

WELINGTON MARCELINO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS COMPENSAÇÕES FIXAS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM ÊNFASE NOS BANCOS DE CAPACITORES
SÉRIE**

BRASÍLIA

2018

WELINGTON MARCELINO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS COMPENSAÇÕES FIXAS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM ÊNFASE NOS BANCOS DE CAPACITORES
SÉRIE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB.

Orientador: Prof. Ms. Luciano Henrique Duque.

BRASÍLIA

2018

WELINGTON MARCELINO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS COMPENSAÇÕES FIXAS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM ÊNFASE NOS BANCOS DE CAPACITORES
SÉRIE**

Projeto Final apresentado como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB.

BRASÍLIA, 28 DE JUNHO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Luciano Henrique Duque

Orientador

Prof. Ms. Nilo Sérgio Soares Ribeiro

Examinador

Profa. Dra. Ingrid Maria Dittert

Examinadora

Dedico este trabalho a minha mãe Deusgilda, com muito amor, admiração e gratidão. E a todo restante da minha família, em especial ao meu tio Pedro e minha tia Deuslange, por toda confiança e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Deusgilda, que mesmo à distância, sempre acreditou e apoiou de forma incondicional esta minha jornada. Ao meu tio Pedro e minha tia Deuslange, que desde o início depositaram uma enorme confiança em meu sucesso, e todos os meus familiares.

Ao Centro Universitário de Brasília e todo o seu corpo docente, que abriram esta oportunidade de estudo e crescimento.

A todos os meus professores e professoras, especialmente ao meu orientador Prof. Luciano Henrique Duque por toda sua sabedoria e que esteve comigo desde o primeiro dia de aula no UniCEUB, também um agradecimento ao Prof. Nilo Sérgio Soares Ribeiro por todo o conhecimento transmitido e sem isso, este trabalho não seria possível.

Ao meu Supervisor Antônio Gabriel, e todos os meus colegas e amigos da Plena, que proporcionaram o meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional no setor elétrico.

Aos meus colegas e amigos da faculdade, Flávio, Welton, Leonardo e Felipe, por todo o companheirismo.

As minhas colegas e grandes amigas, Nathalia Salomão que sempre esteve pronta auxiliar em todos os momentos, e a Nathalia Freitas que tanto considero e admiro, não só pessoalmente, mas profissionalmente também, pois sem ela eu não teria a oportunidade de adentrar neste setor tão fascinante da engenharia elétrica.

Também um agradecimento muito mais que especial a minha namorada Ranielle, que nos momentos finais se manteve paciente em minhas ausências, sempre me incentivando e fazendo eu acreditar que tudo era possível.

E por último, mas não menos importante, as minhas amigas Kate e Letícia, que me acompanharam e me apoiaram desde de antes de iniciar o curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise das compensações série e paralela em sistemas elétricos de potência com fontes simétricas e cargas equilibradas. Tendo em vista que o aumento do consumo de energia elétrica previsto para os próximos anos, se faz necessário que o Sistema Interligado Nacional (SIN) seja ainda mais robusto para atender a essas novas demandas. Essa implicação, na área da transmissão de energia, resulta em estudos para análise do desempenho e proposição de novas soluções para o devido atendimento às demandas, mas para isso, tem que avaliar os custos elevados e os impactos no meio ambiente. Os equipamentos, chamados de compensadores, podem atender essas necessidades sem impor altos gastos e utilização de uma área muito menor. Neste trabalho, o estudo é feito através da união de cálculos teóricos utilizando constantes generalizadas em quadripolos equivalentes com modelos computacionais feitos a partir do *software Alternative Transients Program (ATP)*. Sendo observado nesses modelos que na compensação série fixa há influência direta na redução da indutância natural e, com isso, provocando melhoras significativas na estabilidade sistêmica e aumento na capacidade de transmissão da linha. Já na compensação paralela capacitiva fixa, é gerado a energia reativa necessária as cargas, resultando em melhorias no fator de potência e minimizando as quedas de tensão. E na compensação indutiva fixa, é consumido o reativo gerado em excesso pelas linhas, e assim reduzindo o Efeito *Ferranti*, mantendo as barras dentro dos limites operacionais desejados.

Palavras chave: Transmissão de energia. Constantes generalizadas. ATP. Compensação série. Estabilidade. Compensação paralela. Efeito *Ferranti*.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the series and parallel compensations in power systems with symmetrical sources and balanced loads. In view of the increase in electricity consumption expected in the coming years, it is necessary that the National Interconnected System (SIN) be even more robust to meet these new demands. This implication, in the area of energy transmission, results in studies to analyze the performance and proposition of new solutions for the due attendance of the demands, but for this it has to assess the high costs and impacts on the environment. Equipment called compensators, can meet these needs without imposing high costs and using a much smaller area. In this work, the study is made through the union of theoretical calculations using generalized constants in equivalent quadripoles with computational models made from the software Alternative Transients Program (ATP). It is observed in these models that in the fixed series compensation there is a direct influence on the reduction of the natural inductance and, with this, causing significant improvements in the systemic stability and increase in the transmission capacity of the line. Already in the parallel capacitive fixed compensation, the reactive energy required in the loads is generated, resulting in improvements in the power factor and minimizing the voltage drops. And in the fixed inductive compensation, the excess generated reactive by the lines is consumed, and thus reducing the Ferranti Effect, keeping the bars within the desired operational limits.

Keywords: Power transmission. Generalized constants. ATP. Series compensation. Stability. Parallel Compensation. Ferranti Effect.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
ATPDraw	Interface gráfica do <i>Alternative Transients Program</i>
BCS	Bancos de Capacitores Série
BT	Baixa Tensão
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão
CE	Compensadores Estáticos
CS	Chaves Seccionadoras
CT	Chaves de Terra
CY	Seccionadores de Desvio
DJ	Disjuntor
EAT	Extra-Alta Tensão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FP	Fator de Potência
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
LT	Linha de Transmissão
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i>
MT	Média Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
TC	Transformador de Corrente
UAT	Ultra-Alta Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{P}_C	Potência característica
\dot{S}_R	Potência aparente no receptor
\dot{Z}_C	Impedância característica
$\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ e \dot{D}	Constantes generalizadas das linhas de transmissão
C_S	Capacitância de serviço
D_{S_i}	Raio Médio Geométrico para condutores múltiplos
D_m	Distância Média Geométrica
I_L	Corrente de linha em regime
I_R	Corrente de fase no terminal receptor
I_T	Corrente de fase no terminal transmissor
L_S	Indutância de serviço
P_0	Potência de surto ou potência natural
P_R	Potência ativa no receptor
P_{Rmax}	Potência ativa máxima no receptor
P_e	Potência elétrica da linha de transmissão
Q_C	Potência reativa capacitiva trifásica
Q_{CD}	Quadripolo compensação em derivação
Q_{CS}	Quadripolo compensação série
Q_L	Potência reativa indutiva trifásica
Q_R	Potência reativa no receptor
Q_{Rnec}	Potência reativa necessária no receptor
Q_e	Quadripolo equivalente
R_C	Raio médio real para condutor múltiplos
R_{ca}	Resistência elétrica em corrente alternada
R_{cc}	Resistência elétrica em corrente contínua
V_L	Tensão nominal de linha
V_R	Tensão de fase no terminal receptor
V_T	Tensão de fase no terminal transmissor
X_{CS}	Reatância capacitiva de serviço
X_{LS}	Reatância indutiva de serviço
X_C	Reatância capacitiva

X_L	Reatância indutiva
Z_0	Impedância de surto ou impedância natural
γ	Constante de propagação
\emptyset	Fluxo magnético
B	Susceptância elétrica
cosh	Cosseno hiperbólico
sinh	Seno hiperbólico
δ	Profundidade de penetração
θ	Ângulo de transmissão
μ	Permeabilidade magnética total
G	Condutância elétrica
R	Resistência elétrica
S	Área da seção do condutor
Y	Admitância elétrica
Z	Impedância elétrica
f	Frequência de transmissão
l	Distância
\ln	Logaritmo natural
r	Raio do condutor
α	Constante de atenuação
β	Constante de fase
ρ	Resistividade do material
ω	Frequência angular de excitação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Elementos da metodologia a ser utilizada	20
Figura 2.1 - Circuito equivalente de uma LT com parâmetros distribuídos.....	24
Figura 2.2 - Quadripolo típico	30
Figura 2.3 - Modelo linha curta	31
Figura 2.4 - Modelo <i>Pi</i> Nominal para linhas médias.....	32
Figura 2.5 - Modelo <i>Pi</i> Equivalente para linhas longas	33
Figura 2.6 - Estrutura de uma linha com compensação reativa indutiva em derivação	37
Figura 2.7 - Reator de linha (TOSHIBA) de 24,5 MVar da LT 500 kV Nova Iguaçu/Taubaté-C1 fase Azul no terminal de Nova Iguaçu - Rio de Janeiro	38
Figura 2.8 - Capacitores <i>Shunt</i> trifásicos (SIEMENS) de 24,5 MVar conectados a barra de 138 kV na Subestação de Sete Lagoas 04 – Minas Gerais.....	39
Figura 2.9 - Estrutura de uma linha com compensação reativa capacitiva em série de ambos os terminais	40
Figura 2.10 - BCS (SIEMENS) de 115,93 MVar da LT 230 kV Jauru/Vilhena-C2 no terminal de Vilhena - Rondônia.....	42
Figura 2.11 - Configuração das Unidades Capacitivas do BCS	43
Figura 2.12 - Disjuntor Monofásico a mola	44
Figura 2.13 - Chaves Seccionadoras e suas configurações em relação ao BCS.....	45
Figura 2.14 - <i>Metal Oxide Varistor</i> e sua instalação	45
Figura 2.15 - <i>Spark Gaps</i> e sua instalação	46
Figura 2.16 - Circuito de Amortecimento e sua instalação	47
Figura 2.17 - Representação do diagrama de círculo	49
Figura 3.1 - <i>Pi</i> Equivalente com valores por km.....	53
Figura 3.2 - Modelo I montando no ATPDraw	54
Figura 3.3 - Modelo II montado no ATPDraw	55
Figura 3.4 - Exibição da linha por quadripolo e seus reatores <i>shunt</i>	56
Figura 3.5 - Modelo III montado no ATPDraw.....	57
Figura 3.6 - Exibição do capacitor no terminal receptor e o quadripolo equivalente do circuito	57
Figura 3.7 - Modelo IV montado no ATPDraw	58
Figura 3.8 - Exibição do capacitor no terminal transmissor e o quadripolo equivalente do circuito.....	58

Figura 3.9 - Modelo V montado no ATPDraw.....	59
Figura 3.10 - Exibição do capacitor no meio do circuito	61
Figura 3.11 - Modelo VI montado no ATPDraw	62
Figura 3.12 - Exibição do capacitor em cada terminal e o quadripolo equivalente da linha com os reatores	63
Figura 3.13 - Modelo VII montado no ATPDraw	63
Figura 3.14 - Exibição do capacitor em cada terminal e o quadripolo da linha e dos reatores em derivação.....	64
Figura 3.15 - Modelo VIII montado no ATPDraw.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Faixas de tensão de sistemas elétricos.....	16
Tabela 2.1 - Primeira aproximação para circuitos simples.....	35
Tabela 2.2 - Tensões de Operação do Sistema	48
Tabela 3.1 - Parâmetros da linha de transmissão.....	52
Tabela 3.2 - Potência total das cargas no tempo.....	52
Tabela 4.1 - Tensão RMS (kV) do modelo I e II no receptor	67
Tabela 4.2 - Tensão RMS (kV) do modelo II e III no receptor	69
Tabela 4.3 - Tensão RMS (kV) do modelo II e IV no receptor.....	70
Tabela 4.4 - Tensão RMS (kV) do modelo II e V no receptor	71
Tabela 4.5 - Tensão RMS (kV) do modelo II e VI no receptor.....	72
Tabela 4.6 - Tensão RMS (kV) do modelo II e VII no receptor	73
Tabela 4.7 - Tensão máxima de pico na rejeição de carga	73
Tabela 4.8 - Tensão RMS (kV) dos Modelo I ao VII no receptor.....	74
Tabela 4.9 - Potência dos BCS e a redução da reatância indutiva no sistema	75
Tabela 4.10 - Potência máxima e reativo necessário.....	77
Tabela 4.11 - Ângulos de estabilidade máximos e operação.....	78
Tabela 4.12 - Ângulos (°) de operação do terminal receptor no ATPDraw	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 - Relação entre potência e ângulo.....	18
Gráfico 2.1 - Geração e consumo de reativos pelas Linhas de Transmissão.....	35
Gráfico 2.2 - Influência na estabilidade em relação a alteração do ângulo	50
Gráfico 4.1 - Comparativo entre tensão e corrente no terminal receptor para o aumento linear das cargas.....	66
Gráfico 4.2 - Paridade de tensão de linha (V) entre os Modelos I e II.....	67
Gráfico 4.3 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e III.....	68
Gráfico 4.4 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e IV	69
Gráfico 4.5 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e V	70
Gráfico 4.6 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e VI.....	71
Gráfico 4.7 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e VII	72
Gráfico 4.8 - Visão superior da tensão senoidal no receptor.....	80
Gráfico 4.9 - Tensão de linha no Modelo VIII e comparação	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos do Trabalho	19
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	19
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
1.2 Metodologia.....	20
1.3 Motivação	21
1.4 Resultados Esperados	22
1.5 Trabalhos Correlatados.....	22
1.6 Estrutura de Trabalho	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Impedância e Admitância	24
2.1.1 <i>Resistência elétrica dos condutores na Transmissão de energia</i>	25
2.1.2 <i>Indutância em Linhas de Transmissão</i>	26
2.1.3 <i>Capacitância em Linhas de Transmissão</i>	28
2.1.4 <i>Condutância em Linhas de Transmissão</i>	29
2.2 Representação das linhas de transmissão por Quadripolos	30
2.2.1 <i>Constantes generalizadas das linhas de transmissão</i>	31
2.2.2 <i>Linhas curtas</i>	31
2.2.3 <i>Linhas médias</i>	32
2.2.4 <i>Linhas longas</i>	32
2.3 Compensação em derivação (<i>shunt</i>).....	36
2.3.1 <i>Reatores shunt</i>	36
2.3.2 <i>Capacitores shunt</i>	38
2.4 Compensação série	39
2.4.1 <i>Calculo teórico</i>	40
2.4.2 <i>Estrutura e equipamentos de proteção do BCS</i>	42
2.5 Limites Operacionais das linhas de transmissão	47
2.6 Transmissão de potência e Estabilidade	48
3 METODOLOGIA	51
3.1 <i>Software ATPDraw</i>	51

3.2 Sistema analisado	51
3.3 Parametrização da linha de transmissão	52
3.4 Modelo Computacional	54
3.4.1 Modelo I.....	54
3.4.2 Modelo II.....	55
3.4.3 Modelo III.....	56
3.4.4 Modelo IV.....	58
3.4.5 Modelo V.....	59
3.4.6 Modelo VI.....	61
3.4.7 Modelo VII	63
3.4.8 Modelo VIII.....	65
4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	66
4.1 Níveis de tensão dos modelos	66
4.1.1 Comparativo com e sem a compensação paralela.....	67
4.1.2 Adição da compensação série a paralela	68
4.1.3 Valores de rejeição de carga	73
4.1.4 Quadro Geral e o SIL.....	73
4.2 Potência dos compensadores e eficiência.....	74
4.2.1 Em derivação	74
4.2.2 Série.....	75
4.3 Potência Máxima e Estabilidade sistêmica.....	76
4.4 Configuração final	79
5 CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS	84
ANEXO A.....	86

1 INTRODUÇÃO

Nesses anos recentes com o aumento gradativo do consumo de energia elétrica tem-se a necessidade de aumento da capacidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), através de meios mais baratos e que também ofereçam mais segurança ao sistema.

Portanto, para termos respostas mais seguras de qual o melhor caminho devemos adotar, deve ser feita uma análise do sistema brasileiro do qual é dividido em três grandes partes com fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A geração é feita por diferentes empresas de vários tamanhos e os principais tipos segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) são as hidráulicas com 68,1%, gás natural com 9,1%, biomassa com 8,2% e as eólicas com 5,4%. (EPE, 2017) Já a transmissão e distribuição levam essa potência gerada aos consumidores livres e cativos.

A coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN é feita pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), compreendendo a rede básica com tensões a partir de 230 kV e a rede complementar, representando interligações entre transmissão e distribuição, incluindo usinas sob despachos centralizados (ONS, 2016). Os níveis de tensão tipicamente usados mundialmente e sua classificação são exibidos na Tabela 1.1 a seguir.

Tabela 1.1 - Faixas de tensão de sistemas elétricos

Sigla	Nome	Faixa de valores de tensão de linha [kV]
BT	Baixa Tensão	$V \leq 1$
MT	Média Tensão	$1 < V \leq 35$
AT	Alta Tensão	$35 < V \leq 230$
EAT	Extra-Alta Tensão	$230 < V \leq 765$
UAT	Ultra-Alta Tensão	$V > 765$

Fonte: Adaptado, GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica (LEÃO, 2009).

Devido ao tamanho continental do território brasileiro com cerca de 8,5 milhões de quilômetros quadrados e tendo grande parte de suas fontes geradoras distantes das cargas, faz-se necessário um sistema robusto de transmissão de energia para o escoamento de toda essa produção. Atualmente, o Brasil já conta com uma malha de 130 mil quilômetros de linhas de

transmissão em corrente alternada e contínua com uma previsão de aumento para mais 40 mil até 2023 (ONS, 2017).

Assim, têm-se a necessidade de compreender e estudar mais afundo a transmissão de energia elétrica e os componentes que a integram. No Brasil, o registro da primeira linha de transmissão é datada por volta de 1883, em Minas Gerais e já em 1901, foi registrada a entrada em funcionamento a primeira linha de 40 kV, níveis de tensão e comprimentos que foram se elevando até a entrada em operação da linha de Furnas operando em 765 kV em 1986 de corrente alternada com três circuitos que partem de Itaipu até São Paulo (FUCHS, 2015).

