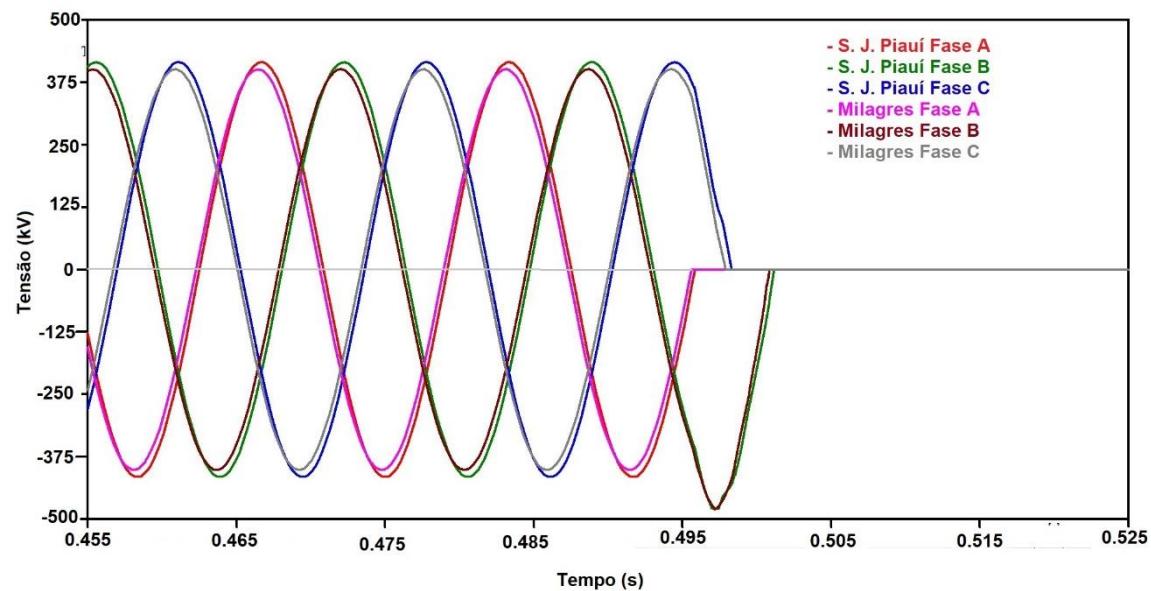


Figura (18) – Tensão entre os contatos do disjuntor na Barra de Milagres no momento do chaveamento controlado – Com modelo detalhado do disjuntor

É apresentado na Tabela 8 tensões obtidas em cada caso simulado, e em seguida a Tabela 9 apresenta as reduções das sobretensões em relação aos piores casos de energização quando o método de chaveamento controlado é utilizado junto do modelo detalhado do disjuntor e sem o modelo.

Tabela 8 – Valores de tensão obtidos nas simulações

Energização	Barra	Sem Chaveamento Controlado (pior caso)	Chaveamento Controlado	
			Com Modelo Detalhado do Disjuntor	Sem Modelo Detalhado do Disjuntor
São João do Piauí	Milagres	3,22 p.u.	1,80 p.u.	1,70 p.u.
	São João do Piauí	2,79 p.u.	1,86 p.u.	1,68 p.u.
Milagres	Milagres	2,46 p.u.	1,80 p.u.	1,70 p.u.
	São João do Piauí	2,92 p.u.	1,86 p.u.	1,68 p.u.

Tabela 9 – Redução das sobretensões obtidas com o chaveamento controlado

Energização	Barra	Chaveamento Controlado	
		Com Modelo Detalhado do Disjuntor	Sem Modelo Detalhado do Disjuntor
São João do Piauí	Milagres	44%	47%
	São João do Piauí	33%	40%
Milagres	Milagres	27%	31%
	São João do Piauí	37%	42%

Nas Tabelas 8 e 9 pode-se observar que o chaveamento controlado conseguiu reduzir as sobretensões e que com modelo detalhado do disjuntor o método tem uma eficiência menor na redução das sobretensão, porem mesmo com uma eficiência menor, foi obtido uma redução de 44% em relação ao pior caso.

As Figuras (19) a (22) abaixo mostram o gráfico Tensão versus Tempo da energização da linha de transmissão utilizando o método de chaveamento controlado e com o modelo detalhado do disjuntor. Nelas pode-se observar que o pico de tensão nos instantes iniciais é menor que nos piores casos simulados, e que as ondas tensão têm formatos mais uniformes, o que mostra uma redução da superposição de ondas.

