



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPOS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICHARDSON RIBEIRO DE ASSUNÇÃO ANCHIETA

ESTUDO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE TRANSMISSÃO LONGAS

PALMAS – TO

2019

RICHARDSON RIBEIRO DE ASSUNÇÃO ANCHIETA

ESTUDO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE TRANSMISSÃO LONGAS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profª. Msc. Gisele S. Parmezzani Marinho.

PALMAS – TO
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A539e Anchieta, Richardson Ribeiro de Assunção.
Estudo do Efeito Ferranti em linhas de transmissão longas. /
Richardson Ribeiro de Assunção Anchieta. – Palmas, TO, 2019.
50 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins –
Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica,
2019.

Orientadora : Gisele Sousa Parmezzani Marinho

1. Efeito Ferranti. 2. Linhas de transmissão longas. 3. Energia
reativa. 4. Reator Shunt. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que
citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da
UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

FOLHA DE APROVAÇÃO

RICHARDSON RIBEIRO DE ASSUNÇÃO ANCHIETA

ESTUDO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE TRANSMISSÃO LONGAS

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 15 / 04 / 2019

Banca Examinadora

Prof. Ma. Gisele Souza Parmezzani Marinho, UFT.

Prof. Me. Alcy Monteiro Júnior, UFT.

Prof. Dr^a. Stefani Caroline Leal de Freitas, UFT.

Palmas-TO, 2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, fonte inesgotável de força, amor e justiça.

Aos meus pais, pelo exemplo e educação que me deram, além de não medirem esforços para que eu alcançasse o objetivo de ser Engenheiro Eletricista. Pelo amor incondicional que sempre tive deles. Pela esperança e confiança que sempre depositaram em mim e nas minhas escolhas.

A minha mulher Thamirys, pelo apoio, confiança e esperança que sempre me mostrou durante o período da graduação, e o entendimento da distância que nos separavam.

A minha filha Isabella, que mesmo pequena e sem entender sempre foi minha maior força desde que veio ao mundo e tornou esse caminho de graduação mais ainda significativo em minha vida.

A minha família, pelo incentivo emocional e financeiro que mesmo sem obrigação sempre me proporcionaram. Pelo o carinho e afeto que recebi de cada um durante a caminhada.

Aos meus amigos, pelo suporte, conselhos e ensinamentos que compartilhamos na universidade.

A professora Gisele, pela orientação e dedicação nesse trabalho e seus ensinamentos dentro do ambiente acadêmico e na área de estudo.

RESUMO

O controle de tensão em sistemas de grandes extensões de transmissão é uma preocupação de bastante importância para a flexibilidade, segurança e confiabilidade da rede. Interrupções no fornecimento de energia elétrica geram grandes prejuízos tanto para os consumidores finais, quanto para as concessionárias distribuidoras de energia elétrica, e essas interrupções devem ser evitadas ao máximo, pois as empresas responsáveis pelo serviço de transmissão de energia elétrica é regulamentada e fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL aplicando penalidades as mesmas prezando pela qualidade do serviço prestado. O emprego de linhas de transmissão longas é uma prática bastante comum dentro do país quando não se tem fonte de geração de energia próximo do centro de consumo. No Brasil a concentração de consumo de energia ocorre em regiões específicas no território e as gerações se constituírem em grande relevância e por aproveitamentos hídricos em localidades distantes e contrárias ao consumo. Uma das singularidades dos sistemas de transmissão de extensões longas, em alta tensão, está atrelada com as dificuldades associadas com o controle e regulação de tensão oferecida nas barras de consumo. Na operação em vazio ou em carga leve, vigente por ocasião das energizações ou devido a rejeições de carga, as capacitâncias associadas a essas linhas impõem, por vezes, elevações inadmissíveis na tensão das barras de consumo. Dentro do SEP, há diversos equipamentos fundamentais para garantir a qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor. Um desses dispositivos é o reator *shunt*, que tem uma das suas funções principais a regulação da tensão na linha de transmissão, por meio da compensação do excesso de reativos em linhas de transmissão de grandes extensões. Neste trabalho, realizou-se a análise da tensão causada pelas linhas de transmissão trabalhando a vazio, e consequentemente seu comportamento após a inserção dos reatores *shunt* para a redução da mesma a níveis acessíveis. Utilizou-se o software *Alternative Transients Program* – ATP para a simulação dos resultados e comparação dos evidenciando a problemática.

PALAVRAS-CHAVES: SEP, ANEEL. Reatores *Shunt*. Linhas de Transmissão Longas. Barras de consumo. ATP.

ABSTRACT

Voltage control in large transmission systems is a major concern for network flexibility, security and reliability. Interruptions in the supply of electric power generate great damages for both the final consumers and the concessionaires of electric power, and these interruptions should be avoided to the maximum, since the companies responsible for the electric power transmission service is regulated and supervised by the Agency National Electric Power - ANEEL applying the same penalties for the quality of the service provided. The use of long transmission lines is a common practice in the country when there is no source of power generation near the center of consumption. In Brazil the concentration of energy consumption occurs in specific regions in the territory and the generations are of great relevance and by water use in distant and anti-consumption locations. One of the singularities of high voltage long extension transmission systems is linked to the difficulties associated with the control and voltage regulation offered in the consumer bars. In the case of unloaded or light load operation, which is in force during the energisations or due to load rejections, the capacitances associated with these lines sometimes impose unacceptable increases in the voltage of the bus bars. Within the SEP, there are several fundamental equipment to guarantee the quality of the electricity delivered to the consumer. One of these devices is the shunt reactor, whose main function is to regulate the voltage in the transmission line by compensating for excess reactive power in large transmission lines. In this work, we performed the analysis of the voltage caused by the transmission lines working in vacuum, and consequently their behavior after the insertion of the shunt reactors to the reduction of the same to accessible levels. We used the software Alternative Transients Program (ATP) to simulate the results and compare them to the problem.

KEY-WORDS: SEP. ANEEL. Shunt reactors. Long Transmission Lines. Consumption bars. ATP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Porcentagem de carga por subsistema.....	12
Figura 2 – Transmissor e receptor.....	19
Figura 3 – Circuito a parâmetros distribuídos.....	19
Figura 4 – Elevação da tensão por efeito “Ferranti”.....	20
Figura 5 – Reatores shunt trifásicos com e sem circuito de retorno magnético.....	22
Figura 6 – Reator a seco com núcleo de ar enrolamento aberto.....	23
Figura 7 – Reator a seco com núcleo de ar enrolamento encapsulado.....	23
Figura 8 – Posições de conexão de reatores shunt ao sistema elétrico de potência.....	25
Figura 9 – Linha de transmissão com compensação reativa através de reatores <i>shunt</i>	26
Figura 10 – Reator shunt de 765 kV instalado na subestação de Foz do Iguaçu.....	27
Figura 11 – Formas de instalação do RLC nas subestações.....	29
Figura 12 – Reator Limitador de Corrente da SE de Tucuruí 500 kV.....	30
Figura 13 – Torre de transmissão com disposição de fases triangular.....	32
Figura 14 – Software ATPdraw, escolha da torre de transmissão.....	33
Figura 15 – Configuração dos dados do sistema.....	34
Figura 16 - Configuração dos dados do sistema.....	35
Figura 17 – Software ATPdraw, escolha da fonte de tensão.....	36
Figura 18 – Rede de transmissão levemente carregada.....	37
Figura 19 – Gráfico da tensão na fonte e no final da linha a vazio.....	38
Figura 20 – Aumento da tensão ao longo do comprimento da linha	40
Figura 21 – Aumento da tensão no Receptor.....	40
Figura 22 – Corrente da fonte e do receptor.....	41
Figura 23 – Tensão na fonte e no final da linha com a corrente da fonte.....	42
Figura 24 - Indutância do Reator Shunt.....	43
Figura 25 – Linha de transmissão com reator no final da rede.....	43
Figura 26 – Gráfico da redução da tensão no final da rede usando reator.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores das componentes para parametrização da torre de transmissão.....	34
Quadro 2 – Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 KV... <td>38</td>	38
Quadro 3 – Aumento da tensão ao longo do comprimento da linha.....	39

LISTA DE ABREVIASÕES E SIGLAS

ATP – *Alternative Transients Program*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

MME – Ministério de Minas e Energia

DNAEE – Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica

ONS – Operador Nacional do Sistema

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIN – Sistema Interligado Nacional

SIPOT – Sistema de Informações do Potencial Hidroelétrico

LT – Linha de Transmissão

Var – Volt ampere reativo

CA – Corrente Alternada

RLC – Reator Limitador de Corrente

EAT – Extra Alta Tensão

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Justificativa	13
1.2.	Objetivos	14
1.2.1.	Objetivo Geral	14
1.2.2.	Objetivos Específicos	14
1.3.	Metodologia	14
1.4.	Estrutura do Trabalho	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	Competência	16
3.	LINHAS DE TRANSMISSÃO	19
3.1.	Efeito Ferranti	20
4.	REATORES	22
4.1.	Reatores <i>Shunt</i>	25
4.2.	Outras Aplicações dos Reatores	27
4.2.1.	Reatores Limitares de Corrente	28
4.2.2.	Reatores associados com banco de capacitores	30
5.	SIMULAÇÃO, RESULTADOS E ANÁLISES	32
5.1.	Escolhas dos Componentes	32
5.2.	Linha de transmissão	32
5.3.	Fonte	35
5.4.	Implementação do circuito no software	36
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6.1.	Trabalhos Futuros	46
7.	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	48

1. INTRODUÇÃO

O controle de tensão e a compensação de potência reativa em sistemas de transmissão em alta tensão, principalmente quando envolvem longas distâncias, é uma questão vital para a flexibilidade, segurança e economicidade do próprio sistema. Questões como a estabilidade dinâmica, a regulação de tensão e o nível das sobretensões estão intimamente ligadas ao tipo e ao grau de compensação reativa empregada.

Conforme Brasil (1996), relata em seu trabalho, uma busca maior pela eficácia dos sistemas de transmissão, ou seja, aplicar um mínimo gasto no cumprimento dos objetivos, fez com que surgisse novas concepções em linhas de transmissão em extra e ultra alta tensão, como por exemplo, as linhas compactas e linhas de potência natural elevada. Estas linhas de grandes extensões, por sua vez, apresentam uma produção de potência reativa capacitativa substancialmente maior que as linhas de transmissão convencionais. Desta forma a aplicação de reatores em derivação nestas linhas, para permitir a energização das mesmas e auxiliar no controle de tensão no sistema tanto em regime permanente, com em temporário e transitório, seria uma das soluções do problema.

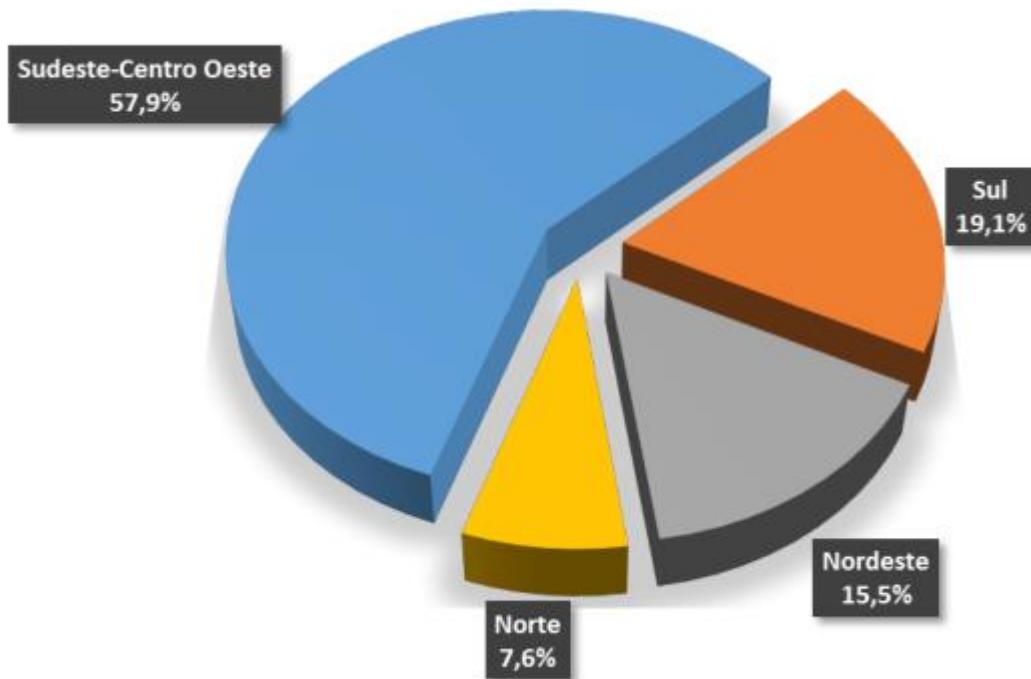
Com o crescimento demográfico do Brasil, relacionado ao continuo desenvolvimento econômico e tecnológico, favoreceu o aumento das atividades dos setores industriais, comercial e de serviços, causando o surgimento de diversos centros de consumidores de energia elétrica, que é de fundamental importância para que essas atividades sejam exercidas. Nessa contextualização, para garantir a demanda energética faz-se necessária a construção dessas linhas longas, pois geralmente as fontes hídricas no nosso território estão longes dos grandes centros de consumo. No Brasil, para interligar essas unidades consumidoras, houve a criação do Sistema Interligado Nacional – SIN.