Atualmente, temos no Brasil cinco linhas de Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) ou *High Voltage Direct Current* (HVDC) operando, duas provenientes de Itaipu e com mais duas do complexo do Rio Madeira em ± 600 kV, e mais uma em operação de Belo Monte em ± 800 kV, com uma segunda em estágio final de construção (ONS, 2018). Devido às características de não variação de fluxo destes tipos de linhas, dentre outras peculiaridades, o presente trabalho foca exclusivamente em linhas de extra-alta tensão em corrente alternada.

O aumento no consumo de energia faz com que seja necessário dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP) o seu desenvolvimento e adequação. A construção de mais linhas de transmissão para atendimento a essa realidade pode não ser o melhor caminho, pois além de um custo muito alto e tempo demorado, tem-se a questão do meio ambiente devido a construção das torres e da necessidade das faixas de servidão.

Uma resposta a esse quadro é a compensação série fixa em linhas de transmissão de energia através da utilização de Bancos de Capacitores Série (BCS), que serve para aumentar a transferência de potência em regime permanente, além de regular as variações de tensão da linha (ANDERSON e FARMER, 1996). Fato este que, além de ser geralmente muito mais barato do que a construção de uma nova linha, o seu espaço de ocupação é bem menor, utilizando apenas uma parte da subestação para sua instalação.

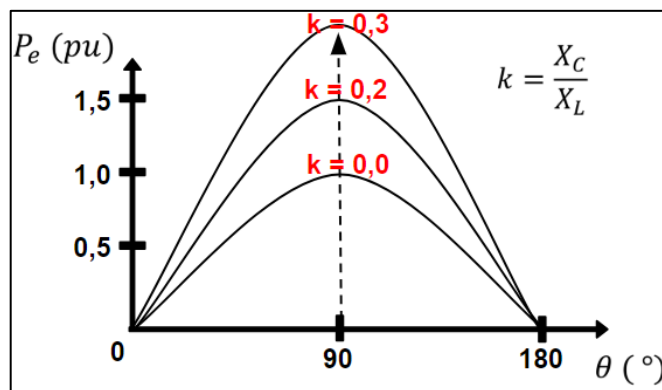
Há também, a compensação série controlada que é feita através de reatores controlados por tiristores em paralelo com os capacitores, fazendo com que se tenha fluxo máximo de potência na linha com segurança pela utilização de *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) dos diversos tipos (SOOD, 2002). Este presente trabalho será focado nas compensações série fixas, devido a sua simplicidade e a sua maior utilização no SEP brasileiro.

Em linhas de transmissão longas os parâmetros série de resistência (R , dado em ohm) e reatância indutiva (X_L , dado em ohm) são os principais responsáveis por influências nas quedas de tensão no decorrer da linha, além disso, a reatância indutiva afeta também o ângulo de potência (θ , dado em graus) alterando a estabilidade e reduzindo a máxima potência elétrica da linha (P_e , dado em W). A relação dessas variáveis pode ser vista na Equação (1.1).

$$P_e = \frac{V_T \cdot V_R}{R + X_L} \sin \theta \quad (1.1)$$

Em que V_T e V_R são, respectivamente, as tensões de fase no terminal transmissor e no receptor, para uma potência trifásico, é utilizado a tensão de linha. Assim ao inserimos bancos de capacitores ligados em série adicionamos à linha uma reatância capacitiva (X_C , dado em ohm) que se subtrai com a reatância indutiva, essa representação pode ser feita também por um ganho k , que reduz o ângulo de transmissão para uma mesma carga, conforme visto no Gráfico 1.1.

Gráfico 1.1 - Relação entre potência e ângulo



Fonte: Adaptado, Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência (ZANETTA, 2005).

A característica do capacitor série é gerar energia reativa alterando assim o equilíbrio da linha, distribuindo melhor as cargas e reduzindo as perdas globais do sistema. Os bancos além de, serem estáticos também podem ser dinâmicos, esses por sua vez são bem menos utilizados devido ao seu custo de implementação, mas com os avanços na tecnologia da eletrônica de potência isso vem se tornando cada vez mais possível.

Já a compensação paralela atua diretamente no valor de tensão do receptor aumentando ou reduzindo de acordo com o equipamento utilizado. Quando se tem altos valores ou

principalmente baixos valores de fator de potência nas unidades consumidoras faz-se necessário o seu controle, devido a perdas na instalação, sobrecargas e quedas de tensão podendo ser gerado até multas para quem não faz esse controle. Nas linhas de transmissão de energia esse controle também é essencial, sendo feito por capacitores *shunt* devido a necessidade de geração de reativo para o sistema ou por reatores (de linha ou de barra) para a absorção de reativos em demasia na linha (FUCHS, 2015).

A compensação *shunt* pode ser realizada por motores síncronos conhecidos como rotativos ou por equipamentos estáticos, como os reatores indutivos ou bancos de capacitores que também podem ser usados juntos no mesmo equipamento, por exemplo os Compensadores Estáticos (CE) conhecidos também por *Static Var Compensator* (SVC) ou o *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) representativo da família FACTS.

O presente trabalho utilizará como base as linhas de transmissão aéreas, que é muito mais presente no Brasil, entendendo os aspectos elétricos e magnéticos que mostram os fundamentos da transmissão e assim estabelecer os parâmetros das linhas para a modelagem da mesma em regime permanente na Interface gráfica do *Alternative Transient Program* (ATPDraw). O estudo é feito em um sistema isolado simétrico, com parametrização da linha, considerando sua correta transposição e com a utilização de cargas equilibradas.

1.1 Objetivos do Trabalho

Os objetivos deste trabalho são divididos em duas partes, gerais e específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é analisar qual o desempenho das compensações paralela e série no sistema, sendo instalados em linhas de extra-alta tensão e próximos as cargas, e a influência na capacidade de transmissão de energia com a estabilidade sistêmica.

1.1.2 Objetivos Específicos

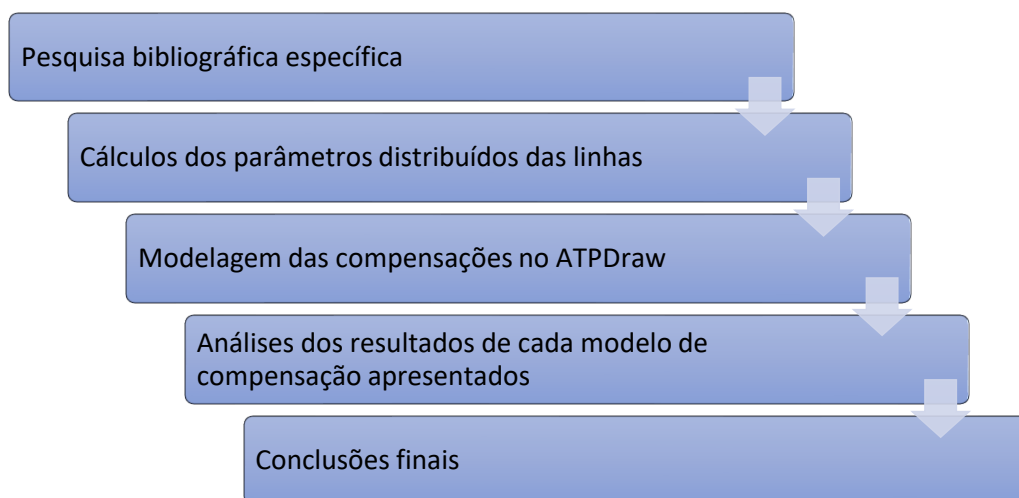
Para os objetivos específicos, estão em demonstrar:

- I. A montagem da linha de transmissão longa com o modelo *Pi* equivalente através de parâmetros distribuídos;
- II. A representação da Linha de Transmissão (LT) com quadripolo equivalente para todos os modelos de compensação com as alterações nas constantes generalizadas da linha;
- III. Os efeitos nos níveis de tensão que cada modelo gera e a comparação com os limites básicos do ONS, partindo da operação em vazio, aumento de potência e rejeição de carga;
- IV. Análises das potências dos equipamentos instalados frente a eficiência que geram ao sistema com a alteração das constantes; e
- V. As alterações na capacidade de transmissão da linha com as mudanças nos ângulos de estabilidade do sistema.

1.2 Metodologia

Demonstrar na metodologia de forma exploratória e explicativa através de fontes bibliográficas e uso de modelo computacional os resultados qualitativos obtidos de forma a aperfeiçoar conceitos e ideias sobre o tema abordado. A metodologia deste projeto classifica-se conforme a ilustração da Figura 1.1.

Figura 1.1 - Elementos da metodologia a ser utilizada



Assim, dentro da bibliográfica específica é revisada as principais fórmulas de cálculo para os parâmetros utilizados. Como a impedância (resistência, indutância e capacitância) e a admitância (condutância e susceptância), e assim utilizar esses parâmetros dentro dos quadripolos através das constantes generalizadas da linha de acordo com o tamanho da linha. Sendo observados também a impedância de surto e a potência natural com sua relação na potência elétrica.

Neste tema também é abordado os tipos de compensação fixa, a paralela por meio dos reatores de linha e os bancos de capacitores *shunt*, e a série com os Bancos de Capacitores Série. Sendo esse último visto de maneira superficial os principais equipamentos de proteção conectados a plataforma, como o disjuntor de *bypass*, circuito de amortecimento (resistor e indutor), *Metal Oxide Varistor* (MOV) e *Spark Gap*.

Os cálculos teóricos dos parâmetros distribuídos e das compensações são realizados dentro da metodologia, aonde obtém-se os valores que são inseridos no ATPDraw possibilitando a modelagem computacional de oito configurações diferentes.

Sendo obtidos os resultados necessários para análise e comparação desses modelos, os mesmos foram divididos quanto a:

- Níveis de tensões nos terminais receptores com os limites operacionais das linhas de transmissão segundo ONS e ANEEL;
- Potência dos compensadores em derivação e em série, e sua eficiência na redução dos reativos; e
- Estabilidade estática e potência máxima a ser transmitida.

Assim, sendo configurado um modelo computacional que atende aos limites de operação dos projetos e finalmente realizada as conclusões finais quanto ao impacto no sistema das diferentes configurações utilizadas.

1.3 Motivação

Com o aumento crescente da demanda energética no sistema elétrico brasileiro, necessita-se de tecnologias e equipamentos que aumentem capacidade de transmissão como

também sua confiabilidade, através de meios que sejam mais econômicos e que não interfiram tanto na qualidade inicial do projeto.

1.4 Resultados Esperados

Demonstrar com cálculos práticos e computacionais, através do *software* ATPDraw, como a instalação de equipamentos de compensação melhoram os níveis de tensão desejados, aumentam a capacidade de fluxo de potência nas linhas de transmissão e influenciam diretamente na estabilidade estática.

1.5 Trabalhos Correlatados

Existem vários trabalhos relacionados a compensação de linhas de transmissão.

Como por exemplo, Paulo H. O. Rezende, Fabrício P. Santilho, Lucas E. Vasconcelos e Thiago V. Silva, fizeram um artigo técnico para apresentação durante a XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica tendo como a principal objetivo a apresentação de casos de estudo para a compensação fixa de reativos em linhas de transmissão de energia elétrica de 230 kV com a utilização do Software ATPDraw (REZENDE, *et al.*, 2013).

Foram utilizados 8 casos, do qual o primeiro utilizando apenas compensação em derivação, mais 4 casos só envolvendo arranjos com compensação série e mais os últimos 3 casos com a utilização de ambas as compensações fixas, só alternando suas posições. Visando assim a redução ou eliminação do Efeito *Ferranti*, com o acompanhamento das tensões nos terminais receptores.

Ulas Eminoglu, M. Hakan Hocaoglu e Tankut Yalcinoz em seu artigo no *International Journal of Electrical Engineering Education* apresentam uma análise dos efeitos dos níveis de compensação de linha para série e *shunt* no perfil de tensão de linha de transmissão, potência transferida e perdas de transmissão para diferentes modelos de cargas estáticas (EMINOGLU, *et al.*, 2009).

Aonde diferentes níveis de compensação série e em derivação são usados com vários modelos de carga sensível à tensão para dois modelos de linha diferentes. Observando que o nível de compensação é significativamente afetado pelas sensibilidades de tensão das cargas e

que o nível de tensão da transmissão é uma questão importante para a seleção dos tamanhos dos capacitores série e paralelo.

Já Himanshu M. Joshi e Nishant H. Kothari apresentaram um artigo que foi publicado no *International Journal of Engineering Development and Research* sobre os efeitos positivos dos BCS's, como possibilitar o aumento de potência transmitida na linha e a regulação de tensão, e também negativos, como da inserção dos capacitores séries em linhas de transmissão de energia que alteram o correto cálculo do exato ponto de faltas, devido a alteração da impedância da linha (JOSHI e KOTHARI, 2014).

1.6 Estrutura de Trabalho

O presente trabalho é feito através do desenvolvimento de 5 capítulos, conforme descritos a seguir.

O capítulo 1 é composto pela introdução ao tema abordado, seus objetivos gerais e específicos, a metodologia utilizada para realização do projeto, a motivação do mesmo e os resultados esperados.

O capítulo 2 é o referencial teórico usado para a execução do trabalho.

O capítulo 3 demonstra o sistema a ser utilizado para análise e os modelos computacionais.

O capítulo 4 analisa os resultados obtidos conforme simulações.

E por último, o capítulo 5 traz as conclusões finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os aspectos elétricos fundamentais para o cálculo de parâmetros em linhas de transmissão envolvem características elétricas, dimensões e distância entre os cabos. Com isso esses parâmetros são relacionados principalmente com fatores mecânicos.

2.1 Impedância e Admitância

A impedância (Z) pode ser representada por uma grandeza complexa, sendo a parte real, a resistência, e a reatância indutiva (+) ou capacitiva (-) a parte imaginária, conforme Equação (2.1) onde a unidade é dada em *ohm* ou Ω .

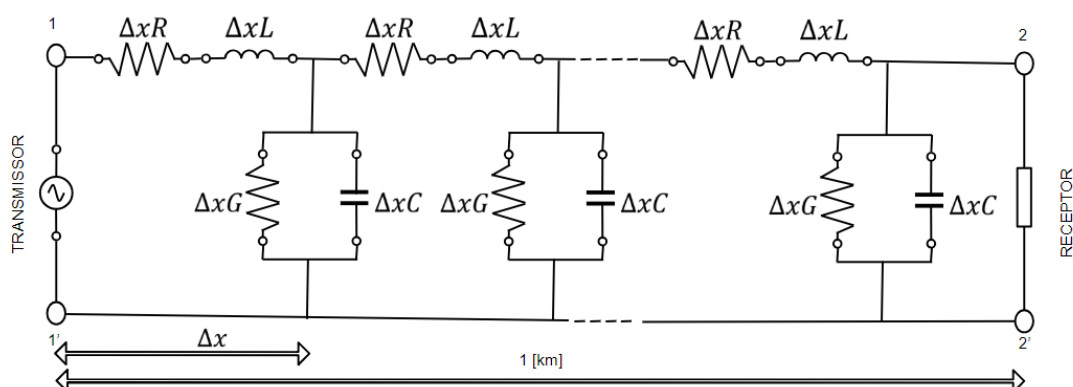
$$Z = R \pm jX \quad (2.1)$$

Já a admitância fica sendo o inverso da impedância, conforme Equação (2.2), tendo assim a condutância G mais a susceptância B , e dado a unidade em *Siemens* (S) ou MHO.

$$Y = Z^{-1} = G \pm jB \quad (2.2)$$

Por meio de ondas eletromagnéticas é feito o transporte da energia saindo do transmissor até o receptor, e essa conexão entre os dois pontos pode ser representada por parâmetros distribuídos ao longo de uma LT conforme representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Circuito equivalente de uma LT com parâmetros distribuídos



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Diferente de circuitos elétricos básicos que podem ser representados através de parâmetros concentrados como um resistor ou indutor, na LT esses valores são representados a

cada elemento infinitesimal de LT e podem ser diferentes a cada divisão, devido a perdas nos condutores (resistência) e nos dielétricos (condutância) em diferentes partes da linha. O parâmetro série de uma linha de transmissão é representado pela resistência e pela reatância indutiva. E já o parâmetro paralelo é representado pela condutância e a susceptância capacitiva.

2.1.1 Resistência elétrica dos condutores na Transmissão de energia

O material usado em linhas de alta tensão para a condutividade é o alumínio, principalmente por motivos de menor preço e peso, com relação ao cobre. Já para suportar o mesmo é adicionado ao condutor outros materiais, como exemplo, alma de liga de alumínio ou alma de aço. No condutor os fios são enrolados uns nos outros sobre o principal, em várias camadas, fato este que causa o encordoamento do cabo alterando o tamanho real da linha, assim considerando também as flechas devido ao peso dos cabos entre as torres com comprimento l , o valor real fica em torno de $1,02 * l$ (ZANETTA, 2005).

O Efeito Joule é a transformação de energia elétrica em energia térmica quando um condutor com certa resistência é percorrido por uma corrente. É a resistência deste condutor em corrente contínua (R_{cc} , dado em ohm) que ocasiona essa perda que pode ser representada pelo produto da resistividade do material (ρ , dado em $ohm.mm^2/m$) com o comprimento (l , dado em m) pela razão com a área da seção do condutor (S , dado em mm^2), conforme Equação (2.3).

$$R_{cc} = \frac{\rho * l}{S} \quad (2.3)$$

Já em corrente alternada além dos valores físicos para o cálculo da resistência, também deve ser levada em conta a frequência. Na corrente contínua os elétrons percorrem de forma uniforme a seção transversal do condutor, fato este que não ocorre na alternada, pois há um afastamento da intensidade na área interna e quanto maior a frequência menor vai ser a área efetiva de condução no cabo, fenômeno esse conhecido como Efeito Peculiar ou *Skin Effect*.