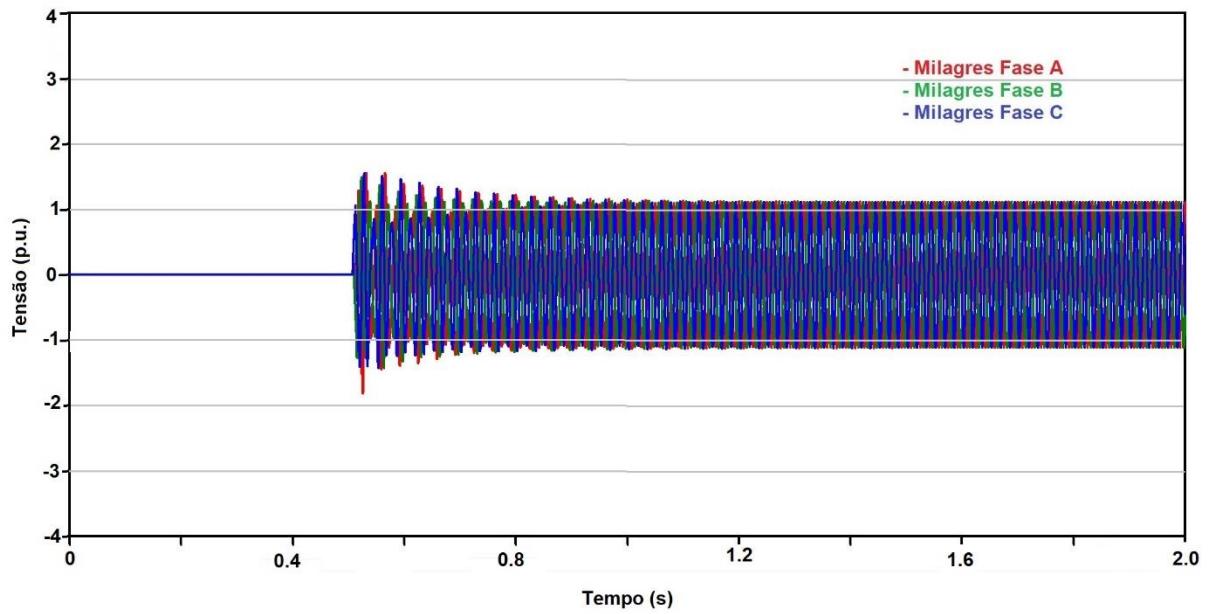


Figura (19) – Tensão medida na subestação Milagres – Com Modelo detalhado do disjuntor

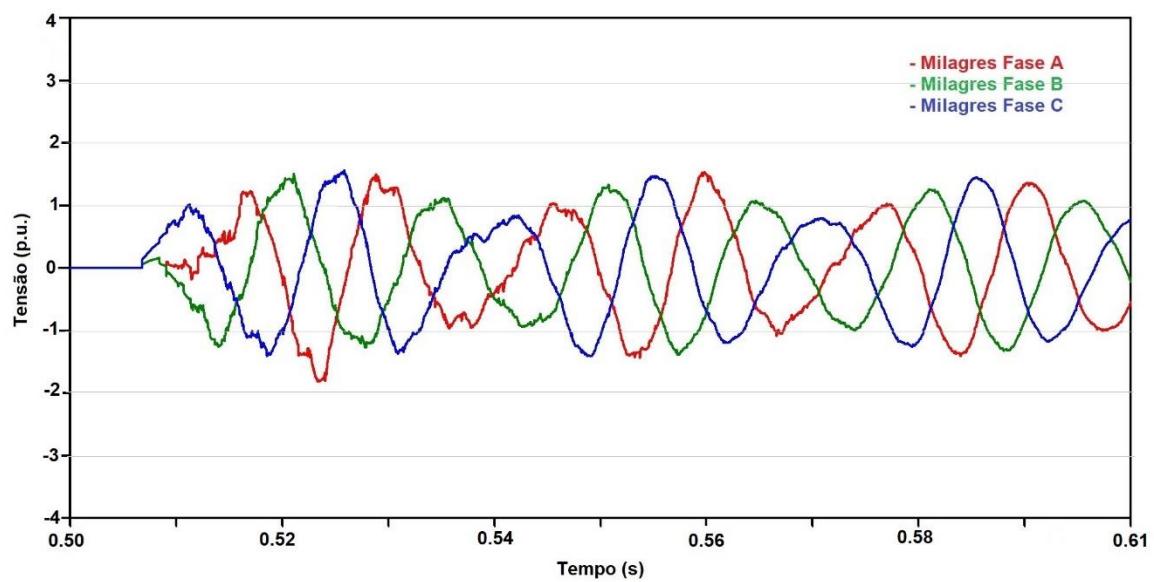


Figura (20) – Detalhe da tensão medida na subestação Milagres – Com Modelo detalhado do disjuntor