De acordo Mendes (2017), outra observação intrigante está relacionada com a localização de onde explorar o potencial enérgico de geração em hidroelétricas. Empresas como a Eletrobrás, em um estudo levantado em 2016 no Sistema de Informações do Potencial Hidroelétrico – SIPOT, conclui que o país possui um montante de 72,4 GW em inventário e, um adicional de 46,1 GW estimados. Onde os

maiores potenciais estudados estão localizados na Região Norte com cerca de 67,7 GW.

Em discordância disso, a grande parte dos consumidores nacionais encontram-se longes dos locais com maior fluxo de potencial energético, uma vez que as regiões Sudeste e Centro Oeste predominam um montante de carga consumida representada em 57,9 % do total da demanda do SIN, onde em comparação com a região Norte que tem uma demanda de 7,58 %, essa observação é facilmente identificada na Figura 1.

Figura 1 – Porcentagem de carga por subsistema.



Fonte: Mendes, 2017.

Como observa-se nessa figura, e com o expressado anteriormente, o perfil da geração é bem distante das regiões de maior consumo, essa característica é igualmente verificada em outros países que possuem grandes extensões, como os casos da Rússia, China e Índia.

De frente dessa problemática, e analisando os desafios enfrentados à transmissão de uma grande quantidade de energia a distâncias da ordem de 250 km, é preciso um estudo critico de uma alternativa que venha a viabilizar a operação desse tipo de sistema, visando a confiabilidade e segurança da rede.

Segundo Rodrigues e Silva (2014), as linhas longas (maiores que 250 km), usualmente de alta e extra-alta tensão, apresentam elevado acoplamento capacitivo entre fases e entre fase e solo, como citado por (Brasil) anteriormente, esse efeito gera um significativo aumento da tensão 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. Para minimizar os inconvenientes da utilização de linhas de transmissão cada vez mais longas e propiciar ao sistema um melhor funcionamento, utiliza-se banco de reatores em série ou paralelo (ou shunt). O banco de reatores, se instalado em série com a linha, contribui para limitar a corrente de curto-círcuito na mesma, já que a impedância série equivalente dessa combinação tende a ser maior. Para o caso dos reatores instalados em paralelo, a regulação de tensão da linha é feita por meio da absorção do excesso de reativos.

Neste trabalho, realizou-se a análise da tensão causada pelas linhas de transmissão trabalhando a vazio ou sobre cargas leves, e consequentemente seu comportamento após a inserção dos reatores *shunt* para a redução da mesma a níveis acessíveis. Utilizou-se o software *Alternative Transients Program – ATP* e os resultados obtidos aproximam-se das situações reais.

1.1. Justificativa

O Sistema Elétrico Brasileiro - SEP, devido as longas extensões territoriais, constitui-se num país em que o emprego de linhas de transmissão em grandes distâncias é uma prática bastante comum, pois normalmente as fontes de geração estão distantes dos centros de consumo. Isto se deve, sobremaneira, ao fato da concentração do consumo de energia ocorrer em regiões específicas e as gerações se constituírem, predominantemente, por aproveitamentos hídricos distantes. Ora, uma das singularidades dos sistemas de transmissão longos, em alta tensão, está atrelada com as dificuldades associadas com o controle e regulação de tensão oferecida nas barras de consumo, tanto em regime permanente como transitório. Na operação em vazio ou em carga leve, vigente por ocasião das energizações ou devido a rejeições de carga, as capacitâncias associadas a essas linhas impõem, frequentemente, elevações inadmissíveis na tensão das barras de consumo.

Para solucionar a questão, as soluções, normalmente, se apoiam em dispositivos fundamentados na compensação de reativos e um dos dispositivos empregados são os reatores *shunt* instalados em paralelo com as linhas. De fato, esta é uma prática comum entre as concessionárias responsáveis pela geração e transmissão de energia elétrica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo comentar o que gera essa elevação da tensão nas linhas de transmissão longas sob cargas leve ou pouco carregadas e suas reais consequências no controle de tensão entregadas as concessionárias de distribuição para os consumidores finais.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Simular as formas de ondas das tensões antes e após a aplicação dos reatores *shunts* em linhas a vazio ou em carga leve;
- Apresentar a necessidade desse sistema de proteção para a transmissão de energia elétrica;
- Apresentar o dispositivo de grande importância no SEP, que é o reator *shunt*, abordando suas aplicações, características construtivas e operacionais.

1.3. Metodologia

Para a realização desse trabalho foi utilizado o *software* computacional *Alternative Transients Program – ATP*. Esse *software* é livre e permite simular linhas de transmissão e as configurações de ondas antes e depois da instalação de reatores *shunt* em paralelo para a comparações das mesmas.

1.4. Estrutura do Trabalho

Esta pesquisa é composta de seis capítulos que estão correlacionados. No capítulo 1 é apresentada uma contextualização do problema do controle da tensão causada pela reatância capacitiva natural de linhas de transmissão de grandes extremidades do sistema elétrico de potência.

No capítulo 2 são apresentadas as competências e instituições que regem a fiscalização da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nacionalmente, realizadas por autarquias e sociedades civis, responsáveis pelas regulamentações desse sistema.

No capítulo 3 abordou-se um pouco de como é executado o sistema de transmissão no país através de linhas, cabos e subestações que tem como função primordial fazer a distribuição espacial da energia gerada, ou seja, interligar a geração ao consumo. Além de relatar de forma sucinta sobre o efeito Ferranti, que é provocado pela energia reativa gerada ao longo da linha longa levemente carregada.

No capítulo 4 é comentado sobre a definição de reatores shunt e também suas funções no sistema elétrico mostrando seus aspectos construtivos, suas vantagens em relação a outros dispositivos e sua instalação dentro do SEP. Ao fim do capítulo é apresentado duas importantes aplicações desse equipamento para solucionar outros problemas do sistema elétrico em alta tensão.

No capítulo 5 apresentamos os resultados encontrados para a resolução da problemática do trabalho configurando uma linha artificial para correlacionar com as situações reais que são expressadas em uma rede de transmissão longa trabalhando a vazio. Os resultados são gerados pela ferramenta computacional livre ATPdraw, onde os mesmos dão uma boa perspectiva da realidade sobre sistemas com presença de transitórios.

No capítulo 6 é feita a conclusão do trabalho comparando os resultados obtidos dentro da pesquisa com a ajuda do programa, e analisando as devidas considerações. Ao fim é direcionado algumas observações a título de curiosidade para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Competência

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, foi criada pela lei nº 9.427, de 26/12/1996, e constituída pelo Decreto nº 2.335, de 06/10/1997, sendo uma autarquia sob regime especial, com personalidade jurídica de direito público e autonomia patrimonial, administrativa e financeira, com sede e foro no Distrito Federal, com prazo de duração indeterminado. Em 28/11/1997, a Aneel teve seu regimento interno aprovado pela portaria do Ministério de Minas e Energia - MME nº 349, começando a funcionar em 01/12/1997, sendo automaticamente extinto o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE. A Aneel está vinculada ao MME.

“A Aneel é a responsável por orientar a execução de suas atividades de forma a prover condições favoráveis para que o desenvolvimento do mercado de energia elétrica ocorra com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade, regulando e fiscalizando a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, de acordo com a legislação e em conformidade com as diretrizes e as políticas do Governo Federal. De acordo com a Aneel, uma de suas diretrizes é: “regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica, defendendo o interesse do consumidor”. (ANEEL, 1996).

Uma normativa da Aneel direcionada apenas para a transmissão de energia elétrica, estabelece as disposições relativas relacionadas à qualidade do serviço público, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações, traz no seu texto:

*Art. 1º. Estabelecer as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações sob responsabilidade de concessionária de transmissão integrantes da Rede Básica e das instalações de transmissão de elétrica destinadas as interligações internacionais que se conectam à Rede Básica, conforme Resolução Normativa nº 442, de 26 de julho de 2011.
(BRASIL, 2016).*

O Operador Nacional do Sistema – ONS, foi instituído pela lei nº 9.648, de 27/05/1998, e regulamentado pelo Decreto nº 2.655, de 02/07/1998, sendo uma sociedade civil de direito privado, sem fins lucrativos, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional – SIN. O ONS teve seu funcionamento autorizado pela Aneel, com a resolução nº 351, de 11/11/1998, e assumiu o controle da operação do SIN, em 01/03/1999.

O ONS opera o Sistema Interligado Nacional – SIN, executando atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica por delegação dos agentes (empresas de geração, transmissão e distribuição de energia), seguindo regras, metodologias e critérios codificados nos chamados procedimentos de Rede, que são aprovados pelos próprios agentes e homologados pela Aneel. (ANEEL, Resolução Autorizativa nº 328, 2004)

Segundo o Estatuto do ONS, aprovado pela Aneel através da Resolução nº 307, de 30/09/1998, estabelece algumas atribuições:

- Planejamento e a programação da operação e o despacho centralizado da geração, com vistas a otimização dos sistemas eletroenergéticos interligados;
- Contratação e administração de serviços de transmissão de energia elétrica e respectivas condições de acesso, bem como dos serviços aniliares;
- Definição de regras para operação de transmissão da rede básica dos sistemas elétricos interligados, a serem aprovados pela Aneel.

De acordo com o professor Ingemar (1925), em seu livro “Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica”, “o objetivo de um sistema elétrico é de gerar energia elétrica em quantidades suficientes e nos locais mais apropriados, transmiti-la em grandes quantidades aos centros de cargas e então distribui-la aos consumidores individuais, em forma e quantidade apropriada, e com o menor custo ecológico e econômico possível”.

De acordo Marcos, (2002) fontes de geração de energia elétrica geralmente estão localizadas a longas distâncias dos grandes centros de consumo, e devido a essa situação é necessário recorrer ao sistema de transmissão à distância.

O sistema de transmissão é tradicionalmente dividido nas chamadas redes de corrente alternadas, ou sistemas de transmissão e subtransmissão.

Toda energia produzida pelas hidrelétricas e termelétricas do País é conduzida por um vasto sistema de transmissão. Segundo César de Barros Pinto, diretor-executivo da Associação das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (Abrate), o sistema de transmissão conta com mais de 800 linhas de transmissão, que totalizam 80 mil quilômetros, ligando todo o País, e mais de 400 subestações.

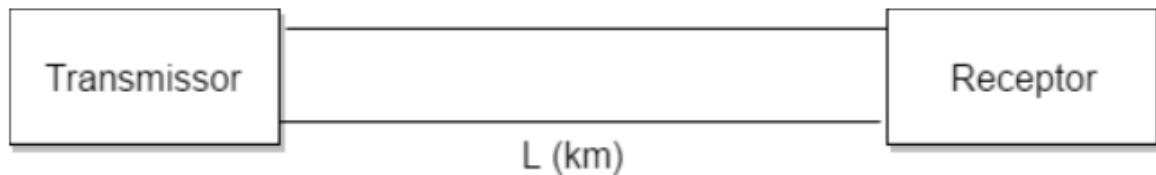
"O papel desse sistema é interligar a geração de energia até a carga e interligar as diferentes regiões do País, de forma a permitir a exploração racional dos recursos disponíveis em todas as regiões". (PORTELLA, 2009)

O sistema de transmissão de energia é explorado, atualmente, por oito grandes empresas: Furnas, Chesf, Eletronorte, Eletrosul, CEEE, Copel, CTEEP e Cemig. No entanto, outras cerca de 100 empresas também atuam na transmissão de energia, segundo a Abrate. Essas companhias são proprietárias do ativo de energia e o disponibiliza para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que distribui a energia por região, de acordo com a demanda.

3. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Um sistema de linhas de transmissão é organizado pelo os condutores que são os responsáveis por transportarem corrente elétrica de um ponto a outro mantidos por uma diferença de potencial. Esse processo é formado de um transmissor para um receptor. Onde o transmissor é denominado fonte geradora ou um barramento de uma tensão e o receptor a carga do sistema, como demonstrado na Figura 2 abaixo. (Fuchs, 1979).

Figura 2 – Transmissor e receptor.

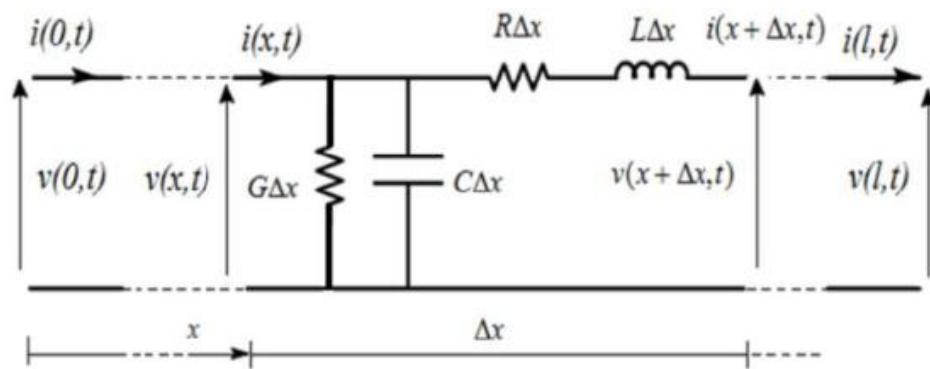


Fonte: Silva, 2017.

Segundo Grainger e Stevenson (1994), as equações que formulam a transmissão de energia elétrica por linhas de transmissão em Corrente Alternada – CA, levam em análise quatro importantes quantidades elementares: resistência, indutância, capacitância e condutância.

A Figura 3 mostra os parâmetros distribuídos mais importantes que são: a Capacitância C por unidade de comprimento (F/m), a Indutância L por unidade de comprimento (H/m), Resistência R por unidade de comprimento (R/m) e uma Condutância por unidade de comprimento G (S/m), responsável pelas perdas no isolamento (dielétrico) (Negrão, 2009).

Figura 3 – Circuito a parâmetros distribuídos.



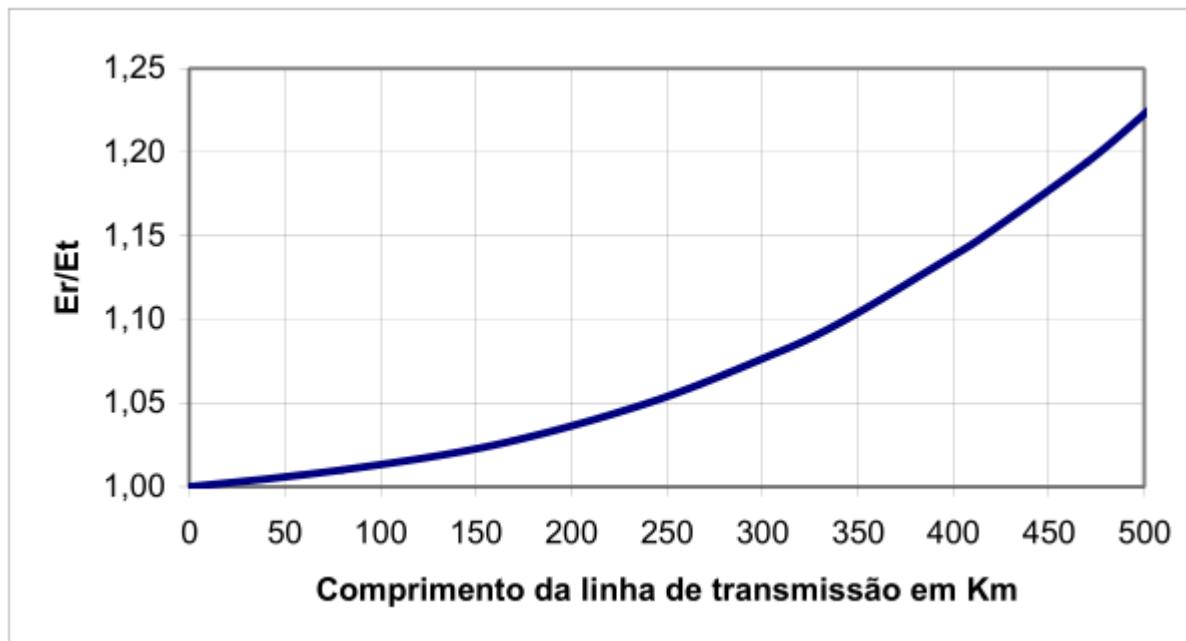
Fonte: Silva, 2017.

3.1. Efeito Ferranti

Em linhas de transmissão, onde as tensões de operação chegam a 138 kV ou maiores, que exigem de linhas mais extensas, os operadores podem gerar valores altos de tensão quando abrem uma das extremidades de uma linha longa ao mesmo que a outra extremidade permanece energizada. Esse problema se deve ao efeito “Ferranti” que é causado pela energia reativa circulante ao longo da linha pela capacidade natural do circuito. A título de exemplo, uma linha de 150 quilômetros de comprimento gera uma quantidade significativa de energia reativa. Quando o circuito está carregado, essa energia reativa é absorvida pelas perdas ao longo da linha e na carga (Maxwell, 2019).

Quando o circuito está levemente carregado, ou uma das extremidades está aberta, essa energia reativa não é absorvida e podem produzir tensões inaceitavelmente alta na extremidade aberta. Em uma linha aberta, a proporção entre a tensão no lado receptor (E_r) e a tensão no lado transmissor (E_t) varia em função do tamanho da linha, de acordo como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Elevação da tensão por efeito “Ferranti”.



Fonte: Maxwell, 2019.

Em casos de linhas de mais de 150 quilômetros de extensão, deve existir algum meio de absorver ou filtrar essa energia reativa gerada pela corrente capacitiva da

linha. Neste caso instalam-se reatores em paralelos nos terminais do circuito para absorver essa energia reativa. Em alguns casos, reatores em paralelo podem ser ligados automaticamente ao sistema sempre que um disjuntor se abre. Em outros casos, esses reatores em paralelo podem ficar ligados de forma permanente em ambas as extremidades da linha (Maxwell, 2019).

A grande capacidade oriunda de uma linha de transmissão pouco carregada pode causar um tipo de sobretensão no sistema que pode ser compensada através da instalação de um reator shunt.

Conforme Oliveira Júnior (2010), essa sobretensão é gerada pelo fato do efeito capacitivo se sobressair em uma rede levemente carregada. Isto é denominado efeito Ferranti: a tensão de operação do sistema se eleva com a distância ao longo da linha de transmissão. A corrente reativa é atrasada quando absorvida por um reator shunt, reduzindo assim a influência capacitiva da rede, chegando a redução da sobretensão.

Em linhas com comprimento de onda em $\lambda/4$ desempenham de forma indesejável quando trabalham em vazio ou com carregamento leve: o aumento da tensão no receptor em relação a tensão no transmissor e este fenômeno recebe o nome de Efeito Ferranti, em homenagem ao físico que descobriu. (Fuchs, 1979).

Os problemas principais causados por esse efeito, que diminui de intensidade a medida que no receptor a potência aumenta são:

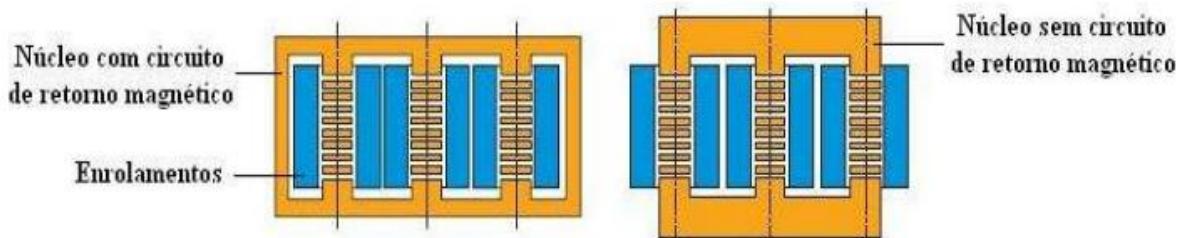
- A necessidade do aumento do nível de isolamento das linhas e dos equipamentos terminais devido a sobretensão que provoca.
- A radiointerferência e os ruídos audíveis que acompanham o efeito Corona aumentam igualmente com a tensão.
- A corrente de carga sendo muito elevada, por efeito térmico, limita a capacidade de transporte da corrente de energia da linha, de modo que, para uma mesma potência a ser transmitida, exige condutores de seções maiores aumentando o custo de operação da construção.
- A corrente de carga que a linha absorve das máquinas quando o alimentam, estando na condição de sistema a vazio ou sob carga leve é capacitiva. (Fuchs, 1979)

4. REATORES

Reatores são equipamentos de características indutiva instalados no sistema elétrico de potência com as finalidades específicas. São compostos de um simples conjunto de bobinas enroladas em um núcleo de ferro silício. As bobinas podem ser imensas no ar ou em óleo que são elementos necessários para o isolamento e isolação necessária para o equipamento.

Segundo Fernandes Júnior (2010), conforme a construção do circuito magnético, os reatores podem ser divididos ou classificados em dois tipos: reatores com o núcleo de ferro separado por entreferro de ar e núcleo de aço com circuito de retorno magnético. Na Figura 5 é demonstrado um tipo de reator trifásico com e sem circuito de retorno magnético.

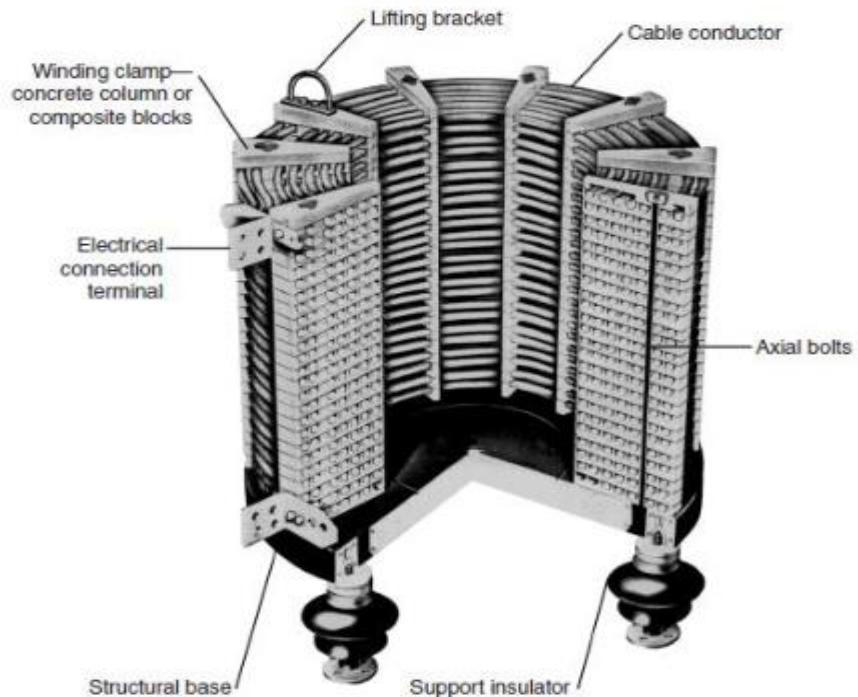
Figura 5 – Reatores shunt trifásicos com e sem circuito de retorno magnético.



Fonte: Transformers, 2019.

No passado, reatores somente poderiam ser do tipo enrolamento aberto conforme Figura 6 abaixo; a sua resistência mecânica é fornecida por um sistema mecânico de fixação que proporciona o isolamento entre as espiras.