A correção do valor de resistência pode ser feita através do cálculo da profundidade de penetração (δ , dado em m), conforme Equação (2.4), com relações entre a frequência (f , dada em *Hertz*), a resistividade do condutor ρ e a permeabilidade magnética total μ . E assim, utilizando o valor da resistência em corrente contínua junto com o raio do condutor (r , dado em m), conforme Equação (2.5), é feita a correção.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi} * f * \mu} \quad (2.4)$$

$$R_{CA} = R_{CC} \frac{r}{2 * \delta} \quad (2.5)$$

Entretanto, em pesquisas foram demonstrados que baixos valores de frequência como no caso do trabalho em 60 Hz o fator de correção acabando sendo muito insignificante, e assim quando a profundidade de penetração é maior que o raio do condutor $\delta > r$ esse efeito pelicular acaba que quase não existindo no condutor e assim o $R_{CA} = R_{CC}$ neste valor baixo de frequência (FUCHS, 2015). Vale ressaltar que os valores utilizados de resistência em corrente alternada nos projetos são retirados diretamente das tabelas dos fabricantes e que já vem distribuídos de acordo com as temperaturas de operação. Valores esses que, quando verificados nota-se uma proximidade muito grande entre as resistências de corrente alternada e contínua, sendo essa última um pouco menor.

No caso de mais de um condutor por fase, tendo o valor do condutor em mãos, é só realizar a divisão dessa resistência pelo número de subcondutores e assim teremos o valor da resistência por fase.

2.1.2 Indutância em Linhas de Transmissão

Nos condutores a indutância é definida pelos tamanhos e pela disposição dos mesmos na linha, que leva em conta também a natureza magnética e a frequência de transmissão. Nas linhas de transmissão é assumido um valor constante de indutância para qualquer nível de corrente, pois o ar possui permeabilidade magnética constante e assim temos uma relação linear entre fluxo magnético Φ e a corrente i , $\Phi = L * i$. Com isso, é adotado valores de tensão no tempo com o produto entre a indutância e a derivada da corrente no tempo conforme Equação (2.6). Em regime permanente senoidal substituindo os fasores, tem-se assim a relação entre tensão e corrente, de acordo com Equação (2.7), semelhantes ao resistor, sendo ω a frequência de excitação (ZANETTA, 2005).

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.6)$$

$$V = j\omega LI \quad (2.7)$$

Representando assim, entre tensão e corrente uma defasagem de 90 graus, sendo a corrente no indutor atrasado em relação a tensão.

Em um condutor, temos duas parcelas de fluxo magnético, uma externa e outra interna, sendo elas são proporcionais, a intensidade da corrente tem a constante de proporcionalidade igual a indutância, e ao dividir ambos pela corrente temos a indutância total como a soma dessas duas parcelas. Entretanto, na análise em um sistema com mais um de condutor há um enlaçamento do fluxo, do qual podem ser representados por indutâncias aparentes.

Neste trabalho é considerado o sistema elétrico equilibrado, com tensões na fonte e cargas no receptor, com corrente por fasores equilibrados em modulo e fase, ou seja, sem corrente pelo neutro. Assim, os fatores de correção pelo solo e cabos para-raios em quase nada influenciam na indutância. Nas indutâncias aparentes após substituição de coeficientes de campo próprio e mútuos há a aparição da indutância de serviço (L_S , em H/km) conforme Equação (2.8), que serve para qualquer uma das fases (FUCHS, 2015).

$$L_S = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_{S_i}} \quad (2.8)$$

A Distância Média Geométrica D_m (DMG) é obtida entre os eixos longitudinais das fases a partir do centro do feixe e já o D_{S_i} é o Raio Médio Geométrico (RMG) para condutores com n subcondutores do qual é calculado considerando as influências de indutância entre os fios e os cabos devido à distância, conhecido também como raio efetivo.

Assim, a reatância indutiva de serviço (X_{L_S} , em Ω/km) é facilmente encontrada, conforme Equação (2.9). Como ela não depende das características do solo, pode ser considerada igual a reatância indutiva de sequência positiva. Os valores de cada condutor também podem ser obtidos pela Tabela do fabricante, já de acordo com a frequência utilizada.

$$X_{L_S} = 2 * 10^{-7} * \omega * \ln \frac{D_m}{D_{S_i}} \quad (2.9)$$

2.1.3 Capacitância em Linhas de Transmissão

Assim como a indutância, a capacitância é definida pelos tamanhos e pela disposição dos condutores na linha, mas que leva conta a natureza elétrica e a frequência de transmissão. Ao energizar condutores próximos uns dos outros, mesmo sem alimentar uma carga, haverá uma corrente capacitiva que irá ser fornecida ao gerador devido a interação entre os campos elétricos dos condutores. A carga elétrica de um condutor quando longe do solo e de outros condutores formam campos elétricos uniformes ao redor do mesmo e é obtida pela diferença de potencial sobre a capacitância.

Assim, ao adotando os valores de corrente no tempo com o produto entra a capacitância e a derivada da tensão no decorrer do tempo, temos a Equação (2.10). Em regime permanente senoidal, substituindo os fasores, tem-se assim a relação entre tensão e corrente, de acordo com a Equação (2.11), semelhantes ao resistor sendo ω a frequência de excitação (ZANETTA, 2005).

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.10)$$

$$V = \frac{1}{j\omega C} I \quad (2.11)$$

Neste caso, tem-se entre tensão e corrente uma defasagem de 90 graus, sendo a corrente no indutor adiantada em relação a tensão.

Na presença do solo, há a deformação desses campos elétricos antes uniformes, mas devido a distâncias, pouco se altera na capacitância. Nos casos aonde os cabos para-raios são aterrados nas estruturas, há a elevação do potencial do solo para a torre e assim cuidados maiores devem ser considerados no cálculo. Como nesse estudo os para-raios são isolados da estrutura, a capacitância de serviço (C_s , em F/km) é calculada levando em conta apenas as proporções físicas dos condutores.

$$C_s = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_m}{R_c}} \quad (2.12)$$

Neste caso o DMG é representado por D_m , sendo o mesmo utilizado no cálculo das indutâncias e o RMG agora representado por R_C , sendo utilizado para condutor múltiplo o raio real do subcondutor.

A capacitância de serviço também é considerada como de sequência positiva de uma linha trifásica, a validade desta afirmação também diz respeito a reatância capacitiva $X_C = (\omega C)^{-1}$ (X_C , dado em Ω/km) e assim podemos escrever através da Equação (2.12) como sendo a Equação (2.13):

$$X_C = 2,86479 \cdot 10^6 \frac{1}{f} \ln \frac{D_m}{R_C} \quad (2.13)$$

Por praticidade, em muitos modelos matemáticos e elétricos, o parâmetro utilizado para representar a parte imaginária da impedância paralela é a susceptância capacitiva (B , dado em $\text{Siemens}/\text{km}$) que pode ser obtida pelo produto entre a frequência angular e a capacitância, conforme Equação (2.14).

$$B = \omega C \quad (2.14)$$

2.1.4 Condutância em Linhas de Transmissão

A condutância é representada pela parte real da admitância sendo a derivação entre fase e neutro nos modelos das linhas e conhecida usualmente como condutância de dispersão (G , dado em $\text{Siemens}/\text{km}$). O Efeito Corona e as perdas nos isoladores são os fatores que fazem parte dessa dispersão (FUCHS, 2015).

O Efeito corona é uma descarga devido a ionização do ar que envolve um condutor em torno do qual existe um gradiente de potencial e esse excede o valor crítico disruptivo do ar provocando certa luminosidade e perdas de energia. Uma série de fatores alteram o valor desta tensão disruptiva como umidade, tipo de tensão aplicada, pressão do ar, dentre outras (GLÁSSIO, 1994).

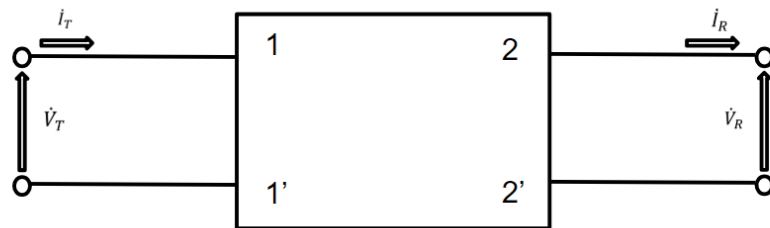
Já essas perdas de energia relacionada aos isoladores, também podem ser atribuídas a diversos fatores como condições climáticas, condições superficiais, geométrica e qualidade do isolador. No caso do presente trabalho, os valores de condutância não serão utilizados, devido

a prática nos cálculos e ao fato de seu valor ser muito menor em relação a susceptância, pois por exemplo, há isoladores específicos que mitigam essas perdas.

2.2 Representação das linhas de transmissão por Quadripolos

Para uma linha de transmissão em regime permanente senoidal e com comprimento finito, a representação do modelo por quadripolos auxilia bastante na análise dos circuitos elétricos por ele representado. Os quadripolos ou dois portos são configurados por um circuito tendo dois terminais de entrada chamados de terminal transmissor e dois de saída como o terminal receptor e relacionados através das constantes generalizadas da linha conforme Figura 2.2. No transmissor, as variáveis de tensão e corrente são consideradas variáveis independentes e no receptor como dependentes relacionadas por impedância e admitância do circuito analisado.

Figura 2.2 - Quadripolo típico



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Essa representação é bem conveniente ao estudo matemático, pois pode ser representado por um único modelo ou pode ser dividido em vários quadripolos sendo facilmente associados novamente. Mas algumas observações devem ser feitas como (FUCHS, 2015):

- I. Os elementos devem ser passivos e assim excluídos fontes de tensão.
- II. A resposta deve estar diretamente ligada a entrada por ser linear, e assim sendo obrigado a ter valores de impedâncias e admitâncias constantes.
- III. Deve ser representado por dois pares de terminais com uma entrada e um saída apenas.

2.2.1 Constantes generalizadas das linhas de transmissão

As constantes \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} e \dot{D} definem as características das linhas e por isso recebem o nome de constantes generalizadas das linhas de transmissão e são escritas conforme a Equação matricial (2.15).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Como o trabalho será em cima de um circuito simétrico, logo de início já podemos considerar $\dot{A} = \dot{D}$ e que outra propriedade também ficará valendo, conforme a Equação (2.16).

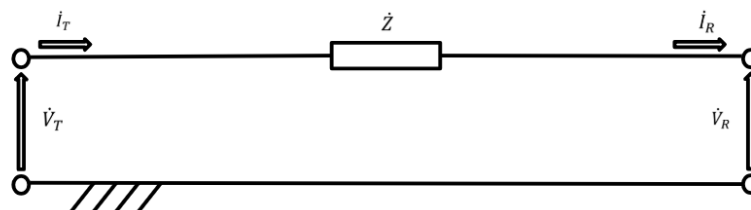
$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1 \quad (2.16)$$

Cada uma das constantes é calculada de forma diferente, dependendo do tamanho da linha que por ela vai ser representada, sendo dividida em linhas curtas, médias e longas. As duas últimas têm dois modelos correspondentes, o Circuito *Tee* e o Circuito *Pi*, e devido a facilidade e a sua maior utilização o trabalho será feito com base no modelo *Pi*.

2.2.2 Linhas curtas

É caracterizado como linhas inferiores a 80 quilômetros, e devido a esta pequena distância é desconsiderado em seu modelo a admitância, sendo o efeito capacitivo desprezado. Este modelo é representado pela Figura 2.3.

Figura 2.3 - Modelo linha curta



Fonte: Adaptado, Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência (ZANETTA, 2005).

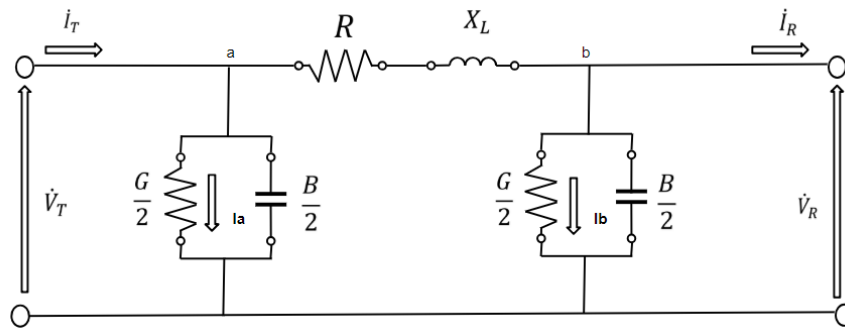
Assim, as constantes $\dot{A} = \dot{D} = 1$, $\dot{C} = 0$ representado pela admitância e já $\dot{B} = \dot{Z}$ representado pela impedância série, ficando a Equação total conforme equação (2.17).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.2.3 Linhas médias

Já as linhas médias entram na faixa entre 80 e 240 quilômetros, apesar de essa faixa pode ter algumas alterações em função do nível de tensão. O modelo utilizado é chamado de *Pi* Nominal e pode ser representado conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 - Modelo *Pi* Nominal para linhas médias



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Esse modelo pode representar sistemas bem complexos de energia, através de representação com parâmetros concentrados e considerados os efeitos da condutância e capacitância, conforme Equação (2.18), além de contar com a divisão da admitância em duas partes iguais para melhor representação e daí a origem do nome devido a semelhança com o π .

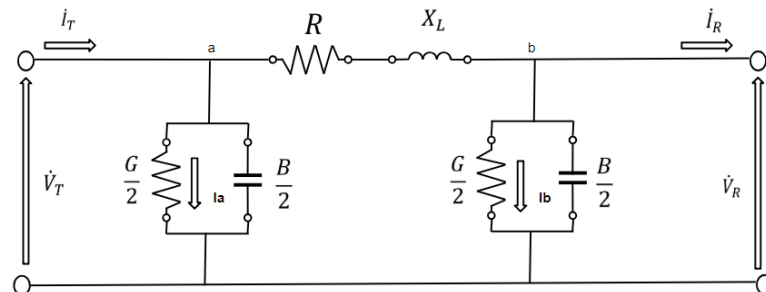
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} & \dot{Z} \\ 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4} & 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.2.4 Linhas longas

Em uma linha genérica longa a partir de 240 quilômetros é adotado o modelo chamado de *Pi* Equivalente ou *Pi* Exato, conforme Figura 2.5, e devido a sua generalidade pode ser aplicado para todas as outras linhas. Seu modelo de representação é praticamente o mesmo das

linhas médias, devendo entretanto, serem corrigidos os valores de suas constantes por funções hiperbólicas.

Figura 2.5 - Modelo Pi Equivalente para linhas longas



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Entretanto, o quadripolo tem que ser corrigido adequadamente para retratar os parâmetros distribuídos e para isso é necessário o conhecimento sobre a constante de propagação ($\dot{\gamma}$, dada em 1/km) e a impedância característica (\dot{Z}_C , dada em ohm).

Quando temos uma relação entre a corrente que flui por um ponto qualquer da linha e a essa uma próxima corrente em um outro ponto, tendo o resultado entre a sobreposição de duas ondas progressivas se propagando em sentidos opostos obtemos a constante de propagação, conforme Equação (2.19).

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{Z}\dot{Y}} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.19)$$

Do resultado desta Equação, temos a parte real conhecida como constante de atenuação (α , dado em néper/km) que determina o modo como as amplitudes de corrente e tensão são amortecidas no decorrer da linha e a parte imaginária chamada de constante de fase (β , dado em rad/km) que corresponde a variação de fase que as ondas sofrem por unidade de comprimento (BAKSHI, 2012).

A impedância característica, conforme equação (2.20), vem da relação entre tensão e corrente no mesmo espaço, não dependendo do que está na extremidade da linha e é escrita em número complexo com fase um pouco negativa com uma parcela bem pequena de reativo.

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\dot{Z}}{\dot{Y}}} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (2.20)$$

As constantes generalizas para linhas longas são obtidas alterando os termos \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} e \dot{D} ;

$$\dot{A} = \dot{D} = \cosh(\dot{\gamma}l) \quad (2.21)$$

$$\dot{B} = \dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma}l) \quad (2.22)$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma}l) \quad (2.23)$$

E assim representado em forma matricial, conforme Equação (2.24):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\dot{\gamma}l) & \dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma}l) \\ \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma}l) & \cosh(\dot{\gamma}l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Quando é adotado o modelo de uma linha ideal, sem perdas, a impedância característica apresenta um comportamento puramente resistivo e mesmo nas linhas reais os valores de resistência e condutância são muito pequenos em relação a indutância e capacitância. Assim, podemos escrever a impedância característica conforme Equação (2.25).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.25)$$

Ela é conhecida como impedância de surto ou impedância natural (Z_0 , dado em ohm) sendo eliminada a parte imaginária da característica. De maneira análoga, é definida a potência natural P_0 com base na potência característica P_c , através da relação $|\dot{Z}_c| \approx Z_0$ ficando conforme Equação (2.26), aonde utilizando a Equação (2.25) podemos escrever também de outra maneira.

$$P_0 = \frac{V_L^2}{Z_0} = \frac{V_L^2 \sqrt{C}}{\sqrt{L}} \quad (2.26)$$

Sendo a segunda parte uma outra forma de visualizar a redução da indutância fazendo com que tenha um aumento na capacidade de transmissão pela elevação da potência natural P_0 da linha (FUCHS, 2015). Junto com a impedância natural, as capacitâncias e indutâncias são os primeiros valores em uma primeira aproximação a serem considerados no nível de tensão a ser utilizado para novas linhas, conforme Tabela 2.1.

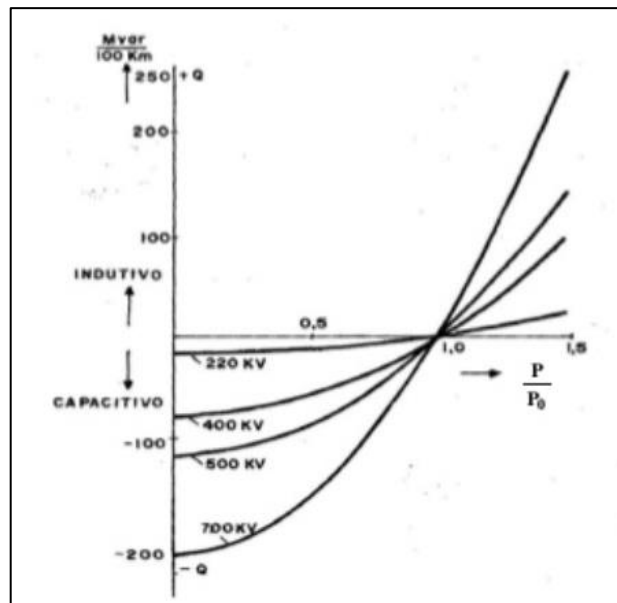
Tabela 2.1 - Primeira aproximação para circuitos simples

Número de subcondutores por fase	Z_0 [Ω]	Potência natural [MW]				
		230 kV	345 kV	400 kV	500 kV	750 kV
2	320	150	370	500	780	-
3	280	170	425	570	890	1.750
4	240	200	500	670	1.040	2.000

Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Essa potência natural também é conhecida como *Surge Impedance Loading* (SIL), que diz que em corrente alternada quando transmite uma potência ativa qualquer e tem-se $P_e = P_0$ a geração de reativo é igual ao consumido pela linha (SARTORI, 2004) conforme podemos verificar no Gráfico 2.1. Essa potência também é utilizada na primeira aproximação para a escolha do nível de tensão da linha.