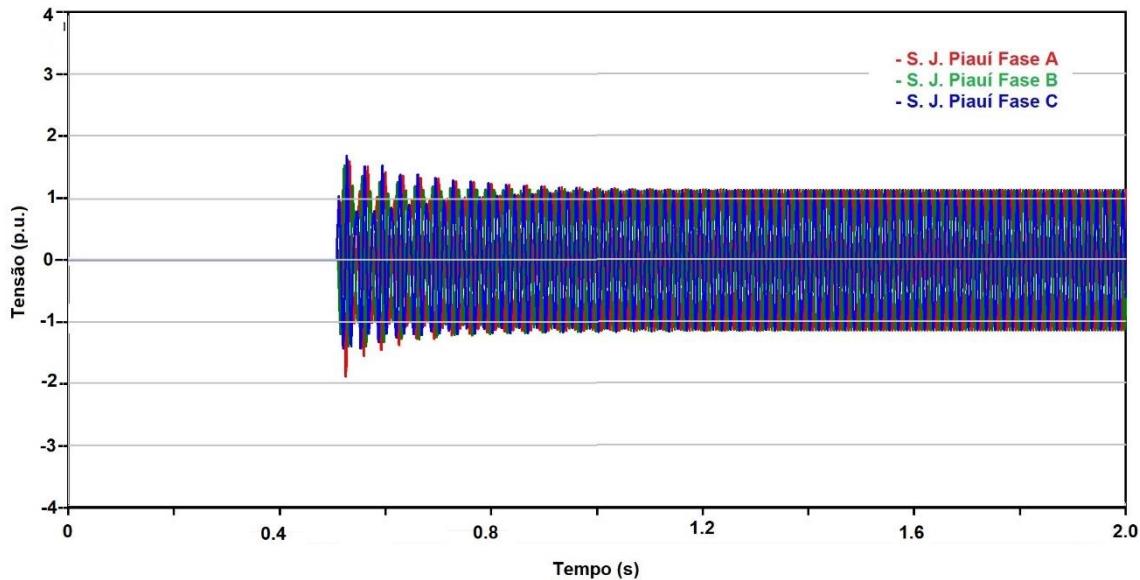


Figura (21) – Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Com Modelo detalhado do disjuntor

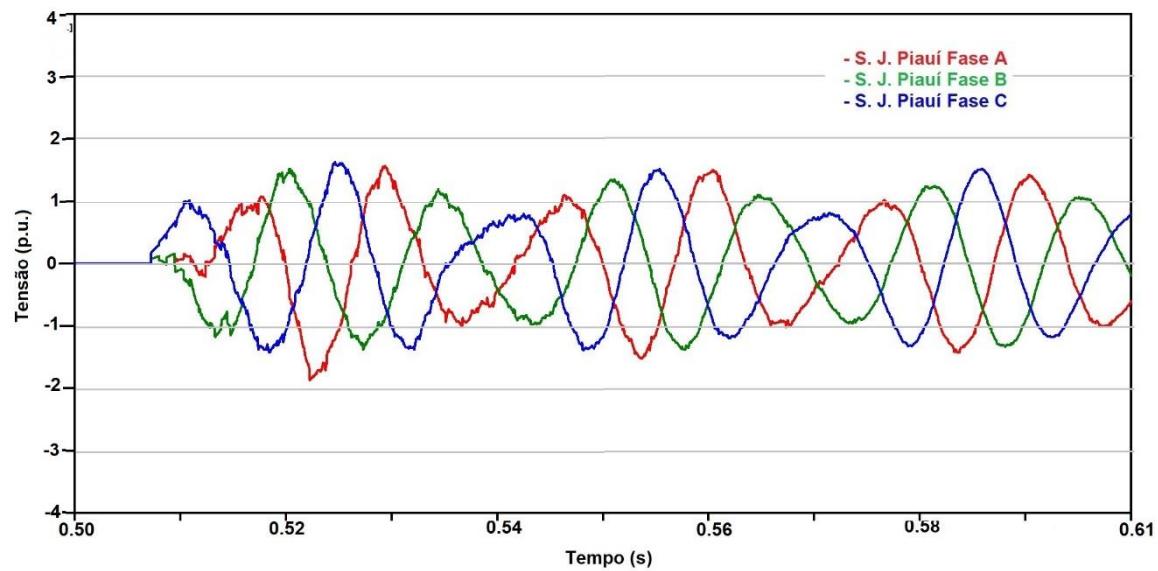


Figura (22) – Detalhe da tensão medida na subestação S. J. Piauí – Com Modelo detalhado do disjuntor