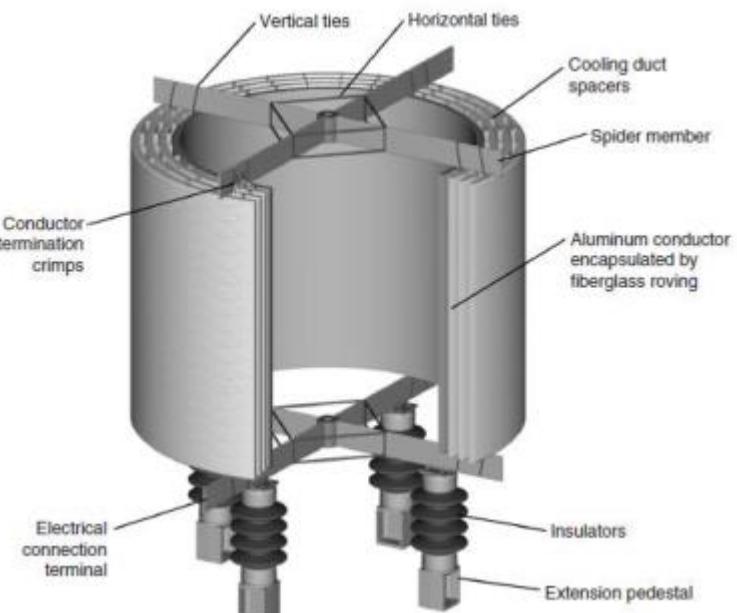
Figura 6 – Reator a seco com núcleo de ar enrolamento aberto.



Fonte: Oliveira Júnior, 2012

Reatores a seco com núcleo de ar modernos possuem seus enrolamentos completamente encapsulados com o isolamento das espiras providos por filmes, fibra ou esmaltes dielétricos, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Reator a seco com núcleo de ar enrolamento encapsulado.



Fonte: Oliveira Júnior, 2012.

As principais vantagens dos reatores tipo seco, quando os mesmos são comparados aos imersos em óleo, são os baixos custos operacionais, tamanho reduzido, perdas muito baixas, manutenção menos complicadas e acessíveis ao operador e ausência de óleo isolante. Contudo, estes tipos de reator normalmente não são utilizados em redes com tensões muito elevadas, maiores que 138 kV. Como o núcleo não é constituído de ferro, não há corrente de magnetização quando o reator é energizado (IEEE, 1988).

As principais configurações são:

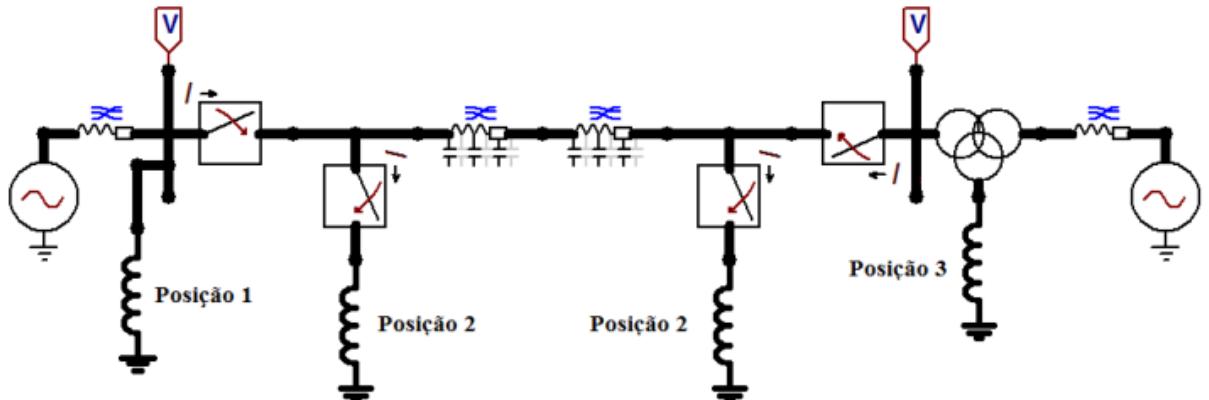
- Reator do tipo seco: em Y sem aterramento, conectado à impedância de aterramento do terciário do transformador de potência;
- Reator imerso em óleo: em Y aterrado solidamente ou por uma impedância, conectado diretamente ao sistema de transmissão.

Segundo afirma Alves (2011), os reatores podem também ser interligados em delta. Porém, na conexão em Y os reatores encontram-se relativos às tensões de fase, que é aproximadamente 58% menor que a de linha, exigindo custos bem menores para a fabricação de material isolante. Portanto, é mais comum usar a interligação em estrela.

Alves (2011) relata ainda que o aterramento de banco de reatores em Y, pode haver ou não um reator de aterramento, que deve ser dimensionado para ter uma melhor facilidade de extinção do arco secundário no caso do uso de religamento monopolar.

Conforme a necessidade e dependendo como é disposto a configuração do sistema, os reatores podem ser conectados em três posições diferentes conforme mostra a Figura 8. Reatores conectados ao barramento da subestação, diretamente à linha de transmissão e por último ao enrolamento terciário de um transformador de potência.

Figura 8 – Posições de conexão de reatores shunt ao sistema elétrico de potência



Fonte: Rodrigues; Silva, 2014.

Para fim de análise, instalou-se o reator ao final do sistema com o intuito de compensar a linha somente no final, nas posições 1 e 2, o dispositivo começa a compensar a rede tanto no inicio como no meio da linha de transmissão respectivamente, como o objetivo do trabalho é observar esse aumento de tensão apenas ao final, escolheu-se essa configuração.

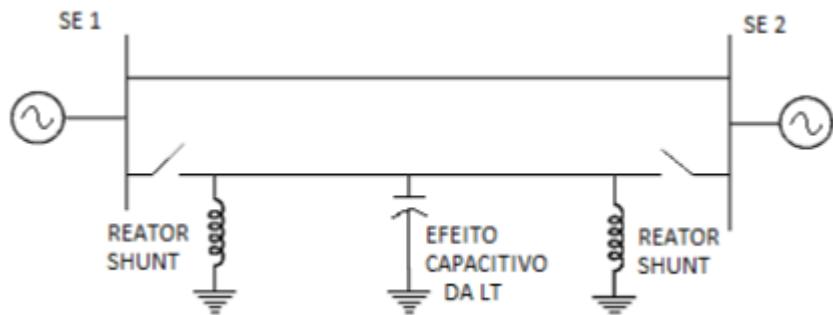
4.1. Reatores Shunt

O reator shunt (ou derivação) é um equipamento de fundamental importância no controle da tensão de operação no SEP. Sua instalação é realizada frequentemente através da conexão nos terminais da linha de transmissão que necessita de um controle de tensão mais específico. Existem casos de instalação em barramentos e em terciários de transformadores. Sua construção e especificação são semelhantes à de um transformador de potência. Os reatores podem ser manobráveis, quando operados através de disjuntor, ou permanentes, quando interligados diretamente as linhas de transmissão através de chaves seccionadoras (Rodrigues; Silva).

De forma simplificada, o reator tem a finalidade de reduzir ou minimizar o efeito capacitivo que existe nas linhas de transmissão quando essas possuem carregamento leve (condição sistemática) ou linhas longas (condição física), conforme apresenta o trabalho Cigré-Brasil (2013). Este efeito conhecido como Ferranti faz com que surja uma elevação da tensão nominal de operação, onde se faz necessário uma

compensação reativa indutiva para possibilitar o controle dessa tensão dentro dos valores aceitáveis de operação e de especificação dos equipamentos de proteção do SEP. A Figura 9 abaixo ilustra a representação de uma linha de transmissão com reatores *shunt*, instalados nas extremidades da mesma.

Figura 9 – Linha de transmissão com compensação reativa através de reatores *shunt*.



Fonte: Cigré-Brasil, 2013.

Os níveis de tensão em linhas de transmissão e distribuição devem ser mantidos em uma pequena faixa de valores, não devendo oscilar fora desses limites, tanto para evitar sobretensões suficientes para provocar curtos-circuitos ou danificar equipamentos, quanto para manter um padrão de qualidade de transmissão da energia elétrica.

O controle dos níveis de tensão na linha é feito por meio do fluxo de reativos no sistema. Quando há excesso de reativos no sistema, o nível de tensão cresce. Em contrapartida, a tensão da linha decresce para baixos valores de reativos. (Rodrigues.; Silva, 2014).

Como relata Oliveira Júnior (2012) em seu trabalho “Reatores para controle de fluxo de potência e suas consequências para a qualidade de energia”, para atingir um equilíbrio de potência reativa aceitável, é preciso corrigir e compensar a linha de forma a se obter uma condição operacional. Em condições de carga pesada, o equilíbrio de potência é negativo e a compensação capacitiva é necessária, e de maneira contraria, o equilíbrio de potência é positivo e uma compensação indutiva é preciso ser feito, essa compensação geralmente é fornecida pelo uso de reatores. O efeito da capacidade causada nos sistemas de transmissão quando estão levemente carregadas pode levar a dois tipos de sobretensão ao sistema que pode ser controlada através do emprego de reatores.

O primeiro tipo de sobretensão conforme já falando anteriormente, acontece quando o efeito capacitivo sobressai em uma linha de transmissão levemente

carregada. A tensão de operação vai aumentando gradativamente com a distância ao longo da linha. A corrente reativa atrasada quando é consumida pelo reator e consequentemente reduz a influência capacitiva na linha, levando a redução da sobretensão. (Richard Fapoud Oliveira Júnior, 2012, p. 16).

“O segundo tipo é provocado pela interação da capacidade da linha com alguma porção de energia reativa indutiva saturável do sistema, a este efeito dá-se o nome de ferrorressonância”. (Richard Fapoud Oliveira Júnior, 2012, p. 16).

De acordo tudo que foi descrito até aqui sobre os reatores para o controle da tensão causado pela reatância capacitativa natural das linhas de transmissão longas, a Figura 10 apresenta um exemplo de reator shunt de barramento 500 KV instalado em uma subestação.

Figura 10 – Reator shunt de 765 kV instalado na subestação de Foz do Iguaçu.



Fonte: Andrade, 2011.

4.2. Outras Aplicações dos Reatores

No sistema elétrico de potência, os reatores são interligados e posicionados no sistema elétrico para realizar algumas outras funções específicas, tais como:

- Limitação de Corrente;
- Reatores Associados a banco de Capacitores.

4.2.1. Reatores Limitares de Corrente

Segundo Monteiro (2005), reatores limitadores de corrente de curto-círcuito, são os equipamentos mais antigos em tecnologia usados na redução de corrente e geralmente são os dispositivos de menores custos entre os elementos de proteção do sistema elétrico de potência. Porém, algumas considerações em relação a utilização deste dispositivo devem ser feitas. Um fato importante que deve ser analisado está ligado com a introdução de perdas e maiores queda de tensão na rede, já que estes equipamentos estão sempre presentes no sistema elétrico. É importante observar que os problemas de queda de tensão que os reatores limitadores de corrente podem introduzir são minimizados na rede quando os mesmos são empregados em redes altamente malhadas, uma vez que, o efeito sobre a mudança de tensão é menos afetada.

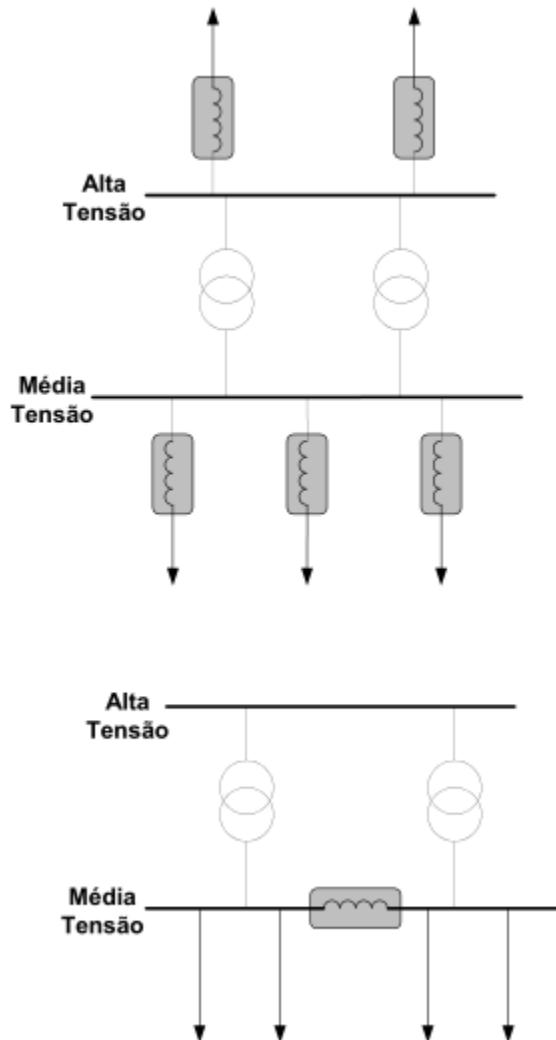
Seguindo essa lógica, outra consideração importante que deve ser vista, diz respeito aos espaçamentos que são necessárias em torno dos Reatores Limitadores de Corrente – RLCs, no momento da instalação dos mesmos. Isto é devido ao campo magnético alto gerados por esse equipamento. Com isso, as distâncias a serem estabelecidas entre as fases poderão inviabilizar a instalação de RLC em subestação que, por exemplo, apresentam problema de espaço.