Gráfico 2.1 - Geração e consumo de reativos pelas Linhas de Transmissão



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Portanto, quando o sistema está operando com cargas acima do SIL a linha funciona como um reator *shunt*, absorvendo reativo, e quando está operando abaixo do SIL a linha age como um capacitor *shunt*, gerando reativo.

2.3 Compensação em derivação (*shunt*)

A necessidade de manter o perfil de tensão para atendimento as cargas nos terminais receptores das linhas de transmissão são de vital importância ao funcionamento do sistema, e isso surge de duas implicações, excesso de reativo na linha necessitando absorção, assim como o déficit de reativo para o sistema alimentado necessitando de uma eventual compensação.

A representação destes tipos de equipamentos necessários ao sistema pode ser feita pelo seguinte quadripolo equivalente Equação (2.27) da compensação em derivação:

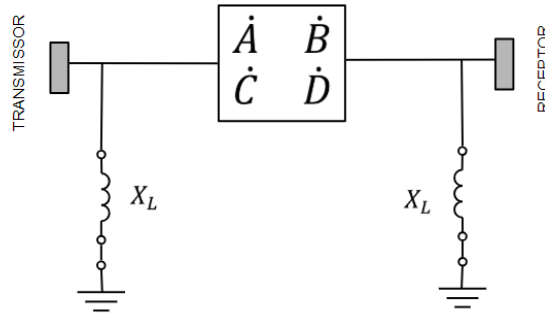
$$Q_{CD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2.3.1 Reatores *shunt*

Para o primeiro caso, aonde existam linhas muito longas e a potência transmitida na linha seja muito menor do que a potência natural, há a alta geração de reativo em derivação e como consequência tem-se um aumento elevado de tensão no terminal receptor, fenômeno conhecido como Efeito *Ferranti* (MILLER, 1988).

Para manter esses valores necessários de tensão para a operação nos terminais da linha existe a necessidade de instalação de reatores *shunt*, podendo ou não ser colocados nos dois terminais, ainda mais quando ocorre a energização da linha ou rejeição de carga configurando uma operação a vazio. A estrutura é representada conforme Figura 2.6.

Figura 2.6 - Estrutura de uma linha com compensação reativa indutiva em derivação



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Através desta estrutura podemos escrever o quadripolo equivalente, conforme Equação (2.28), da linha e assim com a associação das constantes generalizadas tem-se as equivalentes, conforme Equação matricial (2.29).

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} + \dot{B}\dot{Y} & \dot{B} \\ \dot{C} + \dot{A}\dot{Y} + \dot{D}\dot{Y} + \dot{B}\dot{Y}\dot{Y} & \dot{D} + \dot{B}\dot{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

No pior cenário onde tem-se a maior elevação de tensão no terminal receptor é quando a corrente $\dot{I}_R = 0$ (sem carga na linha), assim uma compensação parcial tem que ser definida por uma constante k , conforme Equação (2.30).

$$k = \frac{V_T}{V_R} \quad (2.30)$$

Com essa constante definida em relação a tensão desejável no receptor, pode ser levantada a Equação (2.31) que representa a reatância indutiva do reator em cada extremidade, destacando que a resistência dos mesmos em comparação é muito baixa e assim pode ser desconsiderada (FUCHS, 2015).

$$y'' = \frac{k - A'}{|\dot{B}|} \sin \beta_{\dot{B}} + \frac{A''}{|\dot{B}|} \cos \beta_{\dot{B}} \quad (2.31)$$

Sendo o A' representando a parte real da constante generalizada da linha sem compensação e o A'' a parte imaginária. Os reatores *shunt* colocados em cada extremidades da linha são representados através de sua potência reativa (Q_L , dado em MVar) pelo produto entre a parte imaginária da reatância indutiva e a tensão de linha (V_L , dado em kV) ao quadrado, conforme Equação (2.32).

$$Q_L = V_L^2 * y'' \quad (2.32)$$

Na prática, não é recomendável utilizar o $k=1$ cancelando completamente a admitância da linha pois há chances de ocorrência de ressonâncias com a linha desligada estando próxima a outras linhas de transmissão, sendo usual valores entre 40% e 80% (ZANETTA, 2002). Os valores de tensão nos terminais são bastante reduzidos devido aos reatores de linha (Figura 2.7).

Figura 2.7 - Reator de linha (TOSHIBA) de 24,5 MVar da LT 500 kV Nova Iguaçu/Taubaté-C1 fase Azul no terminal de Nova Iguaçu - Rio de Janeiro



Fonte: Do autor.

Contudo, isso não acontece no meio da linha, ponto esse que ocorre a maior elevação da tensão, sendo assim necessários cuidados especiais no cálculo do valor das isolações das estruturas na torre.

2.3.2 Capacitores *shunt*

Para o segundo caso, são necessários bancos de capacitores em derivação que geram a energia reativa necessária as cargas conectadas. Eles costumam ser conectados em barramentos com valores mais reduzidos de tensão, pois diminuem o seu custo com isolamento. Para os fixos,

conforme Figura 2.8, é necessário conectar a barra somente através de disjuntores, pois as cargas de um sistema variam bastante e com isso sua potência instalada, fazendo com que em cargas menores a compensação seja maior que a desejada sendo de grande importância um equipamento que possa conectar ou desconectar esse banco (NATARAJAN, 2005).

Figura 2.8 – Capacitores *Shunt* trifásicos (SIEMENS) de 24,5 MVar conectados a barra de 138 kV na Subestação de Sete Lagoas 04 – Minas Gerais



Fonte: Do autor.

Para capacitores em derivação de alta potência, tem-se a necessidade de instalação de reatores em série devido as altas correntes de *inrush*, que basicamente são provocadas durante curto-circuito ou na inserção, para controle da frequência de ressonância. Quando se tem a utilização de FACTS, esse controle é feito por tiristores de alta frequência conectados em série com o banco de capacitores e com os filtros de harmônicos (MILLER, 1988).

O cálculo da reatância capacitiva é baseado no novo valor do fator de potência que se quer chegar, assim partindo de uma média de quanto de potência reativa que as cargas no seu máximo consomem conectadas. Com isso, a diferença que se quer de reativo será a potência do banco, e utilizando a tensão nominal encontra-se o seu valor de susceptância sendo a mesma Equação (2.32), apenas substituindo $Q_L = Q_C$.

2.4 Compensação série

Para reduzir a reatância indutiva na linha de transmissão é necessário a compensação série, atuando diretamente no ângulo de potência da linha e aumentando a potência da linha de transmissão.

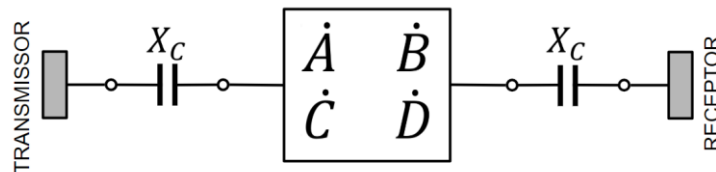
2.4.1 Cálculo teórico

O seu quadripolo da compensação série pode ser descrito conforme equação (2.33).

$$Q_{cs} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Y} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Já a sua representação, através de capacitores série compensando a linha, pode ser observada na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Estrutura de uma linha com compensação reativa capacitiva em série de ambos os terminais



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Através desta disposição podemos escrever o quadripolo equivalente, conforme Equação (2.34), da linha em função da compensação série em ambos os terminais e assim com a associação das constantes generalizadas tem-se as equivalentes, de acordo com a Equação (2.35).

$$Q_{e3} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} + \dot{C}\dot{Z} & \dot{A}\dot{Z} + \dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{B} + \dot{Z}\dot{D} \\ \dot{C} & \dot{C}\dot{Z} + \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Como a parte real da impedância do BCS é muito menor do que a imaginária, é feito $\dot{Z} = X_C$. A constante desejada é o \dot{B}_e para a compensação, desenvolvendo este parâmetro e utilizado apenas a parte imaginária, chega-se a seguinte Equação (2.36).

$$B''_e = B'' + 2A'X_C - C''X_C^2 \quad (2.36)$$

Considerando uma compensação total da linha, temos $B''_e = 0$ e com isso aplicando o Teorema de *Bhaskara* obtemos a Equação (2.37) com X_{C3} dado em *ohm*.

$$X_{C3} = \frac{2A' \pm \sqrt{(2A')^2 + 4C''B''}}{2C''} \quad (2.37)$$

Para uma disposição da linha com compensação série no meio é utilizado uma nova representação de quadripolo equivalente, conforme equação (2.38), e assim com a associação das constantes generalizadas tem-se as equivalentes novas, conforme Equação (2.39). As constantes generalizadas de cada lado da linha continuam iguais, alterando apenas o seu cálculo (2.24) de comprimento por $\frac{l}{2}$.

$$Q_{e2} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}\dot{A} + \dot{A}\dot{C}\dot{Z} + \dot{B}\dot{C} & \dot{A}\dot{B} + \dot{A}\dot{Z}\dot{D} + \dot{B}\dot{D} \\ \dot{A}\dot{C} + \dot{C}\dot{C}\dot{Z} + \dot{D}\dot{C} & \dot{B}\dot{C} + \dot{D}\dot{C}\dot{Z} + \dot{D}\dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Ao substituir os valores no \dot{B}_e pela forma retangular de cada constante, trabalhando apenas a parte imaginária e adotando $B''_e = 0$ para compensação total, é obtido a seguinte Equação (2.40) para X_{C2} .

$$X_{C2} = \frac{2(A'B'' + A'B'')}{(A'')^2 - (A')^2} \quad (2.40)$$

Já para uma disposição da linha com compensação série apenas em um terminal é utilizado uma outra representação de quadripolo equivalente (2.41) e assim com a associação das constantes generalizadas tem-se as equivalentes (2.42) novas.

$$Q_{e1} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} + \dot{C}\dot{Z} & \dot{B} + \dot{D}\dot{Z} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Ao substituir os valores no \dot{B}_e pela forma retangular de cada constante e igualando a 1 para uma compensação total, é obtido a Equação (2.43) para X_{C1} .

$$X_{C1} = \frac{1 - \dot{B}}{\dot{D}} \quad (2.43)$$

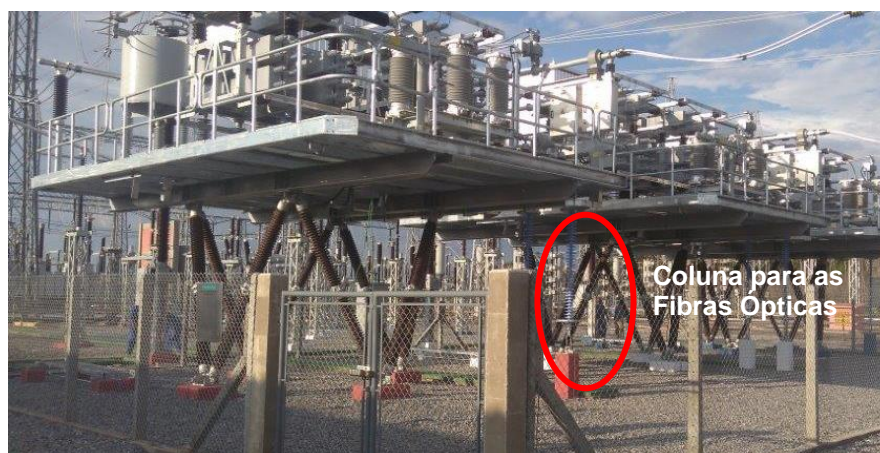
Em resultados onde se obtém vários valores de X_C , conforme Equação (2.37), apenas o negativo é considerado devido a reatância capacitiva. E dele é utilizado para o grau de compensação da linha, podendo variar geralmente entre 20% e 70%, por exemplo quando se diz que a linha é compensada em 40% tem-se 0,4 de X_L (FUCHS, 2015). Para o cálculo da potência reativa do capacitor trifásico (Q_C , dado em MVar) é utilizado três vezes o produto entre a reatância capacitiva e a corrente em regime (I_L , dado em kA) ao quadrado, conforme equação (2.44).

$$Q_C = 3 * X_C * I_L^2 \quad (2.44)$$

2.4.2 Estrutura e equipamentos de proteção do BCS

O Banco de Capacitores Série é construído como se, fisicamente falando, fizesse parte da linha de transmissão no mesmo potencial e assim sua estrutura (compostos principalmente por MOV, *Spark Gap* e circuito de amortecimento) é o mais isoladamente possível da terra sendo feito sobre colunas de isoladores conforme Figura 2.10.

Figura 2.10 - BCS (SIEMENS) de 115,93 MVar da LT 230 kV Jauru/Vilhena-C2 no terminal de Vilhena - Rondônia



Fonte: Do autor.

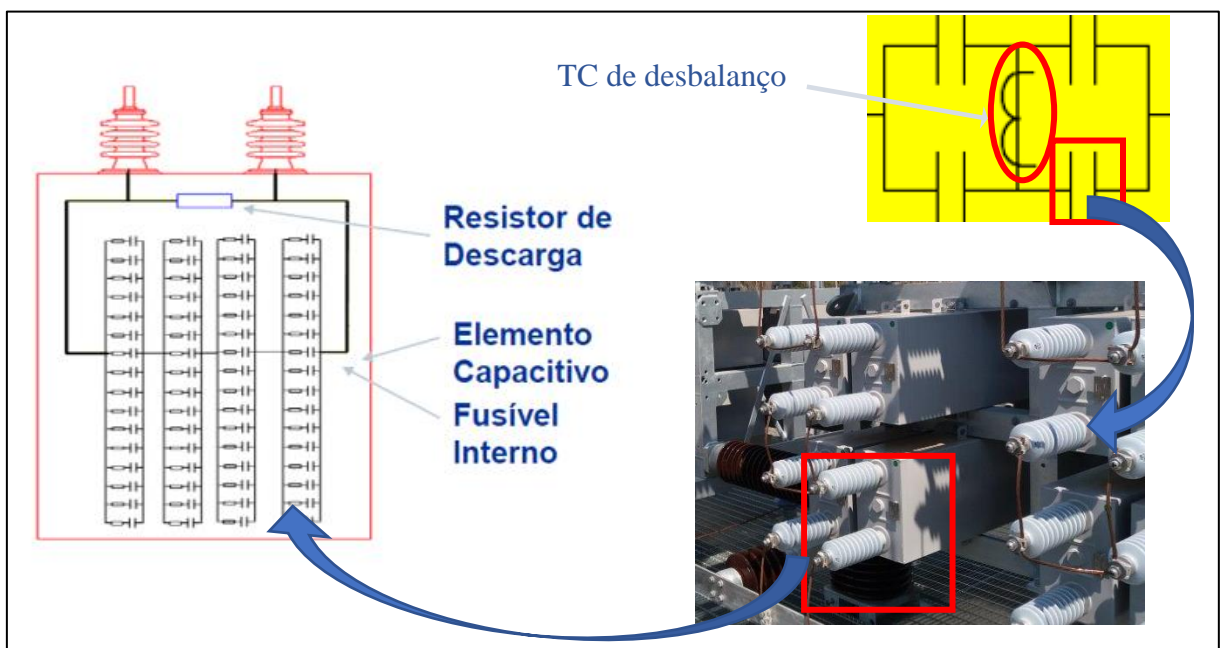
Essas colunas podem ser de poliméricos e/ou porcelana com bases feitas de concreto e estrutura de ferro nas plataformas. Para transmissão de sinal (sistemas de proteção e controle)

e o Laser de potência (alimentação) entre a plataforma e os painéis elétricos é utilizado fibras óticas dentro dos isoladores de suspensão ou em colunas específicas, mantendo a segurança da estrutura.

2.4.2.1 Unidades capacitivas

As unidades capacitivas ou latas é o resultado de associações entre vários elementos em série e em paralelo, onde cada unidade possui um resistor de descarga interno além das buchas e cada elemento tem uma proteção por fusível interno conforme Figura 2.11, sendo normalmente preenchidos com óleo, para o dielétrico. Para chegar a potência desejada conforme estabelecido no projeto, o Banco de Capacitores é instalado sobre *hacks* formando associações série/paralelo das unidades capacitivas.

Figura 2.11 - Configuração das Unidades Capacitivas do BCS



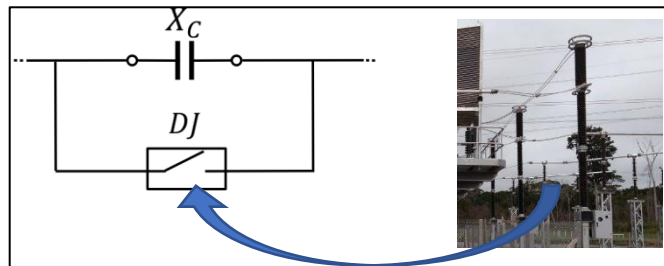
Fonte: Adaptado, *Fixed Séries Capacitor* (SIEMENS, 2018).

Os *hacks* são colocados em “Pernas” que formam uma “Ponte em H” e esta ponte é interligada por um Transformador de Corrente (TC) de desbalanço. Esse último identifica quando há uma danificação de elementos, pois há uma passagem de corrente entre as pernas e quando esta corrente for acima do permitido, tem-se a atuação do sistema de proteção do BCS.

2.4.2.2 Disjuntor bypass

O Disjuntor (DJ) de Desvio ou *bypass*, apresentado na Figura 2.12, tem como uma das funções a de proteção do BCS, desviando o fluxo de potência sobre os capacitores, podendo ser de maneira automática ou manual.