As Figuras (23) a (26) mostram o gráfico Tensão versus Tempo da energização da linha de transmissão utilizando o método de chaveamento controlado e sem o modelo detalhado do disjuntor.

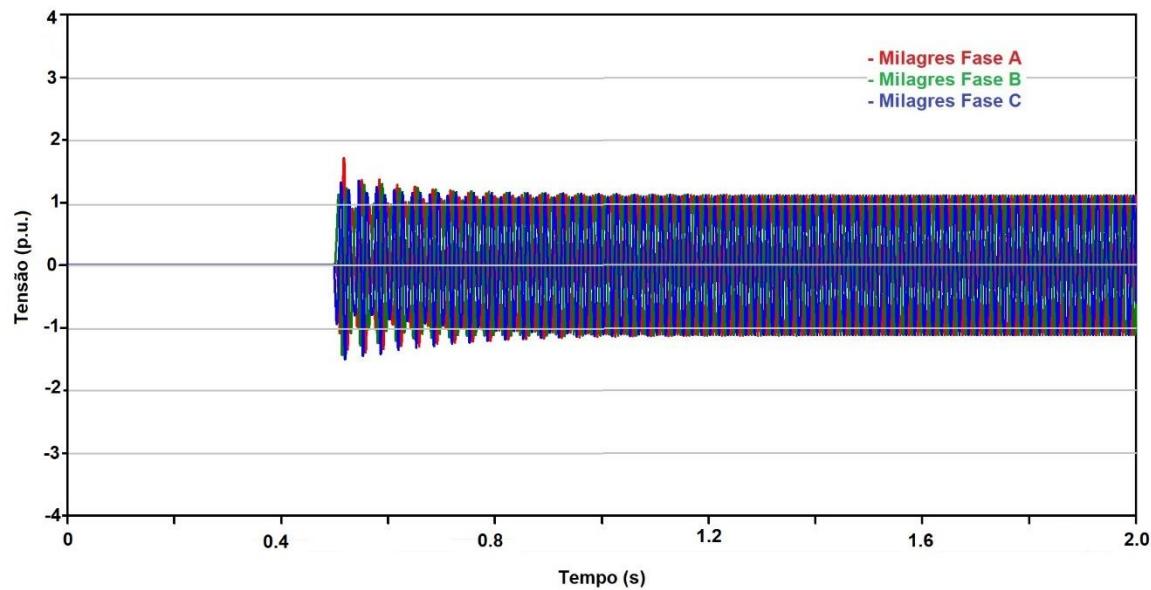


Figura (23) – Tensão medida na subestação Milagres – Sem Modelo detalhado do disjuntor