Quando instalado no sistema elétrico de potência, conforme demonstra Fernandes Júnior (2010), os reatores limitadores de corrente são ligados na linha de transmissão em série ou com o auxílio de um alimentador que tem a finalidade de limitar a corrente de falta aos níveis compatíveis com os dispositivos de proteção do sistema, interligando entre barras e balanceando as cargas em sistemas nominais de 765 a 2100 kV. Esta atividade é uma solução que minimiza os custos da rede do sistema quando ocorre o aumento da capacidade de curto circuito, pois elimina o trabalho de ajuste de todos os equipamentos de proteção ao nível de curto circuito ou em casos mais críticos realizar a troca de todos os equipamentos da instalação.

As aplicações e experiência de uso dos RLCs no Brasil são bem amplas, indo desde as aplicações no nível de 13,8 kV, em serviços auxiliares de usinas e

subestações, até sistemas de EAT (extra alta tensão) em 138 kV, 345 kV e 500 kV. Pode-se exemplificar a utilização destes limitadores, conforme ilustrado na Figura 11, nas seguintes subestações (D'Ajuz; Monteiro; Kastrup; Oliveira, 2002).

Figura 11 – Formas de instalação do RLC nas subestações.



Fonte: D'Ajuz; Monteiro; Kastrup; Oliveira, 2002.

- Subestação de Jaguara 138 kV (Minas Gerais);
- Subestação de Angra 138 kV (Rio de Janeiro);
- Subestação de Mogi das Cruzes 345 kV (São Paulo);
- Subestação de Tucuruí 500 kV (Pará).

A Figura 12 ilustra uma imagem de um reator limitador de corrente da subestação de Tucuruí 500 kV. Este RLC é o maior do mundo na tensão de 500 kV com resistência de 20Ω .

Figura 12 – Reator Limitador de Corrente da SE de Tucuruí 500 kV.



Fonte: Monteiro, 2005.

4.2.2. Reatores associados com banco de capacitores

Reatores associados a banco de capacitores são projetados de forma a serem inseridos em série com um banco de capacitores em derivação de modo a limitar correntes de energização (inrush) durante as manobras, para limitar as correntes de outrush devido fechamento durante faltas e para controlar a frequência de ressonância do sistema após a adição de bancos de capacitores. Esses reatores podem ser instalados no sistema com tensões que vão desde 765 kV até 2100 kV. Ao especificar reatores associados a bancos de capacitores, deve se levar em conta a corrente nominal contínua, o espectro de harmônicos, a tolerância dos capacitores e a sobretensão permitida no sistema. (Trench, 2018).

De acordo Santos e Monte (2009), reatores trabalhando em conformidade com banco de capacitores são bastante usados no controle de reativos do sistema, por terem dois fatores muito importantes, o baixo custo e relativa facilidade de instalação e operação. Geralmente, os bancos de capacitores são instalados na barra de alta

tensão da subestação e os reatores são conectados nas linhas de transmissão, com ligação em série ou em derivação.

A função do banco de capacitores é gerar reativos para o sistema com a função de realizar a manutenção dos níveis de tensão nas barras da subestação. Com isso o fator de potência da rede é corrigido eliminando as sobrecargas nos geradores e transformadores do sistema.

Pavão (2006) afirma, que ao contrário do banco de capacitores, os bancos de reatores absorvem reativos da rede com a razão de decrescer os níveis de tensão da mesma. É necessário a instalação de reatores nos instantes em que o sistema opera com baixo carregamento, onde as tensões tendem a se elevar, para que possa interromper essa elevação fazendo com que não ultrapassem os limites aceitáveis do sistema elétrico de potência. Os bancos de reatores são utilizados para controlar o efeito da capacidade das linhas de transmissão, compensado sobretensões no extremo final da mesma, além de restringir a elevação da tensão quando um circuito for aberto.

5. SIMULAÇÃO, RESULTADOS E ANÁLISES

5.1. Escolhas dos Componentes

No software ATPdraw adotou-se uma ordem de escolhas dos componentes para agilizar o desenvolvimento do projeto. A medida que se foi criando os equipamentos para implementação do circuito, começa-se a parametrizar os componentes ajustando aos valores utilizados em situações reais de operação para o modelamento da rede estudada até aqui.

5.2. Linha de transmissão

Para título de exemplo escolheu-se uma rede de transmissão de 500 km de extensão com uma tensão de operação de 500 kV. O motivo da escolha dessa configuração se justifica pela razão da mesma atender as necessidades que necessita demonstrar no problema foco do trabalho. Dessa maneira, utilizou-se uma torre de transmissão com disposição de fases triangular onde se aproxima da Figura 13 ilustrada, onde temos três fases com apenas um condutor de guarda ao centro no topo da torre.

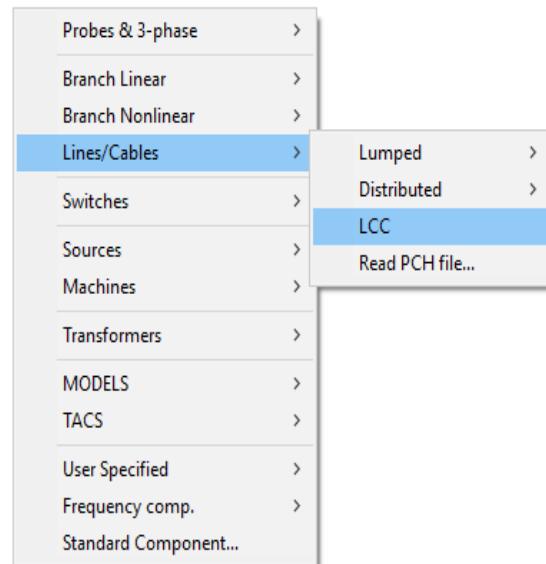
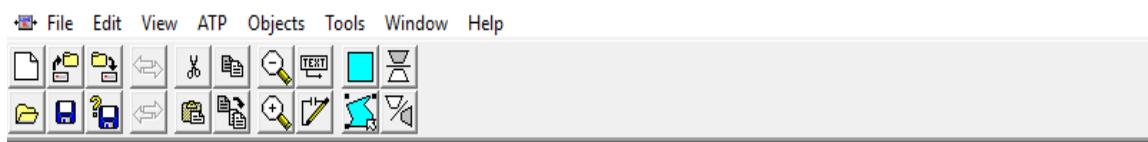
Figura 13 – Torre de transmissão com disposição de fases triangular.



Fonte: Infomoney, 2019.

No software tem-se que modelar a linha conforme a configuração que se deve inserir, e o modelo de linha usado no ATPdraw para a parametrização foi *Line/Cable Constant – LCC*. O próximo passo é a escolha do modelo da linha, o modelo “pi” é utilizado para linhas curtas, para uma modelagem de parâmetros concentrados. Dessa forma não se optou por esse modelo, pois para se obter uma solução mais viável para qualquer sistema de transmissão, deve-se considerar a análise de que os parâmetros da rede estão distribuídos ao longo da mesma e não concentrados. Portanto, o modelo “Bergeron” foi usado pelo fato de ser um modelo com parâmetros distribuídos constantes (Stevenson apoud Menezes, 2012, p. 68), conforme observamos na Figura 14 e 15.

Figura 14 – Software ATPdraw, escolha da torre de transmissão.



Fonte: Própria.

Os campos para preenchimento dos dados para a parametrização da torre da linha utilizada estão de acordo a tabela 1 apresentada, sendo que o sistema de transmissão representa 500 km de extensão da rede.

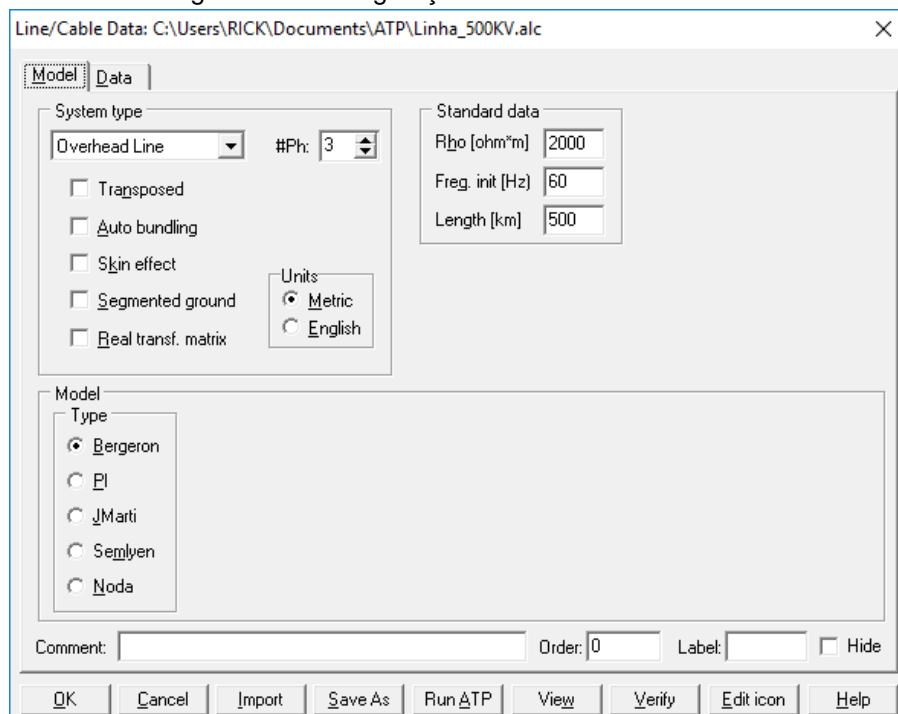
Do quadro 1, inseriu-se os valores nos campos indicados no software para a configuração do circuito da torre de transmissão do sistema, essas etapas são mostradas nas Figuras 15 e 16.

Quadro 1 – Valores das componentes para parametrização da torre de transmissão

LINHA DE TRANSMISSÃO 500 kV			
COMPONENTES	VALORES		
Resistividade do terreno	2000 $\Omega \cdot m$		
Frequência	60 Hz		
Resistência do condutor	0.089898 Ω/km		
Raio do condutor	12.57 mm		
Resistencia cabo guarda	4.188 Ω/km		
Raio cabo guarda	4.572 mm		
Altura fase A	27.64 m	Deslocamento horizontal	0
Altura fase B	24.04 m	Deslocamento horizontal	-9.27 m
Altura fase C	24.04 m	Deslocamento horizontal	9.27 m
Altura cabo guarda	36.00 m	Deslocamento horizontal	± 7.51 m

Fonte: Menezes, 2012.

Figura 15 – Configuração dos dados do sistema.



Fonte: Própria.

Figura 16 - Configuração dos dados do sistema.

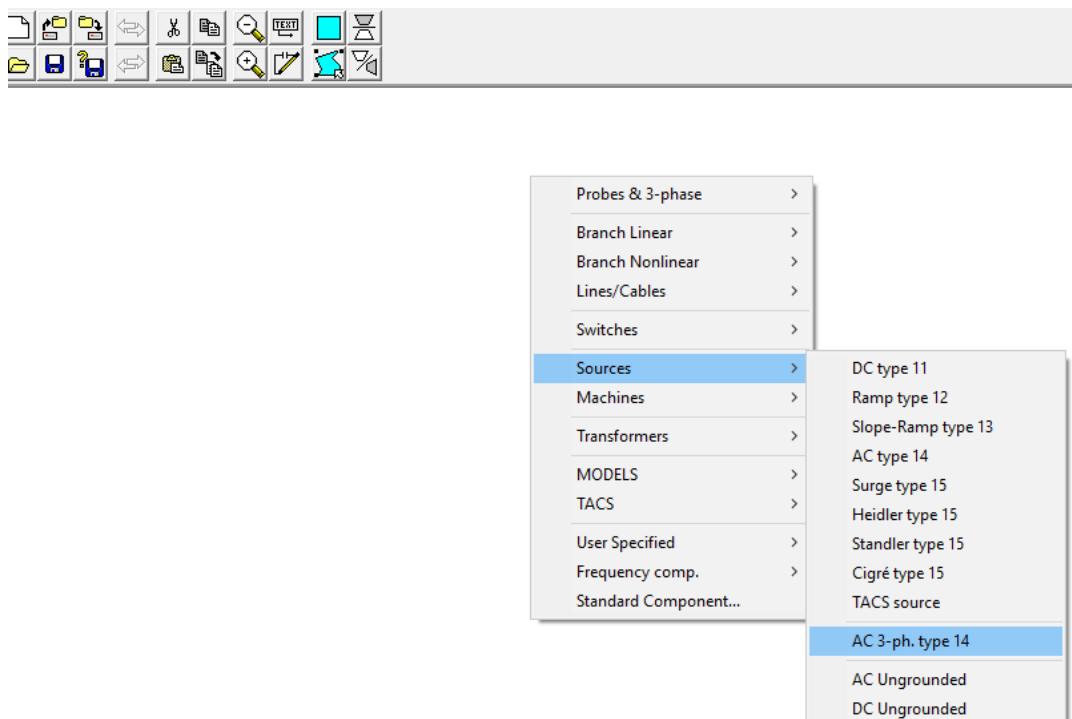
Line/Cable Data: C:\Users\RICK\Documents\ATP\Linha_500KV.alc							
Model		Data					
#	Ph.no.	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.257	0.089898	0	27.64	27.64
2	2	0	1.257	0.089898	-9.27	24.04	24.04
3	3	0	1.257	0.089898	9.27	24.04	24.04
4	0	0	0.4572	4.188	-7.51	36	36
5	0	0	0.4572	4.188	7.51	36	36

Fonte: Própria.