Figura 2.12 - Disjuntor Monofásico a mola



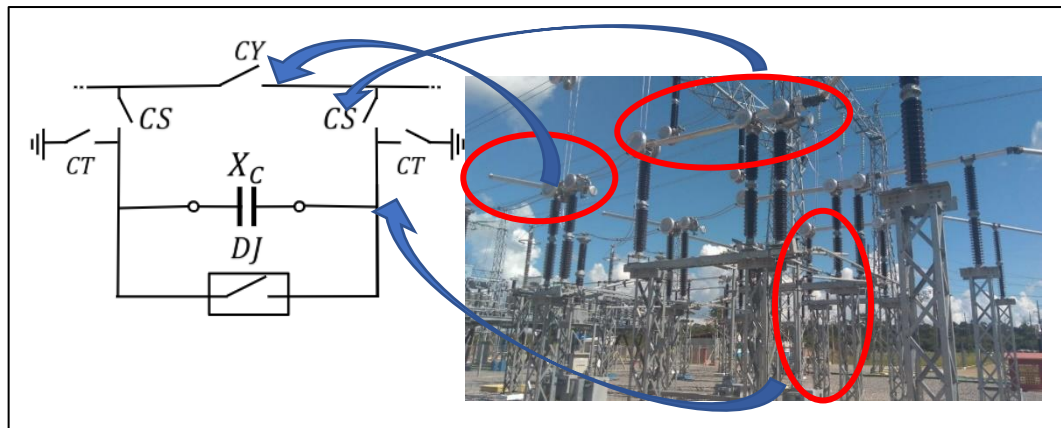
Fonte: Do autor.

A sua manobra manual de abertura ou fechamento (inserção ou baipasse do BCS) também é realizada para controle sistêmico conforme coordenação do Operador Nacional (ONS, 2017) e também para operações de energização ou desligamento das linhas de transmissão é recomendado primeiro o fechamento do disjuntor por motivos de aumento na vida útil dos Bancos. A sua instalação é feita fora da plataforma e seu tempo de resposta varia entre 30 e 55 milissegundos dependendo do tipo deste disjuntor (hidráulico ou a mola).

2.4.2.3 Chaves de isolamento, desvio e terra

Quando se tem a necessidade de executar qualquer serviço no BCS, seja de urgência ou programado, é necessária a isolamento do mesmo pelas suas Chaves Seccionadoras (CS), conforme Figura 2.13, e logo após o aterramento pelas Lâminas de terra ou Chaves de terra (CT), garantindo assim a segurança nas atividades. Já a Seccionadora de desvio (CY) é utilizada quando se quer manter a operação da linha mesmo com o BCS fora de serviço.

Figura 2.13 – Chaves Seccionadoras e suas configurações em relação ao BCS



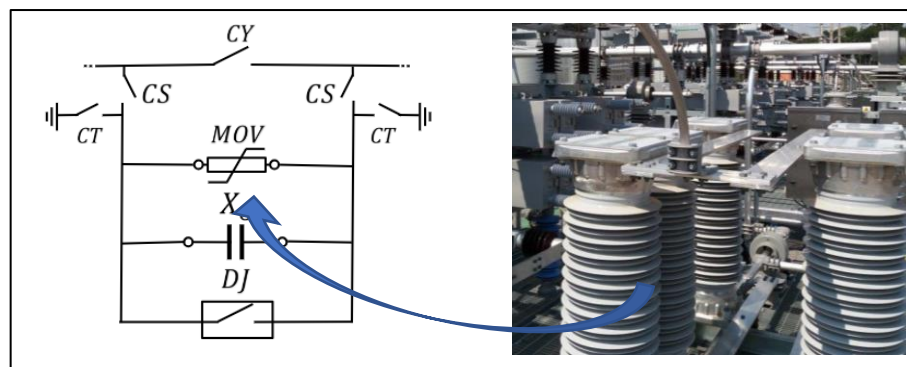
Fonte: Do autor.

Quando o banco está em condição normal de operação, as seccionadoras de terra e *bypass* devem estar abertas e as outras fechadas. As chaves geralmente não são feitas para operar em carga, então esquemas de proteção e intertravamento devem ser adotados para evitar manobras indevidas.

2.4.2.4 MOV

Os Varistores de Óxido Metálico ou *Metal Oxide Varistor* são feitos a partir de óxido de zinco, possuindo resistência fortemente não linear com variação pela tensão e serve como principal equipamento de proteção do BCS, pois limitam a tensão nos capacitores em casos de faltas externas a linha de transmissão do qual o banco é conectado (ANDERSON e FARMER, 1996), tendo sua instalação paralela aos capacitores, conforme Figura 2.14.

Figura 2.14 - Metal Oxide Varistor e sua instalação



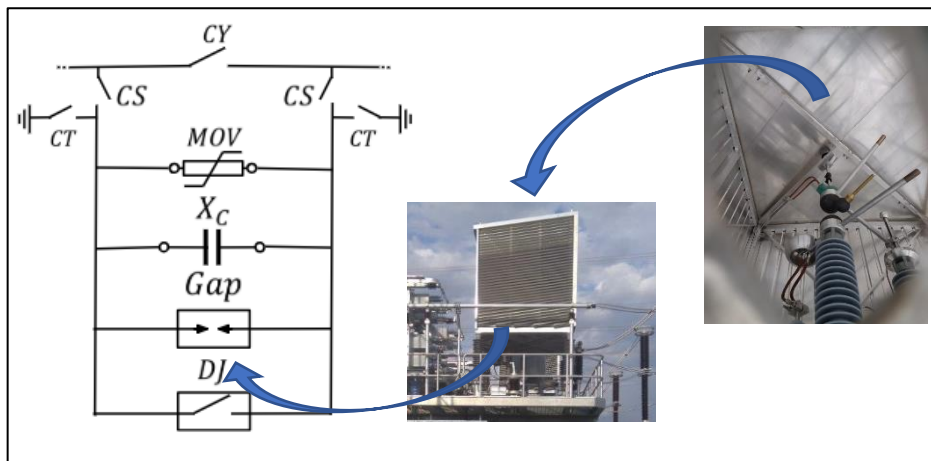
Fonte: Do autor.

Conseqüentemente, é vital que os MOV's não conduzam corrente durante a operação do BCS em regime, assim, eles são projetados para que em nas condições nominais de operação, sua impedância seja muitas vezes maior que a dos capacitores. A quantidade de MOV's por fase a serem instalados no banco, depende diretamente da máxima energia que eles deverão dissipar.

2.4.2.5 *Spark Gaps*

Os Centelhadores ou *Spark Gaps* são dispositivos de ação rápida para a proteção dos MOV compostos por eletrodos de grafite em repartições metálicas, conforme Figura 2.15 ligados diretamente ao sistema de proteção. Quando há faltas constantes externas à linha, tem-se o aquecimento elevado dos varistores podendo ocorrer até explosões devido à sua característica de dissipar energia em forma de calor, assim é necessário o seu baipasse e o dos capacitores o mais rápido possível, fato esse que se agrava em muito no caso de faltas internas (ANDERSON e FARMER, 1996).

Figura 2.15 - *Spark Gaps* e sua instalação



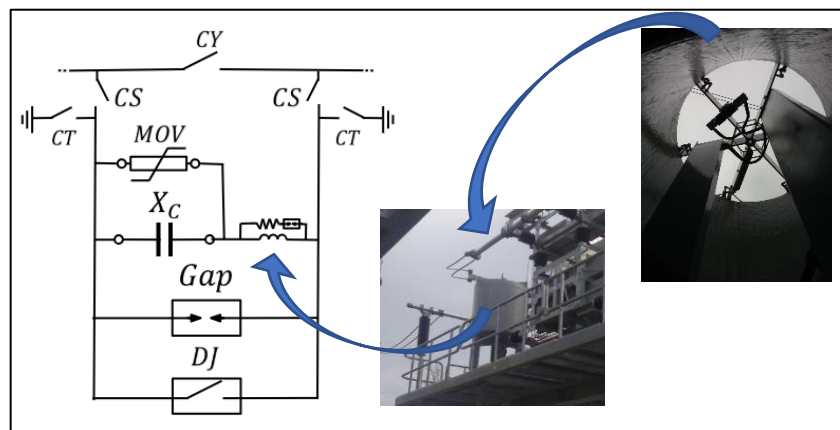
Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Quando os centelhadores são acionados se forma um caminho, podendo ser até menor que um milissegundo, para a corrente da linha de baixíssima resistência e como os centelhadores não são projetos para ficar atuados por muito tempo, um comando de fechamento automático do disjuntor de desvio é acionado no mesmo instante.

2.4.2.6 Circuito de amortecimento

O circuito de amortecimento ou *Damping Circuit* tem como função a limitação e amortecimento da corrente de descarga do BCS quando este é baipassado, o circuito é formado por um reator com núcleo de ar em paralelo com um resistor que evita a circulação de corrente em regime permanente e um pequeno *gap* em seu interior conforme Figura 2.16 (ANDERSON e FARMER, 1996).

Figura 2.16 - Circuito de Amortecimento e sua instalação



Fonte: Adaptado, Transmissão de Energia Elétrica (FUCHS, 2015).

Na operação normal do BCS não é interessante ter um resistor em série provocante queda de tensão, por isso é colocado um *gap* que só irá conduzir nos momentos de descargas e assim a corrente passará pelo reator de amortecimento em condições normais, naturalmente os capacitores são projetos tendo em vista essa impedância adicional.

2.5 Limites Operacionais das linhas de transmissão

Características e requisitos técnicos gerais mínimos e máximos devem ser adotados nas instalações de transmissão tanto para a segurança dos indivíduos como dos equipamentos conectados ao sistema. Dito isso, para cada nível de tensão se tem variações dos limites que são adotados para que se tenha uma condição de operação do sistema dentro de um grau normal, não ultrapassando limites de emergência que possam levar ao desequilíbrio. Alguns desses valores podem ser observados na Tabela 2.2 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017).

Tabela 2.2 - Tensões de Operação do Sistema

Tensão Nominal (kV)	Condição Operativa Normal (kV)	Condição Operativa de Emergência (kV)
69	66 a 72,5	62 a 66
138	131 a 145	124 a 131
230	218 a 242	207 a 218
345	328 a 362	311 a 328
500	500 a 550	475 a 500

Fonte: Adaptado, Especificações Técnicas Gerais (ANEEL, 2017).

Já para a condição de ligar uma linha de transmissão através de manobras nos disjuntores com fechamento em paralelo, é necessário o atendimento de condições mínimas como frequência, tensão e ângulo. Nos manuais de procedimentos da operação do ONS relacionados ao submódulo 10.21 sobre instruções de operação, quando não estiverem sido especificadas as condições para as manobras, se deve admitir valores limites para cada um (ONS, 2017):

- Disparidade máxima de frequência igual a 0,2 *Hertz*,
- Disparidade máxima de tensão igual a 0,1 p.u da tensão nominal e
- Máxima desagem angular igual a 10 graus.

2.6 Transmissão de potência e Estabilidade

Para uma potência aparente por fase transmitida e entregue no terminal receptor, temos as seguintes fórmulas:

$$\dot{S}_R = P_R + jQ_R = \dot{V}_R \dot{I}_R^* \quad (2.45)$$

E através da Equação matricial 2.15 podemos escrever uma corrente no receptor como:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{V}_R - \dot{A}\dot{V}_R}{\dot{B}} \quad (2.46)$$

Alterando os fasores na forma polar, módulo e fase, e considerando a tensão no receptor com fase nula, é possível escrever a potência aparente, conforme Equação:

$$P_R + jQ_R = \frac{V_R \cdot V_T}{B} \angle(\beta_B - \theta) - \frac{A \cdot V_R^2}{B} \angle(\beta_B - \beta_A) \quad (2.47)$$

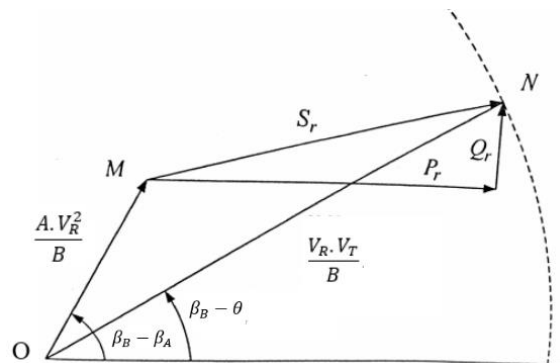
Para a potência ativa e reativa no receptor separadamente, obtém-se:

$$P_R = \frac{V_R \cdot V_T}{B} \cos(\beta_B - \theta) - \frac{A \cdot V_R^2}{B} \cos(\beta_B - \beta_A) \quad (2.48)$$

$$Q_R = \frac{V_R \cdot V_T}{B} \sin(\beta_B - \theta) - \frac{A \cdot V_R^2}{B} \sin(\beta_B - \beta_A) \quad (2.50)$$

A análise destas parcelas para os efeitos na transmissão de potência, podem ser realizadas através da representação chamada de diagrama do círculo (ZANETTA, 2005), conforme visto na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Representação do diagrama de círculo



Fonte: Adaptado, Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência (ZANETTA, 2005).

Para os módulos das tensões e os parâmetros das linhas constantes, a única variável fica sendo o ângulo no transmissor, assim o vetor NO transcreve o círculo em volta do ponto O e o MO acaba sendo fixo. Conseqüentemente, a diferença entre os vetores NO e MO é a potência complexa, e para os ângulos da primeira parcela iguais temos uma máxima potência ativa, conforme Equação (2.51).

$$P_{Rmax} = \frac{V_R \cdot V_T}{B} - \frac{A \cdot V_R^2}{B} \cos(\beta_B - \beta_A) \quad (2.51)$$

Entretanto, para manter as tensões desejadas no receptor em regime permanente para uma potência ativa máxima, é necessária uma potência reativa gerada junto ao receptor (FUCHS, 2015), representado pela Equação (2.52):

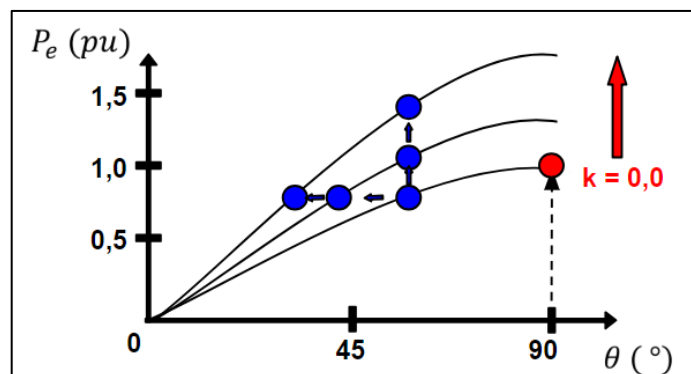
$$Q_{Rnec} = -\frac{A \cdot V_R^2}{B} \sin(\beta_B - \beta_A) \quad (2.52)$$

Já para o cálculo do ângulo de transmissão da linha para determinada potência, utilizando a manipulação na Equação (2.48), obtém-se:

$$\theta = \beta_B - \cos^{-1} \left\{ \frac{B}{V_R \cdot V_T} \left[P_R + \frac{A \cdot V_R^2}{B} \cos(\beta_B - \beta_A) \right] \right\} \quad (2.53)$$

Mantendo constante a potência e alterando os parâmetros da linha, é possível observar a influência de cada mudança na estabilidade, conforme visto no Gráfico 2.2.

Gráfico 2.2 - Influência na estabilidade em relação a alteração do ângulo



Fonte: Adaptado, Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência (ZANETTA, 2005).

Neste Gráfico, também é possível notar que se pode aumentar a potência transferida sem prejuízo da estabilidade, ou seja, mantendo a margem entre o ponto de operação e o limite de estabilidade da rede. Com a utilização dos Bancos de Capacitores Série, isso acaba sendo executável, podendo assim operar próximos aos limites de estabilidade para aumentar sua confiabilidade sem prejuízo em termos de transmissão de energia.

3 METODOLOGIA

Para o dimensionamento das compensações paralela e série, conforme visto nos capítulos anteriores, é necessário a definição dos parâmetros desta linha de transmissão do qual os equipamentos vão ser instalados. E assim, com esta descrição realizar os cálculos e montagens objetivas ao projeto, tendo como base o nível de compensação e a localização dos equipamentos a serem instalados.

3.1 *Software ATPDraw*

Entretanto, para uma melhor representação e análise dos modelos a serem estudados quanto a estabilidade sistêmica se faz necessário cálculos manuais muito numerosos, assim o ATPDraw cumpre bem esta funcionalidade em sistemas de potência tanto em realização de estudos transitórios ou em permanentes, sendo conforme o foco deste trabalho. Esta ferramenta é do tipo *Electromagnetic Transient Program* (ETP) e utiliza no seu método de cálculo a matriz de admitância de barras através da integração trapezoidal do qual permite analisar no projeto até as piores situações possíveis (ATP, 2015) sendo sua propriedade de uso livre.

O ATPDraw basicamente é usado para as simulações nas mais variadas alterações de frequência, assim viabilizando o estudo principalmente em transitórios eletromagnéticos. Assim sua contribuição é enorme na confecção de equipamentos elétricos e no planejamento operacional do sistema elétrico.

3.2 **Sistema analisado**

O respectivo sistema trifásico é composto por uma linha de transmissão de circuito único com tensão de linha ou nominal de 500 kV e uma distância entre as barras de 340 quilômetros já considerando a catenária ou flecha entre as torres. Na Tabela 3.1 tem-se os valores de resistência, indutância e capacitância por quilômetro. A condutância não será considerada conforme estabelecido no capítulo anterior nesta linha fictícia, e seus parâmetros de baseiam em linha reais para este nível de tensão tendo em sua composição quatro subcondutores por fase.

Tabela 3.1 - Parâmetros da linha de transmissão

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de linha	500	kV
Distância	340	km
R	0,0199	Ω/km
L	714	$\mu H/km$
C	9,22754	$\eta F/km$

Fonte: Do autor.

O sistema é composto por uma fonte de tensão nominal de 138 kV e dois transformadores com o primário e secundário conectados em estrela com o centro estrela aterrado, sendo o primeiro transformador elevador de 69/500 kV (1 para 7,246377 volts) e segundo rebaixador de 500/138 kV (1 para 0,276 volts).