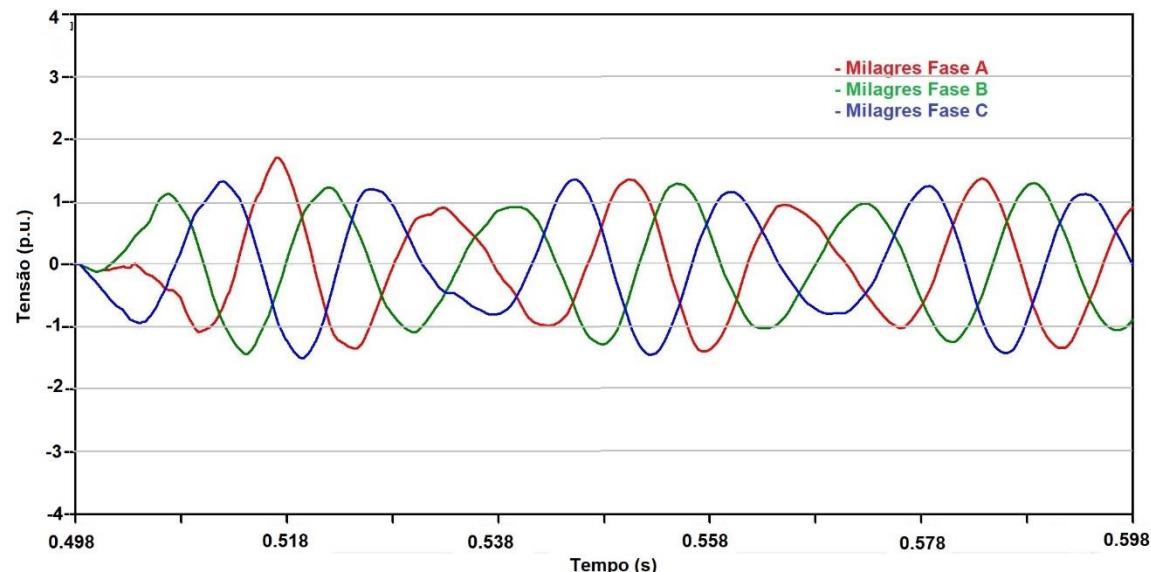


Figura (24) – Detalhe da tensão medida na subestação Milagres – Sem Modelo detalhado do disjuntor

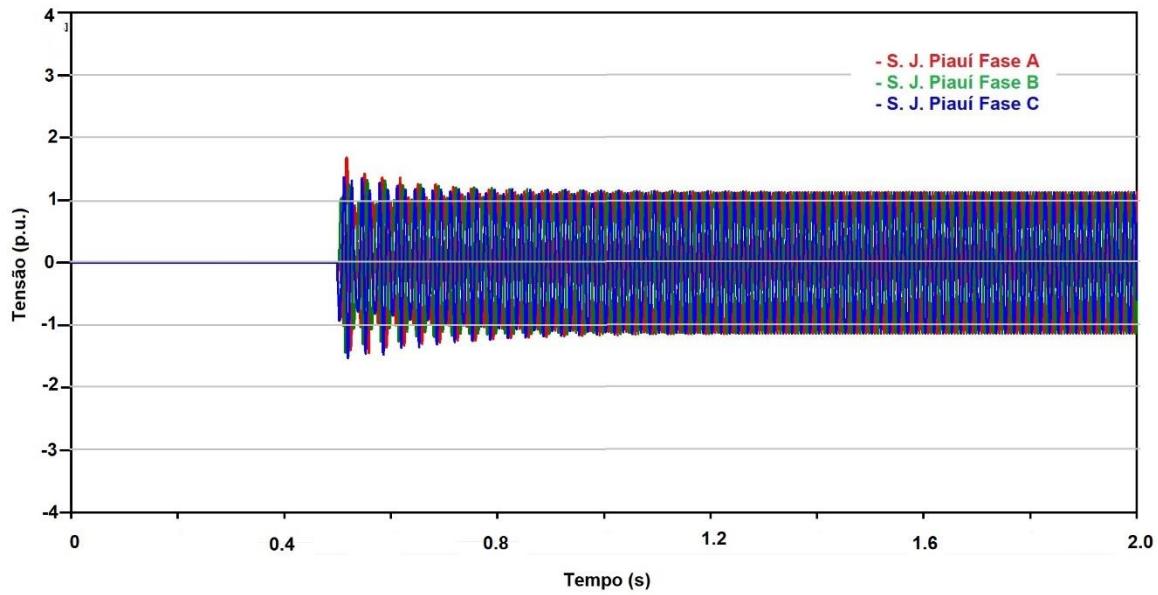


Figura (25) – Tensão medida na subestação S. J. Piauí – Sem Modelo detalhado do disjuntor