5.3. Fonte

Existem umas variadas formas de fontes dentro do ATPdraw. Encontram-se fontes de excitação tanto em tensão como em corrente, ficando a cargo do operador escolher a que mais se adeque ao caso em estudo. Neste trabalho, usou-se uma fonte de tensão trifásica de corrente alternada *AC3-ph. Type 14*, como demonstra a Figura 17, com uma tensão de 500 KV por representar uma rede do sistema elétrico de potência.

Figura 17 – Software ATPdraw, escolha da fonte de tensão.



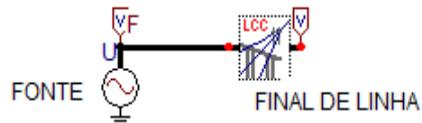
Fonte: Própria.

5.4. Implementação do circuito no software

Na construção do projeto, precisou-se executá-lo de duas formas para que pudesse identificar as diferenças de uma linha levemente carregada e seus efeitos aos consumidores, e logo após a instalação do dispositivo reator shunt em derivação a melhoria dos efeitos causados ao longo do trabalho citado, como o efeito Ferranti.

A primeira parte colocou-se a linha de transmissão configurada anteriormente com uma extensão de 500 km de rede, conectou-se a fonte de tensão a primeira extremidade da linha e ao final conectou-se um observador de tensão para analisar como chega o comportamento da tensão ao final dessa linha levemente carregada, essa disposição citada é expressada pela Figura 18.

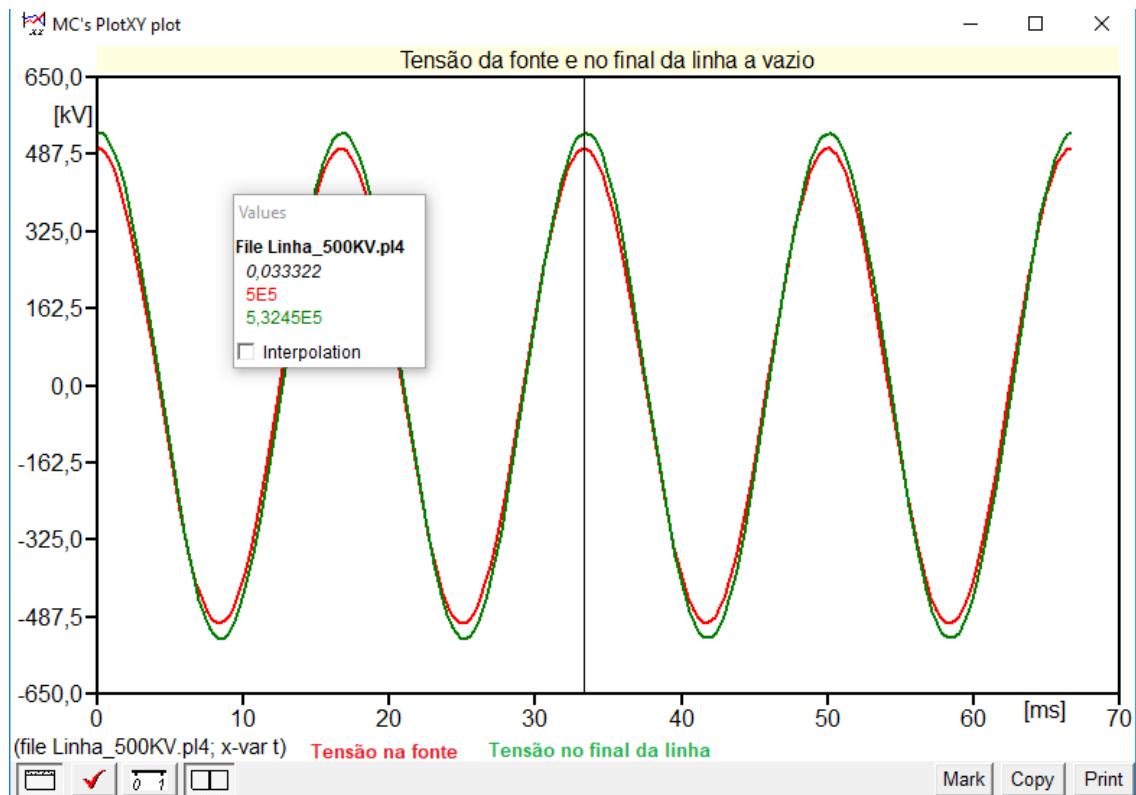
Figura 18 – Rede de transmissão levemente carregada.



Fonte: Própria.

Com essa configuração montada, gerou-se os gráficos da tensão de entrada na fonte, que está sendo representado pela cor vermelha, e de saída da linha representada pela cor verde. Analisou-se também o comportamento da corrente vista no fim de linha. Tendo em mãos esses dados, foi possível comparar como se comporta a tensão de uma linha de transmissão trabalhando a vazio até chegar ao consumidor final que pode ser aqui entendido como uma concessionária de distribuição de energia elétrica. Diante dos gráficos da Figura 19, conclui-se que a tensão que chega a carga ou no receptor da linha, está maior que a aplicada na fonte, e essa consequência é causada pela capacidade natural de linhas longas elevando a tensão pelo efeito ferranti de forma prejudicial a carga e não aceitáveis pelas agências fiscalizadoras que aplicam multas as concessionárias responsáveis pelo serviço de transmissão.

Figura 19 – Gráfico da tensão na fonte e no final da linha vazio.



De posse do gráfico obtido, percebe-se que a tensão no receptor aumentou 30 KV em relação a tensão. De acordo com a regulação normativa nº 395/2009 a faixa de variação de Tensão de Leitura - TL em relação a Tensão Contratada - TC em situação adequada deve estar entre 95 a 105 % da tensão de operação conforme observa-se o quadro 2.

Quadro 2 – Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 KV

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 \text{ TC} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TC}$
Precária	$0,93 \text{ TC} \leq \text{TL} < 0,95 \text{ TC}$ ou $1,05 \text{ TC} < \text{TL} \leq 1,07 \text{ TC}$
Crítica	$\text{TL} < 0,93 \text{ TC}$ ou $\text{TL} > 1,07 \text{ TC}$

Fonte: Brasil, 2009.

Utilizando o software ATPdraw para simular o aumento da tensão a cada 50 km de linha observou-se um aumento da tensão a cada intervalo de comprimento considerado, conforme resultados apresentados no quadro 3. Assim foi possível obtenção do gráfico conforme mostra a Figura 20, onde percebe-se que a tensão aumentando com conforme aumenta o comprimento da linha.

Quadro 3 – Aumento da tensão ao longo do comprimento da linha.

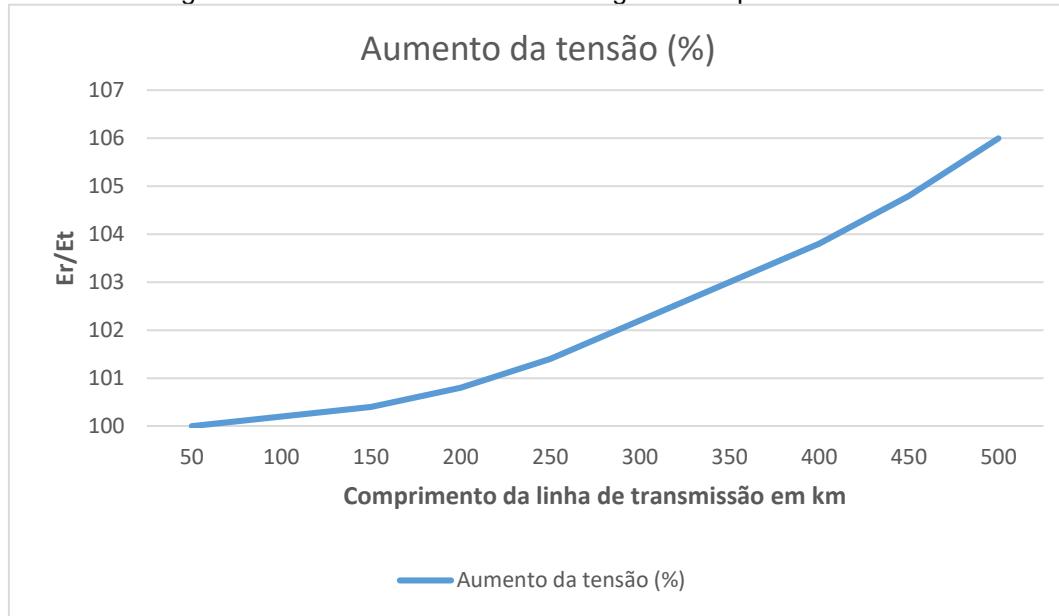
Comprimento da linha em km	V (Aumento)	Er/Et (%)
50	500	100,0
100	501	100,2
150	502	100,4
200	504	100,8
250	507	101,4
300	511	102,2
350	515	103,0
400	519	103,8
450	524	104,8
500	530	106,0

Fonte: Própria.

De acordo com a resolução normativa, o sistema se encontra em uma situação precária (apresentado no quadro 2), pois o aumento de tensão representa 106 % da tensão nominal no final da linha, onde o mesmo está sujeito a multas da norma regulamentadora.

Segundo Silva (2017), o acúmulo de tensão no receptor da linha elevando a mesma, é característica presente de uma rede levemente carregada onde a impedância vista no final da linha é maior que a impedância característica da rede que depende apenas de onde está se encontra, além de suas dimensões físicas, como distâncias entre os condutores e seus raios e independe do tamanho da rede.

Figura 20 – Aumento da tensão ao longo do comprimento da linha.

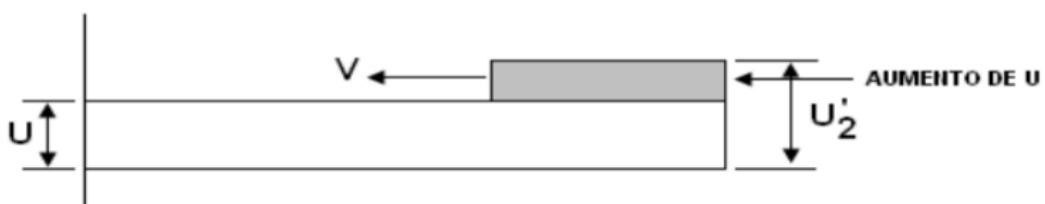


Fonte: Própria.

Dessa forma, a onda de tensão que sai do transmissor e incide no receptor se reflete de volta para o transmissor na forma de onda incidente de um valor “k” que depende da impedância característica da linha e da impedância Z_2 no receptor de acordo expressa na equação 1. Essa onda refletora se soma com a nova onda incidente transmissora elevando a tensão no regime transitório até se estabelecer o regime permanente, a Figura 21 ilustra bem essa situação. (Fuchs, 1979).

$$k = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (1)$$

Figura 21 – Aumento de Tensão no Receptor.