A linha irá alimentar quatro cargas de mesmo valor que serão conectadas em tempos diferentes, representando o aumento do consumo no decorrer do tempo. As cargas simuladas são de 200 MVA com um Fator de Potência (FP) de 0,95. A Tabela 3.2 representa os valores totais de potência aparente (ativa e reativa) no decorrer do tempo.

Tabela 3.2 - Potência total das cargas no tempo

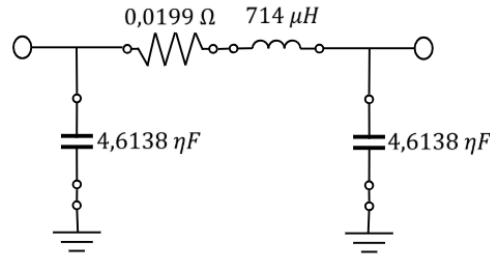
Tempo inicial em segundos	Tempo final em segundos	Potência Total (MVA)
0,0	0,1	0
0,1	0,2	$190 + j62,44998$
0,2	0,3	$380 + j127,89996$
0,3	0,4	$570 + j187,34994$
0,4	0,5	$760 + j249,79992$
0,5	0,6	0

Fonte: Do autor.

3.3 Parametrização da linha de transmissão

Esses parâmetros da Tabela 3.1 representam uma linha longa, portanto o modelo a ser usado é o *Pi* Equivalente, e sua ilustração pode ser descrita conforme Figura 3.1 com valores por quilômetro.

Figura 3.1 - Pi Equivalente com valores por km



Fonte: Do autor.

Assim, a impedância série (3.1) e a admitância *shunt* (3.2) da linha ficam sendo:

$$\dot{Z} = 0,0199 + j0,2691717 \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (3.1)$$

$$\dot{Y} = j3,4787 \text{ } [\mu\text{S}/\text{km}] \quad (3.2)$$

Com a utilização das equações (2.19) e (2.20) e os resultados obtidos, é possível escrever os valores da constante de propagação (3.3) e da impedância característica (3.4):

$$\dot{\gamma} = 0,0000357 + j0,0009683 \text{ } [1/\text{km}] \quad (3.3)$$

$$\dot{Z}_c = 278,3571109 - j10,2755194 \text{ } [\Omega] \quad (3.4)$$

Através dessas duas variáveis e adotando a distância de 340 km, conforme Tabela 3.1, fica possível escrever as constantes generalizadas da linha.

$$\dot{A} = \dot{D} = 0,9463618 + j0,0039295 \text{ } [\Omega] \quad (3.5)$$

$$\dot{B} = 6,523845 + j89,8851153 \text{ } [\Omega] \quad (3.6)$$

$$\dot{C} = -0,0000016 + j0,0011615 \text{ } [S] \quad (3.7)$$

O quadripolo (2.24) da linha pode ser escrito na forma retangular (3.8) e polar (3.9):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9463618 + j0,0039295 & 6,523845 + j89,8851153 \\ -0,0000016 + j0,0011615 & 0,9463618 + j0,0039295 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9463699 \angle 0,2379016^\circ & 90,1215541 \angle 85,8487621^\circ \\ 0,0011615 \angle 90,0769758^\circ & 0,9463699 \angle 0,2379016^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Já o quadripolo que representa metade da linha, pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9864998 + j0,0009958 & 3,352546 + j45,5542098 \\ -0,0000002 + j0,0005887 & 0,9864998 + j0,0009958 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4 Modelo Computacional

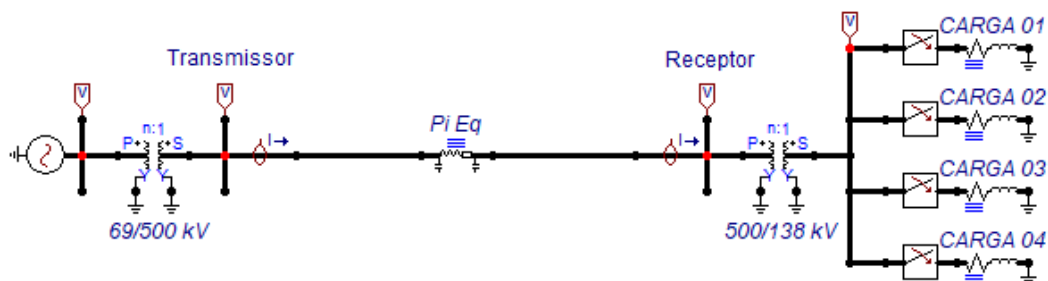
O método aplicado para cada modelo simulado no ATPDraw é a representação de situações em funcionamento à vazio, aumento de carga e rejeição de carga. A potência natural desse sistema utilizando a relação $|\dot{Z}_C| \approx Z_0$ conforme estabelecido na Equação (2.26) é obtida como:

$$P_0 = 897,5155 \text{ [MW]} \quad (2.26)$$

3.4.1 Modelo I

O primeiro modelo simulado será representado pela linha de transmissão sem nenhum tipo de compensação conforme representado na Figura 3.2 no *software*, e com isso, servindo como base de análise para todos os outros.

Figura 3.2 - Modelo I montando no ATPDraw



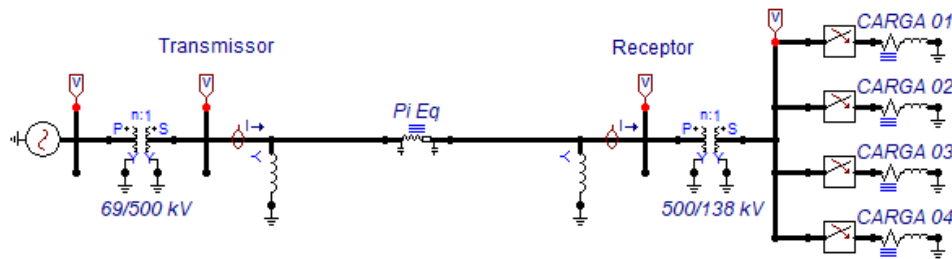
Fonte: Do autor.

O seu quadripolo equivalente fica sendo representado pelo mesmo da Equação (3.8).

3.4.2 Modelo II

Para este segundo modelo será adicionado reatores em derivação para as duas extremidades conforme Figura 3.3 configurado em estrela aterrado tendo como base a mesma referência de terra, compensando a capacitância natural da linha.

Figura 3.3 - Modelo II montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Conforme procedimentos de operação do ONS, para linhas com tensão nominal de 500 kV, o valor para operação em vazio (sem carga) teve ter valores de no máximo 10%. Assim:

$$k = \frac{V_T}{V_R} = \frac{500.000}{550.000} = 0,909091 \quad (3.12)$$

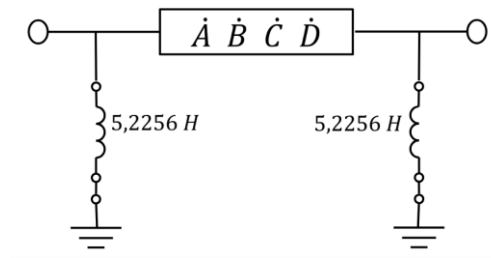
Estabelecido o k , é possível calcular o valor da admitância do reator necessária para compensar esta linha através da Equação (2.31) em cada extremidade. Utilizando os valores dos quadripolos (3.8) e (3.9) tem-se o seguinte valor:

$$y'' = \frac{k - A'}{|B|} \sin \beta_B + \frac{A''}{|B|} \cos \beta_B \quad (2.28)$$

$$y'' = 0,0005076142 \text{ [S/fase]} \quad (3.13)$$

Convertendo o valor da admitância em indutância, tem-se o valor de 5,2256 *Henry/fase* para cada lado da linha, conforme representado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Exibição da linha por quadripolo e seus reatores *shunt*



Fonte: Do autor.

O quadripolo de cada reator em derivação utilizando o (2.27) temos os valores a seguir:

$$Q_{CD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j0,0005076142 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Para as novas constantes generalizadas da linha equivalentes através da Equação (2.29) obtém-se:

$$\dot{A}_e = \dot{A} + \dot{B}\dot{Y} = 0,9099042 + j0,004819998 \text{ } [\Omega] \quad (3.15)$$

$$\dot{B}_e = \dot{B} \quad (3.16)$$

$$\dot{C}_e = \dot{C} + \dot{A}\dot{Y} + \dot{D}\dot{Y} + \dot{B}\dot{Y}\dot{Y} = 0 + j0,001444732 \text{ } [S] \quad (3.17)$$

$$\dot{D}_e = \dot{A}_e \quad (3.18)$$

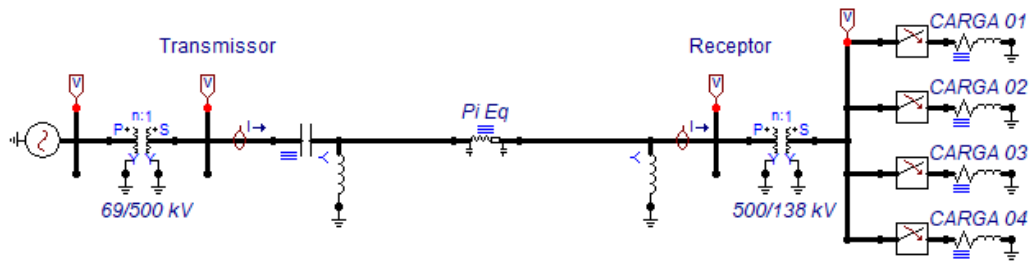
Utilizando a Equação (2.29) é possível escrever o quadripolo equivalente da linha:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9099042 + j0,004819998 & 6,523845 + j89,8851153 \\ 0 + j0,001444732 & 0,9099042 + j0,004819998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.4.3 Modelo III

A partir deste terceiro modelo os reatores de linha calculados anteriormente serão mantidos, assim será possível ver os efeitos de cada representação da compensação série com a paralela. Neste, o capacitor é instalado no terminal transmissor antes da reatância indutiva em derivação, conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 - Modelo III montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Utilizando o quadripolo da compensação série (2.33) e o quadripolo equipavente do modelo II (3.19) se obtém a seguinte associação:

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} + \dot{C}\dot{Z} & \dot{B} + \dot{D}\dot{Z} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Para uma compensação total é utilizada a Equação (2.43) obtendo um valor de:

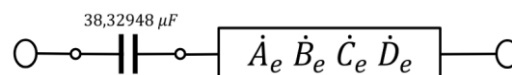
$$X_C = -98,86395 \text{ } [\Omega] \quad (3.21)$$

Adotando uma compensação de 70% para a linha de transmissão, se obtém o seguinte valor de reatância do capacitor a ser instalado.

$$0,7X_C = 69,20477 \text{ } [\Omega/fase] \quad (3.22)$$

Convertendo o valor da reatância em capacitância, tem-se o valor de 38,32948 $\mu\text{Farad}/fase$ para o capacitor, conforme representado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Exibição do capacitor no terminal receptor e o quadripolo equivalente do circuito



Fonte: Do autor.

Para as novas constantes generalizadas equivalentes da linha com a associação dos mesmos (3.20):

$$\dot{A}_e = \dot{A} + \dot{C}\dot{Z} = 1,009887 + j0,004819998 [\Omega] \quad (3.23)$$

$$\dot{B}_e = \dot{B} + \dot{D}\dot{Z} = 6,857411 + j26,9154 \quad (3.24)$$

$$\dot{C}_e = \dot{C} \quad (3.25)$$

$$\dot{D}_e = \dot{D} \quad (3.26)$$

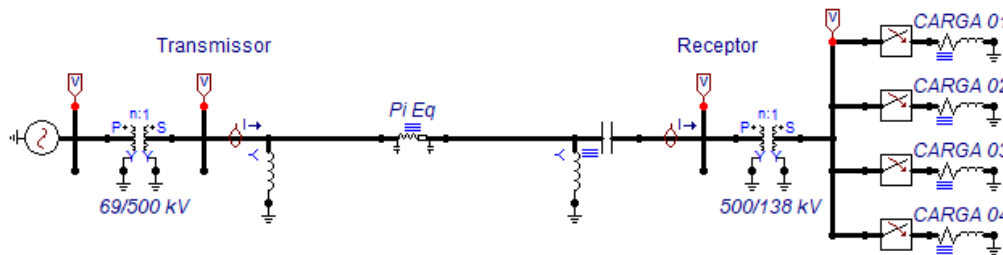
Utilizando a Equação (2.52) é possível escrever o quadripolo equivalente do circuito:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,009887 + j0,004819998 & 6,857411 + j26,9154 \\ 0 + j0,001444732 & 0,9099042 + j0,004819998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.4.4 Modelo IV

Neste modelo, o capacitor é instalado no terminal receptor depois do reator *shunt*, conforme Figura 3.7.

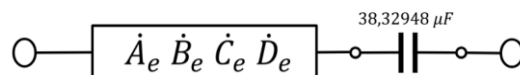
Figura 3.7 - Modelo IV montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Para posterior análise, o valor da reatância do capacitor calculado no modelo III será mantida em $69,20477 [\Omega/fase]$ e sua capacitância em $38,32948 \mu Farad/fase$, ficando sua representação conforme Figura 3.8.

Figura 3.8 - Exibição do capacitor no terminal transmissor e o quadripolo equivalente do circuito



Fonte: Do autor.

No quadripolo equivalente (3.28) deste modelo, há somente a inversão entre as constantes generalizadas \dot{A}_e e \dot{D}_e .

$$Q_e = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} + \dot{A}\dot{Z} \\ \dot{C} & \dot{D} + \dot{C}\dot{Z} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

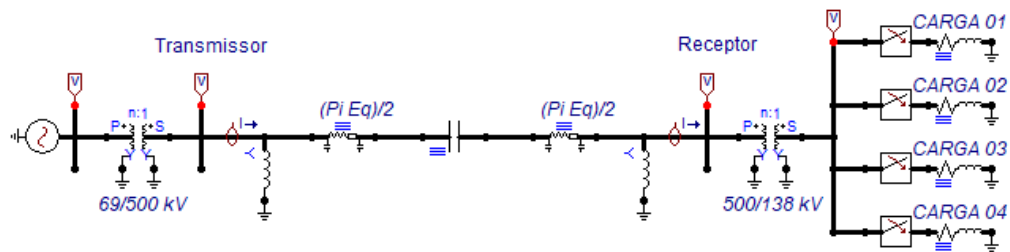
Assim utilizando a Equação (3.28), o quadripolo equivalente do circuito fica escrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9099042 + j0,004819998 & 6,857411 + j26,9154 \\ 0 + j0,001444732 & 1,009887 + j0,004819998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

3.4.5 Modelo V

Neste quinto modelo, será adicionado um capacitor no meio da linha (entre os reatores em derivação) conforme Figura 3.9.

Figura 3.9 - Modelo V montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Primeiramente, é estabelecido os quadripolos equivalentes Q_1 e Q_2 para o terminal transmissor e o receptor respectivamente. Utilizado os resultados dos quadripolos (3.10) e (3.14) se obtém o seguinte Q_1 :

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j0,0005076142 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,9864998 + j0,0009958 & 3,352546 + j45,5542098 \\ -0,0000002 + j0,0005887 & 0,9864998 + j0,0009958 \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0,9864998 + j0,0009958 & 3,352546 + j45,5542098 \\ j0,00008793869 & 1,009624 - j0,000706 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Para o Q_2 utilizando os mesmos quadripolos, só que invertendo sua ordem, fica:

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 0,9864998 + j0,0009958 & 3,352546 + j45,5542098 \\ -0,0000002 + j0,0005887 & 0,9864998 + j0,0009958 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j0,0005076142 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 1,009624 - j0,000706 & 3,352546 + j45,5542098 \\ j0,00008793869 & 0,9864998 + j0,0009958 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Agora utilizando a associação de quadripolos (2.38) e realizando a adaptação, temos:

$$Q_e = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Substituindo Q_1 e Q_2 por seus valores e utilizando o quadripolo (2.39), se obtém:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9864998 + j0,0009958 & 3,352546 + j45,5542098 \\ j0,00008793869 & 1,009624 - j0,000706 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1,009624 - j0,000706 & 3,352546 + j45,5542098 \\ j0,00008793869 & 0,9864998 + j0,0009958 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Para uma compensação total utilizando a Equação (2.40), realizando as correções para $Q_1 \neq Q_2$, temos a seguinte Equação (3.34) e o seu resultado (3.35)

$$X_C = \frac{A_1 B_2 (A'_1 \cdot B''_2 - A''_1 \cdot B'_2) - B_1 D_2 (B'_1 \cdot D''_2 + B''_1 \cdot D'_2)}{A'_1 \cdot D'_2 - A''_1 \cdot D''_2} \quad (3.34)$$

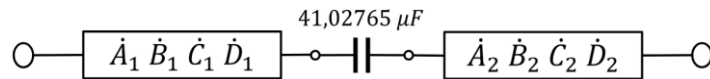
$$X_C = -92,36219 \text{ } [\Omega] \quad (3.35)$$

Adotando a mesma compensação do modelo III e IV de 70% para a linha de transmissão, se obtém o seguinte valor de reatância do capacitor a ser instalado.

$$0,7X_C = 64,65353 [\Omega/fase] \quad (3.36)$$

Convertendo o valor da reatância em capacitância, tem-se o valor de 41,02765 $\mu\text{Farad}/fase$ para o capacitor, conforme representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Exibição do capacitor no meio do circuito



Fonte: Do autor.