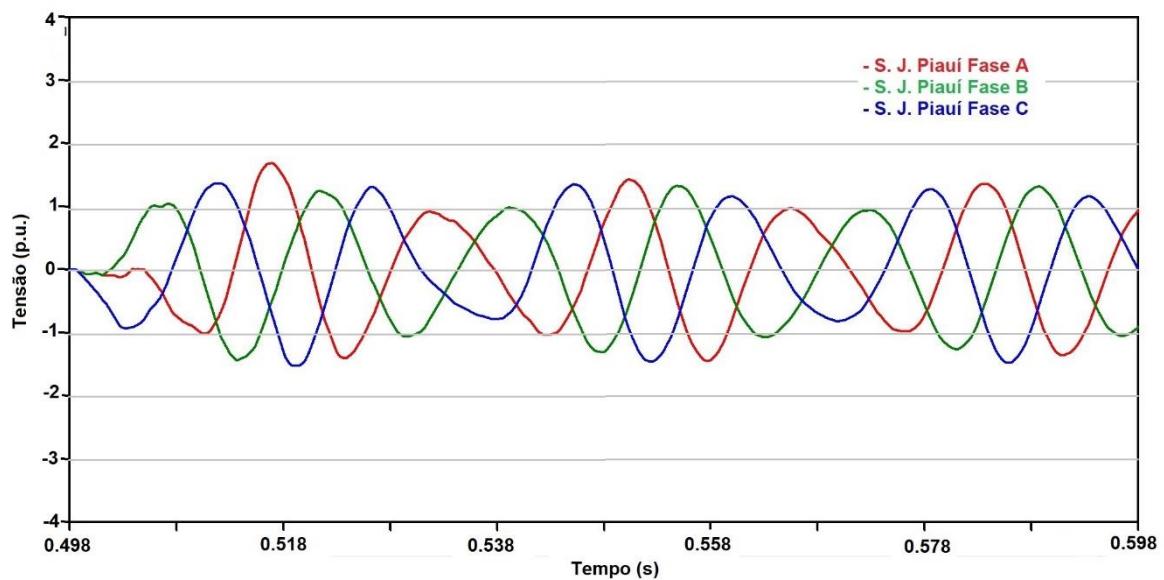


Figura (26) – Detalhe da tensão medida na subestação S. J. Piauí – Sem Modelo detalhado do disjuntor

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o estudo de energização de linha de transmissão e aplicação do método de chaveamento controlado com e sem o modelo detalhado do disjuntor, executados no programa ATP.

As simulações de energização apresentadas neste trabalho de conclusão de curso mostraram, como os demais estudos desta linha de transmissão, que existe a necessidade de um método para limitar ou mitigar a tensão de surtos durante as manobras de energização. Uma vez que as simulações mostraram que, dependendo do instante do chaveamento, a sobretensão de manobra pode ultrapassar 3 p.u..

Como apresentado na tabela 9, conseguiu-se uma redução de até 44% utilizando o modelo detalhado do disjuntor e uma redução de até 47% sem utilizar o modelo.

Assim, pode-se concluir que o método de chaveamento controlado foi eficaz para a redução de sobretensões, e com o modelo detalhado do disjuntor houve uma redução satisfatória.

6 BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia.** Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.

BAK, L. et al. *Vacuum circuit breaker modelling for the assessment of transient recovery voltages: Application to various networks configurations.* *Electric Power Systems Research*, n. 156, p. 35 – 43, 2018

CIGRE Working Group 13.07. *Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers* - 1st Part. ELECTRA, n. 183, p. 42–73, April 1999.

D'AJUZ, A. et al. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: aplicação em sistema de potência de alta-tensão.** Rio de Janeiro, FURNAS, Niterói. Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão.** 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão.** (Tese de Doutorado) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

DUFOURNET, D. *Transient Recovery Voltages (TRVs) for High Voltage Circuit Breakers* – Areva, 2008

EEUG. ATP – Alternative Transient Program - Rule Book. Bruxelas, Belgica: Leuven EMTP Center, 1987.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas,** Volume 1, 3a edição. Uberlândia, Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 2015

GREGORY, R. C. F. **Análise Computacional do Desempenho de Estratégia para o Religamento Controlado de Linhas de Transmissão** (Dissertação de Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2016

LEGATE, A. C.; BRUNKE, J. H.; RAY, J. J.; YASUDA, E. J. ***Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers – IEEE Transaction on Power Delivery***, vol 3, n. 1, pp 223-231, 1988

ONS. Submódulo 23.3 – **Diretrizes e critérios para estudos elétricos**. Rev, 2.0. 2011.

REIS, A. et al. **Curso de ATPDraw**. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG, 2013.

ROHANI, R.; PORKAR, B. ***Improved EHV line switching surge control via controlled switching technique***, 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India, New Delhi, 2010, pp. 1-4.

SEYEDI, H.; SANAYE-PASAND, M.; DADASHZADEH, M. ***Application of Transmission Line Surge Arresters to Reduce Switching Overvoltages***. International Conference on Power Systems Transients (IPST), Montreal, Canada, 2005.

SOARES, G. B. **Análise de Energização e Religamento de Linha de Transmissão no Software ATP**. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, 2017

SANT'ANA, E. S. **Sobretensões de Energização de Linha de Transmissão**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

VALERO, P. M. Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