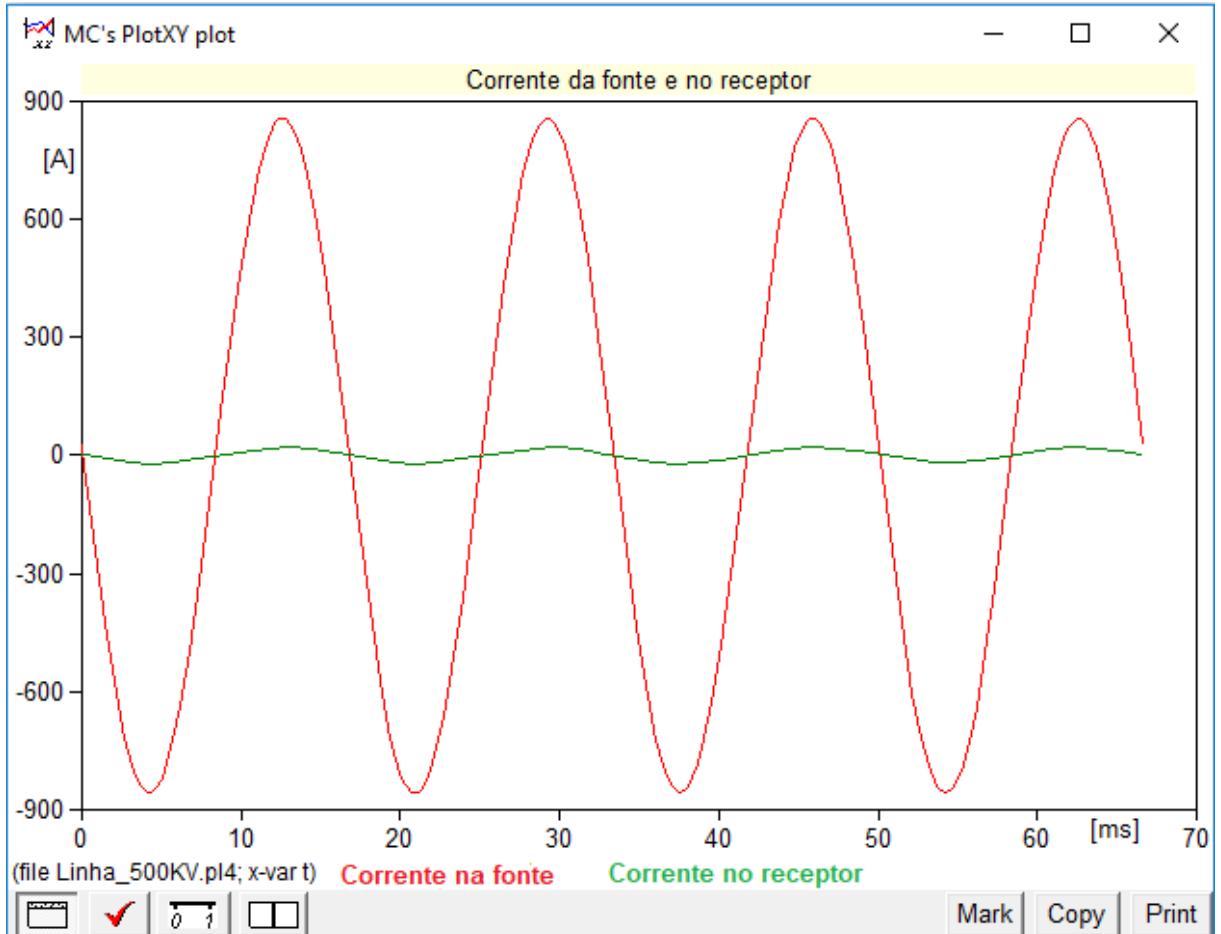


Fonte: Silva, 2017

Outra observação importante, diz respeito a corrente da fonte e no final da linha com um sistema trabalhando a vazio como este analisado aqui, o que se espera é uma corrente muito baixa no receptor devido somente a resistência dos cabos e a excitação da fonte já que não temos carga absorvendo potência da rede. A Figura 22 ilustra bem essa afirmação citada, uma vez que se compara a corrente da fonte

representada pela cor vermelha e a corrente no receptor quase zero representada pela cor verde.

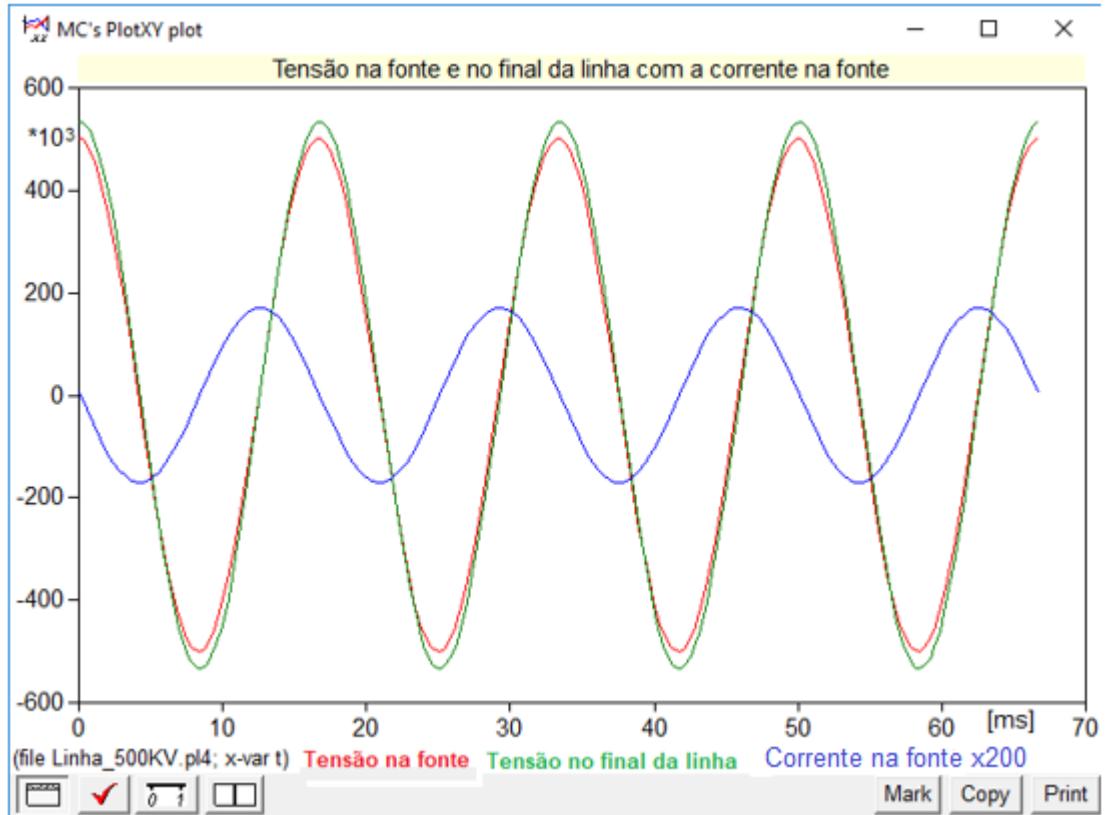
Figura 22 – Corrente da fonte e do receptor.



Fonte: Própria

Outra análise importante está ligada com o comportamento da tensão da fonte e no final da linha com a corrente, isto para observar o defasamento entre essas grandezas possibilitando encontrar o fator de potência da linha de transmissão trabalhando a vazio. A Figura 23 mostra essa comparação onde no software multiplicou-se a corrente por um fator de 200 para uma melhor aproximação em relação a ordem de escala com a fonte, uma vez que, no gráfico anterior observou-se uma corrente de 900 Amperes de amplitude, o que não possibilitava uma boa observância com a escala da fonte. A fonte está representada pela cor vermelha, e o final da linha e a corrente vista na fonte, pelas cores verde e azul respectivamente.

Figura 23 – Tensão na fonte e no final da linha com a corrente da fonte.



Fonte: Própria.

Na segunda parte do projeto, instalou-se um reator ao final da linha em derivação conforme a Figura 25, com o preceito de reduzir essa tensão que está mais alta no fim da rede de transmissão do que na fonte. Conforme SIEMENS as potências nominais de operação dos reatores estão entre 10 MVA a 300 MVA, com tensão na faixa de 33 KV a 800 KV, escolheu-se um reator com potência de 240 MVA relacionada ao nível de 500 KV da fonte, a título de observar como o mesmo contribui para conter esse efeito visto na configuração anterior.

Para descobrir o valor da indutância, recorreu-se a equação 2 relacionando tensão da rede, potência do reator e a reatância indutiva.

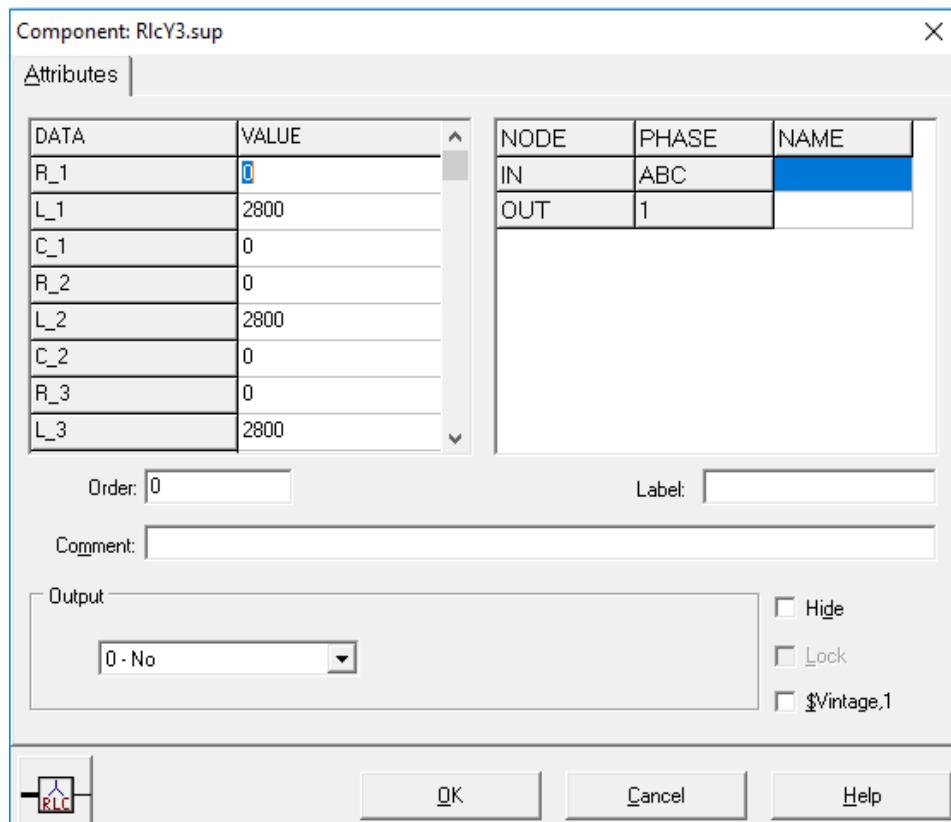
$$Q(\text{reativa}) = \frac{V_f^2}{X_L} \quad (2)$$

De posse da reatância indutiva pode-se encontrar o valor da indutância do reator através da expressão 3.

$$X_L = \omega L \quad (3)$$

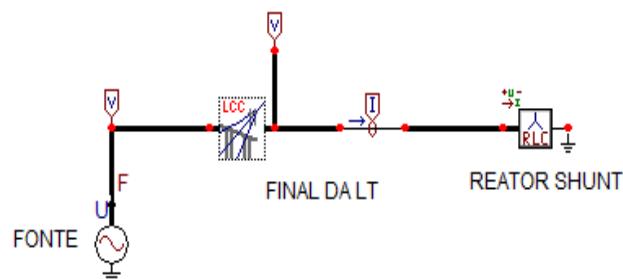
Com isso encontra-se um valor de indutância de 2.80 Henry (H) para uma frequência de 60 Hz do sistema, que será utilizado para inserir no ATPdraw no reator ao final da linha de transmissão, como um reator é equipamento com indutância no seu interior, escolheu-se uma carga RLC no software zerando as componentes de resistência e capacitância, conforme observa-se a Figura 24.

Figura 24 – Indutância do Reator shunt.



Fonte: Própria.