Com a utilização das associações dos quadripolos representado na Equação (3.32) é possível escrever as constantes generalizadas do circuito.

$$\dot{A}_e = \dot{A}_1\dot{A}_2 + \dot{A}_1\dot{C}_2\dot{Z}_c + \dot{B}_1\dot{C}_2 = 0,9975982 + j0,000603827 [\Omega] \quad (3.37)$$

$$\dot{B}_e = \dot{A}_1\dot{B}_2 + \dot{A}_1\dot{Z}_c\dot{D}_2 + \dot{B}_1\dot{D}_2 = 6,650872 + j23,96554[\Omega] \quad (3.38)$$

$$\dot{C}_e = \dot{A}_2\dot{C}_1 + \dot{C}_1\dot{C}_2\dot{Z}_c + \dot{D}_1\dot{C}_2 = 0 + j0,0001780695[S] \quad (3.39)$$

$$\dot{D}_e = \dot{B}_2\dot{C}_1 + \dot{D}_2\dot{C}_1\dot{Z}_c + \dot{D}_1\dot{D}_2 = 0,9975982 + j0,000603827 [\Omega] \quad (3.40)$$

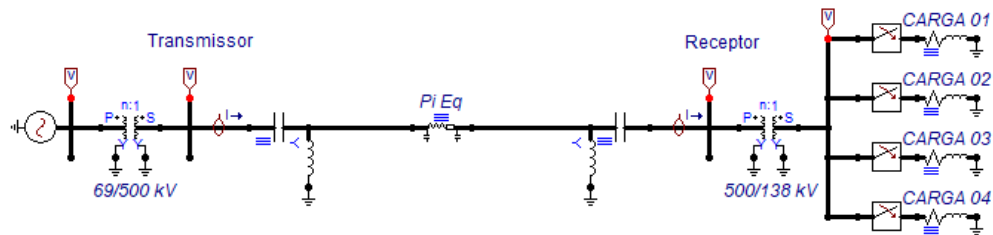
Utilizando a Equação (2.39) é possível escrever o quadripolo equivalente do circuito:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9975982 + j0,000603827 & 6,650872 + j23,96554 \\ j0,0001780695 & 0,9975982 + j0,000603827 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

3.4.6 Modelo VI

Neste sexto modelo montando no ATPDraw conforme Figura 3.11, são instalados dois capacitores próximos a barra de cada terminal antes dos reatores em derivação.

Figura 3.11 - Modelo VI montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Utilizando os dois quadripolo da compensação série (2.33) em cada lado e o quadripolo equipavente do modelo II (3.19) se obtém a seguinte associação:

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} + \dot{C}\dot{Z} & \dot{A}\dot{Z} + \dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{B} + \dot{Z}\dot{D} \\ \dot{C} & \dot{C}\dot{Z} + \dot{D} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Com as constantes generalizadas equivalentes do quadripolo (3.19) utilizadas na Equação (2.37), se obtém os seguintes resultados:

$$X_C = \frac{2A' \pm \sqrt{(2A')^2 + 4C''B''}}{2C''} \quad (2.37)$$

$$X_{C1} = 1.307,041 [\Omega] \quad (3.43)$$

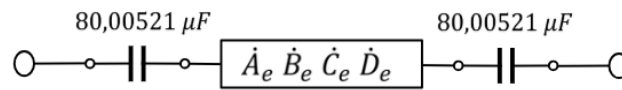
$$X_{C2} = -47,36446 [\Omega] \quad (3.44)$$

Como reatâncias capacitivas são por convenção negativas, então o resultado (3.44) representa a compensação total da linha para cada capacitor. Adotando a mesma compensação dos outros modelos de 70% para a linha de transmissão, se obtém o seguinte valor de reatância de cada capacitor a ser instalado.

$$0,7X_{C2} = 33,1552 [\Omega/fase] \quad (3.45)$$

Convertendo o valor da reatância em capacitância, tem-se o valor de 80,00521 $\mu\text{Farad}/\text{fase}$ para cada capacitor, conforme representado na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Exibição do capacitor em cada terminal e o quadripolo equivalente da linha com os reatores



Fonte: Do autor.

Através do quadripolo equivalente (3.42) e o resultado da nova compensação (3.45) é possível escrever as novas constantes generalizadas equivalentes do circuito total.

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1 & -j33,1552 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -j33,1552 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$\dot{A}_e = \dot{A} + \dot{C}\dot{Z} = 0,9578046 + j0,004819998 \quad [\Omega] \quad (3.46)$$

$$\dot{B}_e = \dot{A}\dot{Z} + \dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{B} + \dot{Z}\dot{D} = 6,843461 + j27,96086 \quad [\Omega] \quad (3.47)$$

$$\dot{C}_e = \dot{C} = 0 + j0,001444732 \quad [S] \quad (3.48)$$

$$\dot{D}_e = \dot{C}\dot{Z} + \dot{D} = 0,9975982 + j0,000603827 \quad [\Omega] \quad (3.49)$$

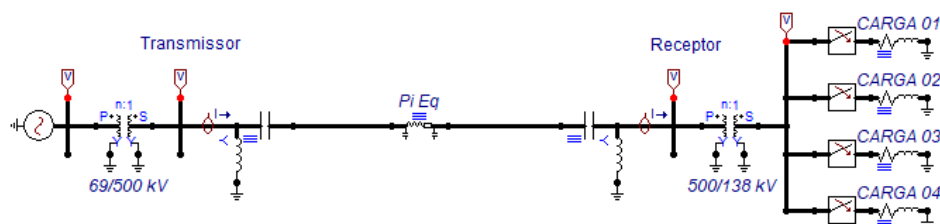
Utilizando a Equação (2.39) é possível escrever o quadripolo equivalente do circuito:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9578046 + j0,004819998 & 6,843461 + j27,96086 \\ 0 + j0,001444732 & 0,9578046 + j0,004819998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

3.4.7 Modelo VII

Neste sétimo modelo montado no ATPDraw conforme Figura 3.13, são instalados dois capacitores próximos a barra de cada terminal depois dos reatores em derivação.

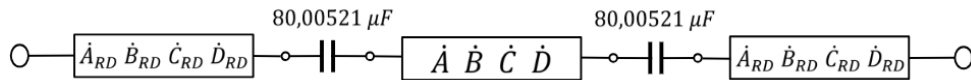
Figura 3.13 - Modelo VII montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Para posterior análise, o valor da reatância de cada capacitor calculado no modelo VI será mantido em 33,1552 [$\Omega/fase$] e sua capacitância em 80,00521 $\mu Farad/fase$, ficando sua representação conforme Figura 3.14.

Figura 3.14 - Exibição do capacitor em cada terminal e o quadripolo da linha e dos reatores em derivação



Fonte: Do autor.

Para obter o quadripolo equivalente do circuito acima é necessário realização a associação de todos.

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Utilizando os resultados do quadripolo do reator em derivação (3.14), do capacitor (3.45) e da linha de transmissão (3.8):

$$Q_{CD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j0,0005076142 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$Q_{CS} = \begin{bmatrix} 1 & -j33,1552 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$Q_L = \begin{bmatrix} 0,9463618 + j0,0039295 & 6,523845 + j89,8851153 \\ -0,0000016 + j0,0011615 & 0,9463618 + j0,0039295 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

É possível definir as constantes generalizadas equivalentes do circuito:

$$\begin{aligned} \dot{A}_e &= \dot{Y}\dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{C} + \dot{Y}\dot{Z}\dot{D} + \dot{Y}\dot{B} + \dot{Y}\dot{Z}\dot{A} + \dot{A} \\ &= 0,9979958 + j0,000537792 [\Omega] \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\dot{B}_e = \dot{Z}\dot{D} + \dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{B} + \dot{Z}\dot{A} = 6,786171 + j25,85469 [\Omega] \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_e &= \dot{Y}\dot{D} + \dot{Y}\dot{Z}\dot{D} + \dot{Y}\dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{C}\dot{Z} + \dot{Y}\dot{B} + \dot{Z}\dot{A}\dot{Y}^2 + \dot{A}\dot{Y} \\ &= 0,0000007 + j0,0001549684 [S] \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_e &= \dot{Y}\dot{C}\dot{Z}^2 + \dot{D} + \dot{Y}\dot{Z}\dot{D} + \dot{C}\dot{Z} + \dot{Y}\dot{B} + \dot{A}\dot{Z}\dot{Y} \\ &= 0,9979958 + j0,000537792[\Omega] \end{aligned} \quad (3.55)$$

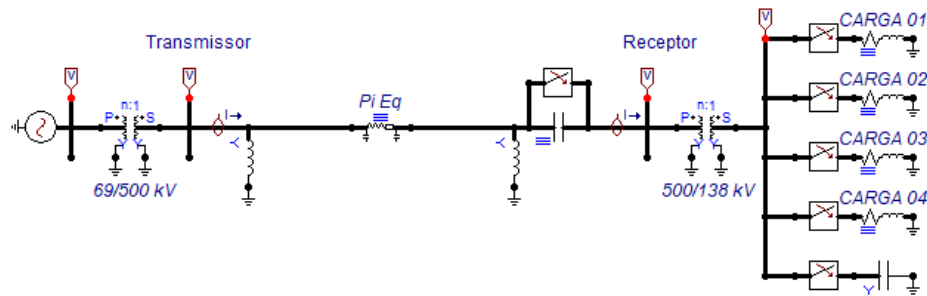
E assim finalmente é possível escrever o quadripolo equivalente do circuito:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9979958 + j0,000537792 & 6,786171 + j25,85469 \\ 0,0000007 + j0,0001549684 & 0,9979958 + j0,000537792 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

3.4.8 Modelo VIII

Este representa um modelo final feito a partir do IV utilizando os mesmos resultados, só que adicionando uma chave de by-pass no capacitor série e um capacitor *shunt* conectado através de uma chave diretamente na barra de cargas conforme Figura 3.15.

Figura 3.15 - Modelo VIII montado no ATPDraw



Fonte: Do autor.

Essa chave representa um disjuntor, que neste caso, no capacitor série tem a função de baipassar ou inserir o mesmo e no capacitor *shunt* de ligar ou desligar quando for necessário. Este último terá uma reatância capacitiva de $139,0621 \Omega/fase$ e capacitância de $19,0478 \mu Farad/fase$, representando uma redução do fator de potência de 0,95 para 0,99.

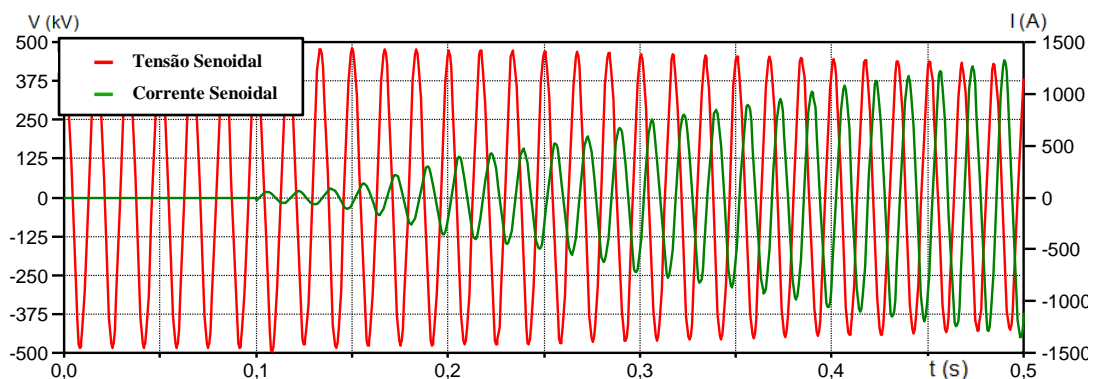
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados gerados de acordo com cada modelo utilizado e as análises dos mesmos quanto a eficiência e desempenho das linhas de transmissão frente a cada alteração no tipo de compensação.

4.1 Níveis de tensão dos modelos

Para o modelo sem nenhum tipo de compensação, levando em conta apenas o crescimento da carga no decorrer do tempo para uma forma linearizada, conforme representado no Gráfico 4.1, há uma diminuição da tensão de pico na carga mais pesada em torno de quase 20%. Já a corrente chega a atingir valores de pico de até 1250 Amperes.

Gráfico 4.1 – Comparativo entre tensão e corrente no terminal receptor para o aumento linear das cargas



Fonte: Do autor.

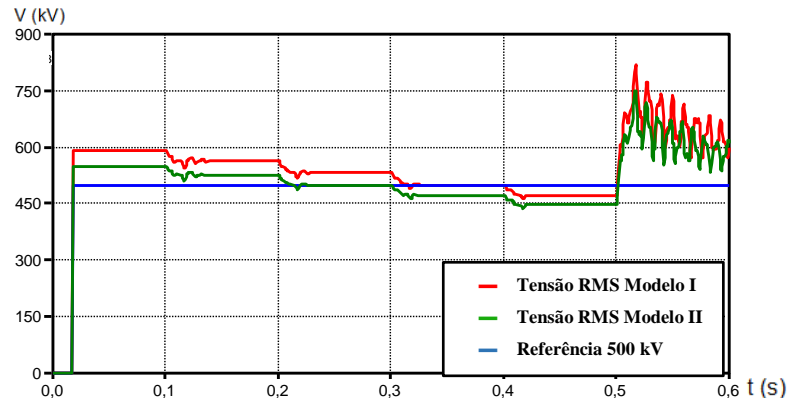
Como para este trabalho, a tensão na barra transmissora se mantém constante, conectado diretamente a fonte por meio de um transformador ideal, a queda de tensão no receptor não é tão acentuada assim como o crescimento da corrente. Assim, a redução da tensão se dá mais diretamente às perdas por Efeito Joule e pela manutenção dos campos eletromagnéticos da linha.

Já o atraso no ângulo de fase da corrente em relação a da tensão no gráfico, é relacionado ao fato da carga ter uma fator de potência indutivo, provocando uma diferença em média de 18,20 graus entre ambos.

4.1.1 Comparativo com e sem a compensação paralela

Quando ocorre a energização de linhas em vazio sem compensação *shunt* há o aumento significativo da tensão no terminal receptor, essa ocorrência conhecida como O Efeito *Ferranti* é bem representada no Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 - Paridade de tensão de linha (V) entre os Modelos I e II



Fonte: Do autor.

O valor da tensão nominal chegou a 18,28% maior do que a tensão no transmissor, obtendo resultados de até 591,38 kV, conforme Tabela 4.1. Para a maior carga de 800 MVA houve uma redução de 6% em comparação com o terminal oposto.

Tabela 4.1 - Tensão RMS (kV) do modelo I e II no receptor

Modelos	Tempo [s]				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
I	591,38	563,13	532,46	501,09	470,47
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94

Fonte: Do autor.

Já para o Modelo II, a aplicação da compensação paralela foi realizado no intuito de diminuir o valor de tensão no transmissor para a operação da linha em vazio conforme procedimentos do ONS. Sendo adicionados reatores *shunt* no valor 5,2256 Henry/fase para cada lado da linha e isso resultou, de acordo com o cálculo de cada quadripolo equivalente, em uma diminuição da reatância capacitiva de 860,95 Ω para 692,17 Ω compreendendo 19,56% de redução. Assim, atendendo aos critérios iniciais com um valor de tensão nominal de 549,09 kV, representando 7% de queda para o Modelo I.

Só que para o momento aonde há a maior potência requerida ao sistema, há uma grande queda de tensão no receptor chegando a 445,94 kV ou 0,89188 pu.

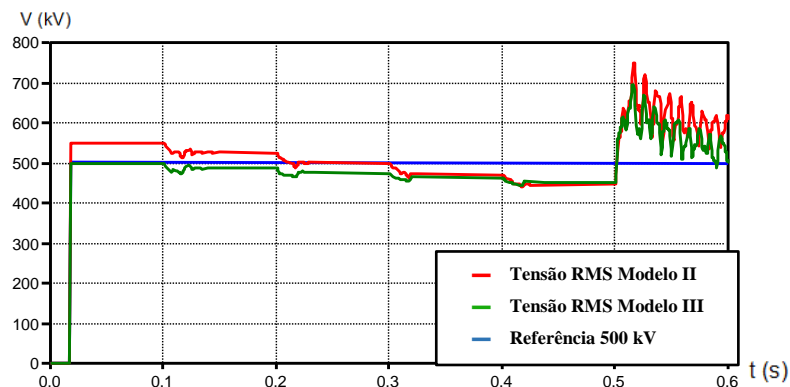
4.1.2 Adição da compensação série a paralela

Como visto anteriormente, a função básica dos bancos de capacitores é aumentar a capacidade de transmissão da linha e a estabilidade da mesma, e assim neste caso será feita a comparação dos efeitos dos capacitores nas tensões dos terminais da linha junto com a compensação em derivação.

4.1.2.1 Modelo II e III

No modelo III há a adição de capacitores no terminal transmissor da linha e os resultados de tensão são obtidos no Gráfico 4.3.

Gráfico 4.3 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e III



Fonte: Do autor.

O valor da tensão nominal chega a ser menor do que o do terminal oposto com um valor de 497,57 kV de acordo com Tabela 4.2. E isto ocorre porque há a neutralização do Efeito *Ferranti* provando quedas de tensão mesmo em vazio, no quadripolo equivalente deste modelo há a representação clara disso, pois o módulo da constante generalizada equivalente A está com um valor número acima de 1.

Tabela 4.2 - Tensão RMS (kV) do modelo II e III no receptor

Modelos	Tempo [s]				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94
III	497,57	487,38	475,52	464,47	452,32

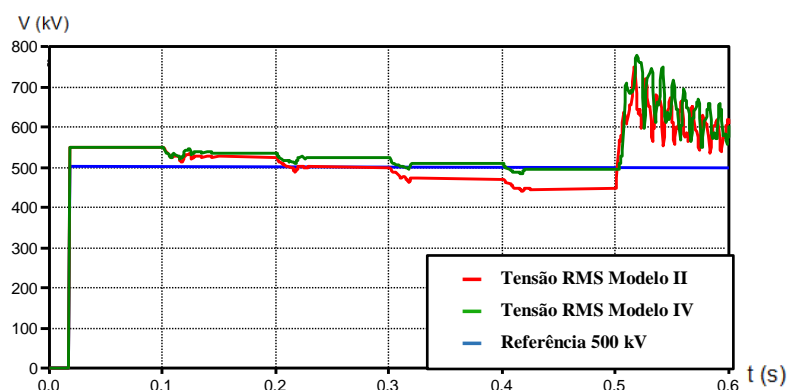
Fonte: Do autor.

À medida em que há o aumento da carga ocorre uma redução da tensão de maneira mais gradativa, diferente da linha apenas com compensação paralela, mas mesmo assim bem fora dos limites operacionais representando uma redução de 9,54% com relação ao transmissor.

4.1.2.2 Modelo II e IV

Já no modelo IV há a adição de capacitores no terminal receptor da linha e isso deixa de ter uma redução drástica conforme modelo anterior, e isto pode ser observado no Gráfico 4.4.