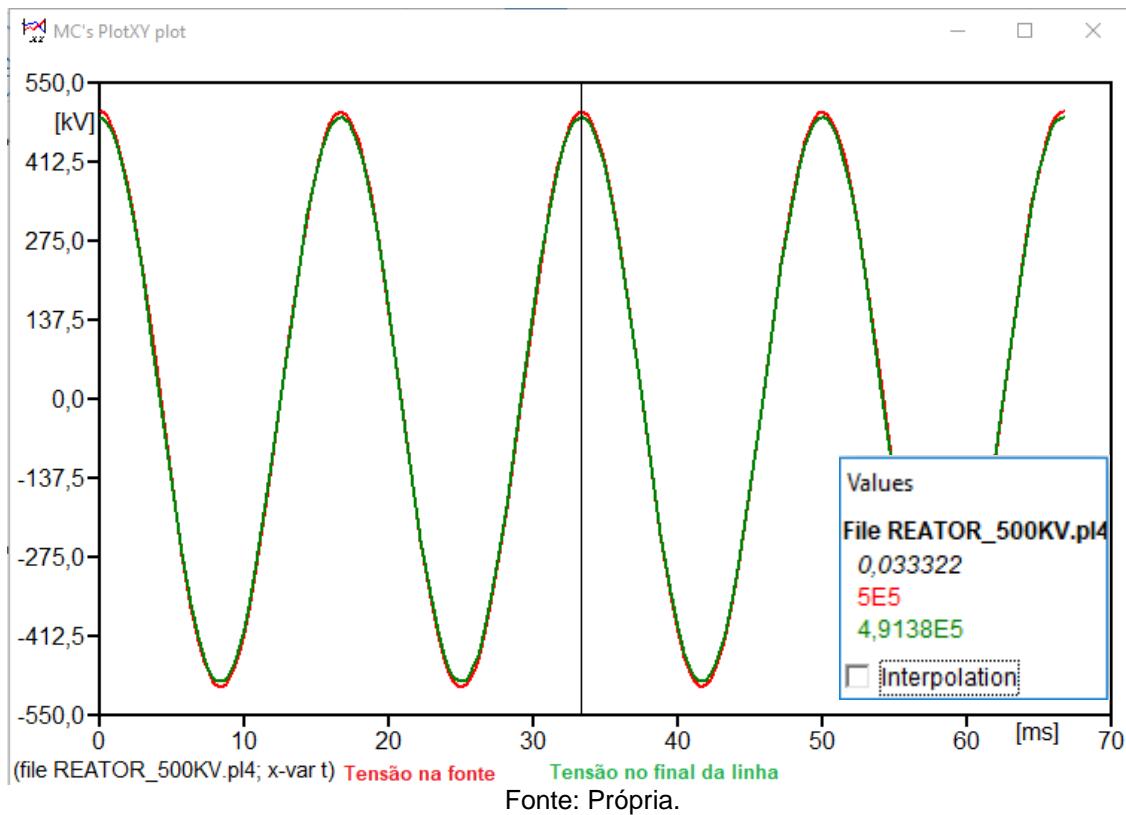
Figura 25 – Linha de transmissão com reator no final da rede.



Fonte: Própria.

Executado o circuito acima, gerou-se os gráficos de tensão da fonte e ao final da linha com respeito a interligação do reator, e conclui-se que o comportamento da tensão reduziu próximo ao nível da fonte a fim de comprovar realmente as diferenças que está configuração evidencia em relação a analisada no circuito anterior. E de acordo com a resolução normativa da ANEEL, o nível de TL ficou dentro da tensão contratada ou esperada no receptor onde observa-se uma TL de 98 % estabelecendo uma classificação de Tensão de Atendimento – TA adequada. A forma de onda na cor vermelha relaciona a tensão na fonte, e a forma de onda na cor verde a tensão no final do sistema, como podemos observar na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico da redução da tensão no final da rede usando reator.



Fonte: Própria.

A mesma análise da corrente é feita após a interligação do reator shunt no final da linha, e o que se observou é que o comportamento da corrente é o mesmo do circuito anterior conforme visto na Figura 21. O que já era de se esperar, tendo em vista que quando instalado o reator a rede continua a vazio, a finalidade do dispositivo é somente reduzir a tensão do sistema que é elevada causada pelo efeito Ferranti, não alterando a configuração da corrente do mesmo.

Em posse destas análises obtidas, observa-se que este dispositivo realmente atende as necessidades do problema causado em linhas de transmissão longas

poucas carregadas que é o efeito Ferranti. Quando instalado em derivação (paralelo) com a linha o mesmo tem a capacidade de reduzir a tensão elevada devido a capacidade natural da rede. O comportamento da corrente já era de se esperar, tendo em vista que o sistema não possui carga consumindo potência da linha de transmissão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho final de graduação, utilizamos a característica principal dos reatores *shunt* para solucionar um dos problemas do sistema elétrico de potência – SEP. Temos um problema que é o efeito Ferranti causado pela capacidade natural de linhas de transmissões de grandes extensões, onde a consequência é uma alta tensão nos terminais finais da rede ponto de entrega para as concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Sabe-se pela resolução normativa nº 395 da ANEEL, que se o nível da tensão no final da linha de transmissão chegar a ser maior que uma variação de porcentagem da tensão da fonte, as empresas de transmissão de energia são multadas, pois a ultrapassagem da tensão final a valores muitos elevados causará *flashover*, o que provocará o desligamento do sistema.

Para a modelagem da linha de transmissão com valores artificiais usamos o software ATPdraw afim de se chegar o próximo de uma situação real, que de acordo com os resultados obtidos analisa-se que este procedimento pode ser usado em uma solução com perspectivas reais de operação.

Conclui-se que os reatores *shunt* é um dispositivo bastante importante para solução desse problema no SEP, onde o trabalho desenvolvido mostrou sua aplicação na implementação de uma linha artificial, uma vez que os resultados encontrados possibilitem desenvolver estudos relacionados com as características reais de um sistema de transmissão.

6.1. Trabalhos Futuros

Uma vez realizado toda a pesquisa e os resultados obtidos pela simulação de uma linha artificial, uma possível continuação deste trabalho seria fazer um real e estudo de caso em uma linha de transmissão e a partir de aí observar as comparações com estudo aqui apresentado.

Outra possível solução para a problemática enfatizada no trabalho, seria a utilização de motores assíncronos, ficaria a contribuição de estudo analisar

financeiramente qual solução é mais viável e qual apresenta melhor desempenho e facilidade de implantação no sistema elétrico de potência.

7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A. D'AJUZ, A. M. MONTEIRO, O. KASTRUP e F. H. OLIVEIRA. “**Dispositivos Limitadores de Curto-Círcuito (DLCC) – Estado da Arte e Aplicação nas Redes Elétricas**”. Relatório ONS 006/2002.

ANDRADE, Marcelo Garcia de. **FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE APOIO AO TREINAMENTO DE OPERADORES NA EXECUÇÃO DE MANOBRAS PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.** 106 f. Trabalho de graduação – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

ALVES, Tatiana Maria Tavares de Sousa. **Desempenho de proteção de reatores de linhas de transmissão frente a manobras e falhas internas e externas.** 177 f. Dissertação de Mestrado – Instituto Alberto Luiz Coimbra (COPPE) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL, Dalton Oliveira Camponês do. **Aplicação de reatores saturados em sistemas de transmissão.** 158 f. Tese de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 1996.

BRASIL. Lei nº 9.427 de 26 de dez. de 1996. **Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.** Brasília, DF, 1996.

BRASIL. Resolução Autorizativa nº 328 de 12 de ago. de 2004. **Aprova o Estatuto do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.** Brasília, DF, 2004.

BRASIL. Resolução Norativa nº 293 de 4 de dez. de 2007. **Aprova as Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008, de que trata a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica instituída pela Resolução Normativa nº 109, de 26 de outubro de 2004, e dá outras providências.** Brasília, DF, 2007.

BRASIL. Resolução Normativa nº 395 de 15 de dez. de 2009. **Aprova alteração no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.** Brasília, DF, 2009.

BRASIL. Resolução Normativa nº 729 de 28 de jun. de 2016. **Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações sob responsabilidade de concessionária de transmissão integrantes da Rede Básica e das instalações de transmissão de energia elétrica destinadas a interligações internacionais que se conectam à Rede Básica, conforme Resolução Normativa nº 442, de 26 de julho de 2011, e dá outras providências.** Brasília, DF, 2016.

Cigré-Brasil. **Guia de manutenção para transformadores de potência.** Grupo de trabalho A2.05, Novembro de 2013.

DOS SANTOS, Kristian Pessoa; MONTE, Augusto César Sousa Braga. **COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.** 58 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Estadual do Piauí, Teresina, 2009.

FUCHS, R. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teorias das linhas em regime permanente.** [S.I.]: Livros Técnicos e Científicos. ISBN, 1979.

GRAINGER, J.; STEVENSON, W. **Power system analysis.** [S.I.]: McGraw-Hill, 1994. (McGraw-Hill series in electrical and computer engineering: Power and energy). ISBN.

IEEE Power Systems Relaying Committee. **IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors.** ANSI/IEEE C37.109, 1988.

INFOMONEY. **Das geradoras às transmissoras: como cada elétrica é impactada pelo “risco apagão”?** Disponível em: <<http://www.infomoney.com.br/mercados/acoes-e-indices/noticia/3174832/das-geradoras-transmissoras-como-cada-eletrica-impactada-pelo-risco-apagao>>. Acesso em: 13/04/2019.

INGEMAR, O. Elgerd. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica.** São Paulo: McGraw-Hill, 1925.

JÚNIOR, José Carneiro Fernandes. **Comissionamento de um reator de barra de 500 kV na subestação de Fortaleza II da CHESF.** 120 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

JUNIOR, José Vicente Oliveira. **Reatores para controle de fluxo de potência e suas consequências para a qualidade de energia.** 55 f. Trabalho de conclusão de curso de especialização – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2012.

MARCOS, Rocha. **Curso básico de reatores com núcleo de ar.** Itajubá: Alston, 2002.

MAXWELL. **Cap 2. Controle de tensão em sistemas elétricos de potência.** PUC-Rio. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11488/11488_3.PDF. Acesso: 12/03/2019.

MENDES, Aniela Maria Peixoto. **LINHA DE TRANSMISSÃO DE POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA COM MULTITERMINAIS NA RECEPÇÃO.** 172 f. Tese de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MENEZES, Alex Vilarindo. **A Proteção de Retaguarda para Linhas de Transmissão aplicando Medição Fasorial Sincronizada.** 147 f. Tese de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MONTEIRO, Andréia Maia. **Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-círcuito com ênfase no IPC (INTREPHASE POWER CONTROLLER).** 129 f. Tese de pós-graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

NEGRÃO, Martin Max Luis de Castro. **Modelo Matemático de linhas de transmissão, contemplando influências ambientais, para o trecho Guamá – Utinga, localizado em Belém, pertencente à Eletronorte.** 164 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Indicadores de Confiabilidade da Rede Básica.** Disponível em:
http://www.ons.org.br/indicadores_desempenho/qualidade_operacao. Acesso em: 13 de Fevereiro de 2018.

PAVÃO, Rafael Kubiça. **AVALIAÇÃO DE UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO UTILIZANDO SELEÇÃO DE BARRAS PILOTO E ÁREAS DE CONTROLE ATRAVÉS DE LÓGICA FUZZY.** Tese de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PORTELLA, Klinger. **O Sistema Interligado Nacional (SIN) conecta as usinas hidrelétricas e termelétricas do Brasil em uma grande rede de transmissão.** Fonte: Último Segundo, 11 de Novembro de 2009. Disponível em: <<http://ultimosegundo.ig.com.br/apagao/conheca-o-sistema-de-geracao-e-transmissao-de-energia-do-brasil/n1237786446721.html>>. Acesso em: 12/02/2019.

RICHARD F.; DUDLEY, M. S. (s.d.). **Chapter 10 Reactors of Electric Power Transformer Engineering.** (Second Edition) (Chapter 10). James H. Harlow.

RODRIGUES, João Paulo Carneiro.; SILVA, Laríssa de Paiva. **Avaliação da proteção de reatores shunt de linhas de transmissão.** 93 f. Trabalho de Conclusão de curso – Departamento de Engenharia Elétrica – UnB, Brasília, 2014.

SIEMENS. Disponível em: <<http://new.siemens.com/global/en/products/energy/high-voltage/transformers/reactors.html>>. Acesso em: 20/03/2019.

SILVA, Alex Gomes da. **Bancada para Simulação de linhas de transmissão.** 73 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2017.

Transformers Shunt Reactors. <http://www.energy.siemens.com/us/poll/us/power-transmission/transformers>. Acesso em: 13/03/2019.

Trench. Reatores. Fonte: Products Brazilian. Disponível em: http://www.trenchgroup.com/en/.../TrenchCoil%20Products_Brazilian%20Portuguese. Acesso em: 15/02/2019.