Gráfico 4.4 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e IV



Fonte: Do autor.

Pelo fato da sua instalação ser bem no final da linha, isso influencia em nada nos parâmetros distribuídos da linha para uma operação em vazio, tanto que a constante generalizada equivalente A não sofre alteração.

Tabela 4.3 - Tensão RMS (kV) do modelo II e IV no receptor

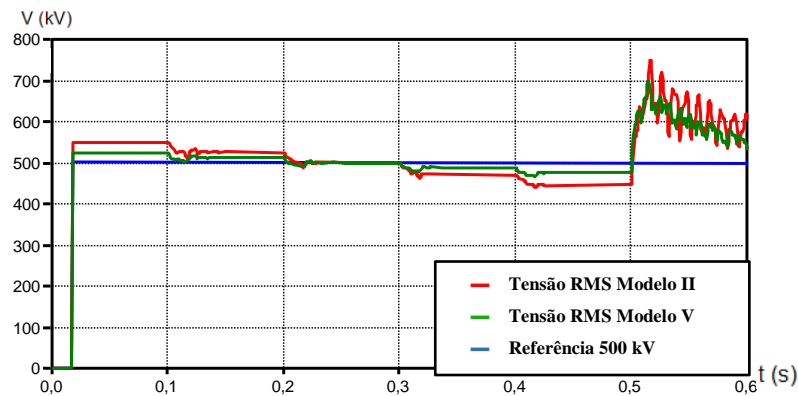
Modelos	Tempo [s]				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94
IV	549,90	536,69	522,94	508,88	494,56

Fonte: Do autor.

Agora quando se há uma carga passando pelo capacitor, se tem a sua geração de energia reativa, fazendo com que a queda de tensão no terminal receptor se atenuie conforme observado no Gráfico 4.4. Neste caso tendo uma redução de apenas 1,1%, ficando quase dentro do limite normal de operação.

4.1.2.3 Modelo II e V

Neste modelo V há a instalação de capacitores bem no meio da linha, fazendo com que não se tenha uma queda de tensão grande quando em vazio e nem com carga total no sistema, e isto é observado na Figura 4.5.

Gráfico 4.5 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e V

Fonte: Do autor.

Portanto, há a alteração de todas as constantes generalizadas equivalentes conforme visto no cálculo do quadripolo equivalente, no capítulo anterior. Nota-se também uma redução significativa na admitância da linha.

Tabela 4.4 - Tensão RMS (kV) do modelo II e V no receptor

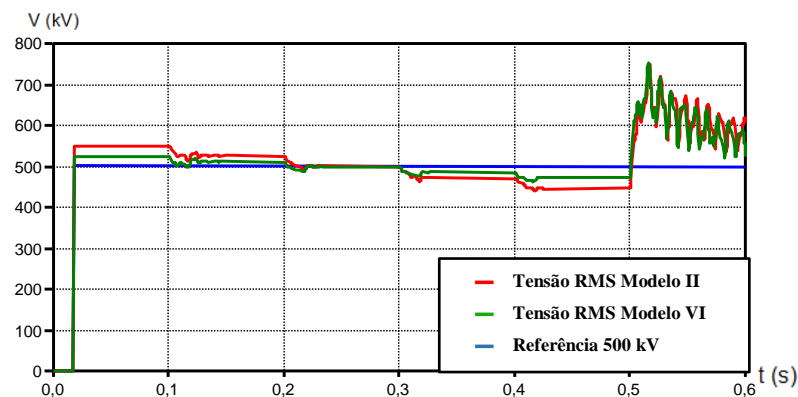
Modelos	Tempo [s]				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94
V	523,84	512,15	500,29	488,18	475,71

Fonte: Do autor.

Para a operação em vazio há a diminuição da tensão nominal em 4,75% com relação ao modelo II, ficando bem próximo da tensão do transmissor e também observado um valor da constante A bem próximo ao valor unitário, e o aumento de 6,67% para o período de maior carga.

4.1.2.4 Modelo II e VI

No modelo VI há a adição de capacitores no terminal receptor e no transmissor da linha, ambos os casos antes dos reatores visto a partir de cada terminal, e isto provoca basicamente quase os mesmos efeitos do Modelo V, conforme observado no Gráfico 4.6, com relação a tensão.

Gráfico 4.6 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e VI

Fonte: Do autor.

Há uma alteração de quase todas as constantes generalizadas equivalentes conforme visto no cálculo do quadripolo equivalente no capítulo anterior, menos na constante C permanecendo com o mesmo valor.

Tabela 4.5 - Tensão RMS (kV) do modelo II e VI no receptor

Modelos	Tempo [s]				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94
VI	523,58	511,44	498,78	486,21	472,70

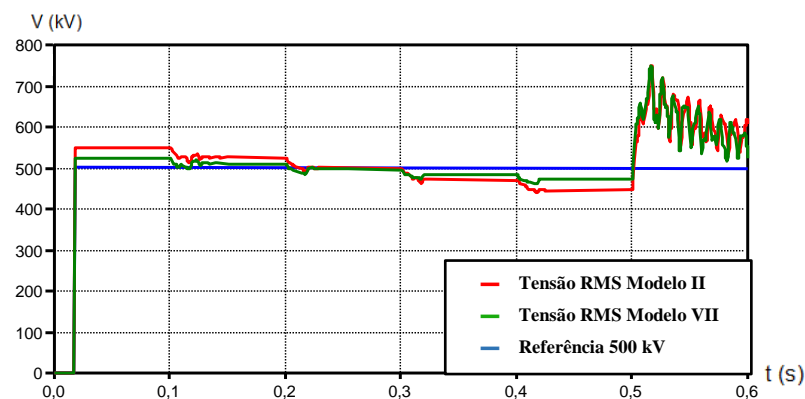
Fonte: Do autor.

Já para a operação em vazio há a diminuição da tensão nominal em 4,8% com relação ao modelo II, ficando um pouco próximo da tensão do transmissor e também observado um valor da constante A perto do valor unitário, e o aumento de 6% para o período de maior carga.

4.1.2.5 Modelo II e VII

Neste modelo VII há também a adição de capacitores no terminal receptor e no transmissor da linha, mas em ambos os casos depois dos reatores visto a partir de cada terminal, e isto provoca basicamente quase os mesmos efeitos do Modelo VI, conforme observado no Gráfico 4.6.

Gráfico 4.7 - Paridade de tensão de linha entre os Modelos II e VII



Fonte: Do autor.

Neste caso há uma alteração de todas as constantes generalizadas equivalentes conforme visto no cálculo do quadripolo equivalente no capítulo anterior.

Tabela 4.6 - Tensão RMS (kV) do modelo II e VII no receptor

Modelos	Tempo [s]				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94
VII	523,61	511,10	497,56	484,02	470,38

Fonte: Do autor.

Na operação em vazio há a diminuição da tensão nominal em 4,79%, com relação ao modelo II, e o aumento de 5,48% para o período de maior carga.

4.1.3 Valores de rejeição de carga

No tempo de 500 milissegundos foi simulado um corte violento de todas as cargas para verificar como o sistema age mediante a esse estresse, e como isso foram obtidos os valores de pico máximo de tensão em cada modelo, conforme Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Tensão máxima de pico na rejeição de carga

Modelos	I	II	III	IV	V	VI	VII
Tensão (kV)	877,38	803,60	730,61	861,30	842,50	791,35	791,82

Fonte: Do autor.

No primeiro, que é o modelo base sem nenhuma compensação, chegou próximo a 82% da tensão de pico para a linha em vazio e demorou cerca de 430 milissegundos para poder normalizar novamente.

Posto isto, é importante ressaltar os elementos de proteção do BCS que evitam esses tipos de oscilação atinjam diretamente os capacitores por muito tempo, danificado ou reduzindo a vida útil dos mesmos.

4.1.4 Quadro Geral e o SIL

Com base na Tabela 2.1 da ANEEL é possível classificar o tipo de operação que o sistema se encontra, na Tabela 4.6 é feita essa diferenciação para tensão nominal de operação em 500 kV, sendo verde para operação normal, amarelo para operação em emergência e vermelho para fora dos limites operacionais.

Tabela 4.8 - Tensão RMS (kV) dos Modelo I ao VII no receptor

Modelos	Tempo (s)				
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5
I	591,38	563,13	532,46	501,09	470,47
II	549,98	525,87	499,62	472,59	445,94
III	497,57	487,38	475,52	464,47	452,32
IV	549,90	536,69	522,94	508,88	494,56
V	523,84	512,15	500,29	488,18	475,71
VI	523,58	511,44	498,78	486,21	472,70
VII	523,61	511,10	497,56	484,02	470,38

Fonte: Do autor.

Portanto é verificado que o Modelo IV melhor atende as condições normais de operação quando ao nível de tensão, já no segundo o Modelo V, e depois o VI e VII bem próximos. Nota-se também com essa Tabela e com os gráficos anteriores uma diminuição da tensão de forma não linear diferente do aumento da carga, fato este que pode ser atribuído ao *Surge Impedance Loading*, pois os valores de potência ativa que a linha transmite passam a chegar mais próximos da potência natural e assim a gerar ainda menos reativo ao sistema.

4.2 Potência dos compensadores e eficiência

Os principais fatores que se relacionam diretamente ao custo dos Bancos de Capacitores Série é o local de instalação e a potência do equipamento. E mesmo utilizando uma potência igualitária, a sua eficácia pode ter uma alteração bastante relevante dependendo do local da fundação.

4.2.1 Em derivação

Para se chegar a redução de tensão necessária foram colocados dois reatores em cada extremidade com um valor de 0,0005076142 *Siemens* e através da Equação (2.32) foi encontrado um resultado, para uma tensão nominal de 500 kV, de capacidade trifásica dos reatores indutivos uma potência de 126 MVar para cada extremo.

$$Q_L = V_L^2 * y'' \quad (2.32)$$

Esse valor provocou uma alteração de 0,0011615 para 0,001444732 *Siemens*, provocando um aumento de 24% na susceptância e uma redução de 19,61% na reatância capacitiva.

4.2.2 Série

Para a obtenção do valor de potência dos capacitores foi utilizado a Equação (2.44).

$$Q_C = 3 * X_C * I_L^2 \quad (2.44)$$

E como necessita-se de uma corrente de determinado valor, foi utilizando um número aproximado para o período de maior carga, conforme demonstrado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Potência dos BCS e a redução da reatância indutiva no sistema

Modelos	X_C [Ω]	BCS	X_C [Ω] Total	Potência [MVar] para uma corrente de 900 [A]	X_L [Ω] Inicial	X_L [Ω] Final
III	69,20477	1	69,20477	168,17	89,8851153	26,91540
IV	69,20477	1	69,20477	168,17	89,8851153	26,91540
V	64,65353	1	64,65353	157,11	89,8851153	23,96554
VI	33,15520	2	66,31040	161,13	89,8851153	27,96086
VII	33,15520	2	66,31040	161,13	89,8851153	25,85469

Fonte: Do autor.

Para o modelo de menor potência aparente reativa foi obtido também a menor redução da reatância indutiva em cerca de 73,34%, sendo maior do que a desejada anteriormente que era até 70%. Sendo assim o seu maior empecilho para a implementação até agora, o local de instalação.

Já para o segundo menor, é obtido o mesmo valor de potência para os dois modelos desta posição, só que a redução da reatância indutiva é diferente para cada um, sendo 68,89% para o VI e 71,24% para o VII configurando uma alteração de 2,35%. Representando ainda mais, as mudanças que o BCS provoca no sistema apenas alterando seu local de instalação dentro da subestação.

No último lugar, também temos dois modelos de mesmo valor, mas neste caso o seu impacto com relação a redução da reatância é o mesmo para os dois, em certa de 70,01%.

Portanto, apesar da sua potência ser um pouco maior que os anteriores ele consegue satisfazer bem os critérios e a sua implementação seria muito mais barata, pois tendo o espaço dentro da subestação, poderia ser instalado apenas em uma das extremidades sem a necessidade de ter dois em menor potência e tamanho ou um no meio da linha.

4.3 Potência Máxima e Estabilidade sistêmica

Para um primeiro caso, o cálculo da potência elétrica trifásica que pode ser transmitida pela linha de transmissão através da Equação (1.1) apresentada no primeiro capítulo, desconsiderando a resistência e considerando o mesmo ângulo e tensão de linha para cada terminal, temos uma potência máxima para a linha sem compensação de 2.781 MW.

$$P_e = \frac{V_T \cdot V_R}{R + X_L} \sin \theta \quad (1.1)$$

Utilizando o Modelo IV como base, há um aumento da potência para 9.288,4 MW, tendo assim uma elevação considerável de 234%, demonstrando de maneira simples o seu impacto na linha de transmissão.

Já para o segundo caso, considerando todos os parâmetros, temos primeiramente os resultados dos quadripolos equivalentes dos Modelos II ao VII, em suas formas polares, são representados conforme equações matriciais, respectivamente:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,909917 \angle 0,30351^\circ & 90,12155 \angle 85,84876^\circ \\ 0,001444732 \angle 90^\circ & 0,909917 \angle 0,30351^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,009899 \angle 0,2734597^\circ & 27,77522 \angle 75,70647^\circ \\ 0,001444732 \angle 90^\circ & 0,909917 \angle 0,30351^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,909917 \angle 0,30351^\circ & 27,77522 \angle 75,70647^\circ \\ 0,001444732 \angle 90^\circ & 1,0098999 \angle 0,2734597^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,997598 \angle 0,03468003^\circ & 24,87129 \angle 74,4897^\circ \\ 0,0001780695 \angle 90^\circ & 0,997598 \angle 0,03468003^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9578167 \angle 0,2883294^\circ & 28,78615 \angle 76,24713^\circ \\ 0,001444732 \angle 90^\circ & 0,9578167 \angle 0,2883294^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9979959 \angle 0,03087509^\circ & 26,73045 \angle 75,29312^\circ \\ 0,00015497 \angle 89,74119^\circ & 0,9979959 \angle 0,03087509^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Já com o resultado do quadripolo equivalente no Modelo I (3.9), e utilizando a Equação (2.51) para a potência máxima e (2.52) para potência reativa, é possível fazer as comparações.

$$P_{Rmax} = \frac{V_R \cdot V_T}{B} - \frac{A \cdot V_R^2}{B} \cos(\beta_B - \beta_A) \quad (2.51)$$

$$Q_{Rnec} = -\frac{A \cdot V_R^2}{B} \sin(\beta_B - \beta_A) \quad (2.52)$$

Essa confrontação é feita na Tabela 4.10, sendo considerado o valor da tensão no terminal receptor o mesmo do transmissor.

Tabela 4.10 - Potência máxima e reativo necessário

Modelos	Potência Máxima [MW]	Potência reativa necessária [MVar]
I	2.566,75	2.617,56
II	2.577,98	2.516,51
III	6.714,61	8.797,72
IV	6.176,76	7.925,65
V	7.364,40	9.660,80
VI	6.666,53	8.069,84
VII	6.978,13	9.026,80

Fonte: Do autor.

Novamente utilizando o Modelo IV como base, há um aumento da potência máxima em relação ao primeiro de consideráveis de 140,64%, sendo uma redução de 93% com o primeiro caso em que foi utilizada a Equação (1.1), mesmo assim demonstrando o grande efeito na linha de transmissão. O Modelo V acaba sendo o que proporciona maior elevação em relação aos demais, e para a adição dos reatores de linha, pouco se influencia neste aumento.

Contudo, grandes fluxos de potência transmitida pela linha, acabam necessitando de maior inserção de reativos para poder manter as tensões no receptor dentro dos limites desejados. Isso é observado na Tabela 4.10. Como o Modelo V tem a maior potência, tem-se também maior utilização de reativo. Para o Modelo IV, relacionando ao primeiro, é representado um aumento de potência reativa de 202,79%, sendo o triplo do inicial.

Com a utilização da Equação (2.53) para o ângulo de operação em cada modelo, foi montado a seguinte Tabela 4.11, para análise.

Tabela 4.11 – Ângulos de estabilidade máximos e operação

Modelos	Potência na carga [MW]	Ângulo Teórico Máximo de Estabilidade [°]	Ângulo da linha de transmissão [°]
I	760	85,84876	16,1157
II	760	85,84876	16,0085
III	760	75,70647	5,48822
IV	760	75,70647	3,99204
V	760	74,48970	4,54701
VI	760	76,24713	4,90370
VII	760	75,29312	4,87454

Fonte: Do autor.

Nota-se que mesmo usando dois reatores de alta potência, há apenas uma leve melhora no ângulo de estabilidade da linha. Demonstrando assim, que a compensação paralela influenciou nos resultados de estabilidade de maneira muito menos significativa do que a série, e as configurações desta última também representaram resultados distintos. Considerando apenas a carga ativa no receptor, utilizando-se o Modelo IV, representou uma menor redução no ângulo de estabilidade, com um valor de 75,06% para o I, e empatado com o III em relação ao ângulo máximo para os critérios propostos.

Já para a Tabela 4.12, os valores são retirados dos arquivos .lis (Anexo I) gerado pelo ATPDraw em cada um dos modelos.

Tabela 4.12 - Ângulos (°) da linha de transmissão no ATPDraw

Modelos	Potência na carga [MVA] com FP 0,95				
	0	200	400	600	800
I	0.5645480	6.5961542	12.0251327	16.8543963	21.1202570
II	0.3085823	5.9497067	11.0731666	15.6763401	19.7838777
III	0.2932012	2.8403949	5.2748983	7.5958201	9.8038383
IV	0.3085823	3.1167610	5.7870792	8.3186968	10.7130208
V	0.2972411	2.9128844	5.4113459	7.7914645	10.0538172
VI	0.3008290	3.0263914	5.6230007	8.0896865	10.4274957
VII	0.2970788	3.1609355	5.8826135	8.4610742	10.8977007

Fonte: Do autor.

Os cálculos teóricos dos ângulos do ponto de operação seguiram a mesma relação com os coletados no ATPDraw, mesmo sendo utilizadas tensões iguais entre o receptor e transmissor, e não sendo considerado o reativo absorvido pelas cargas no decorrer do tempo. As fórmulas utilizadas não foram possíveis prever todas essas alterações. Para os cálculos teóricos, teve uma redução em torno de 70% e os computacionais com 50% em média.

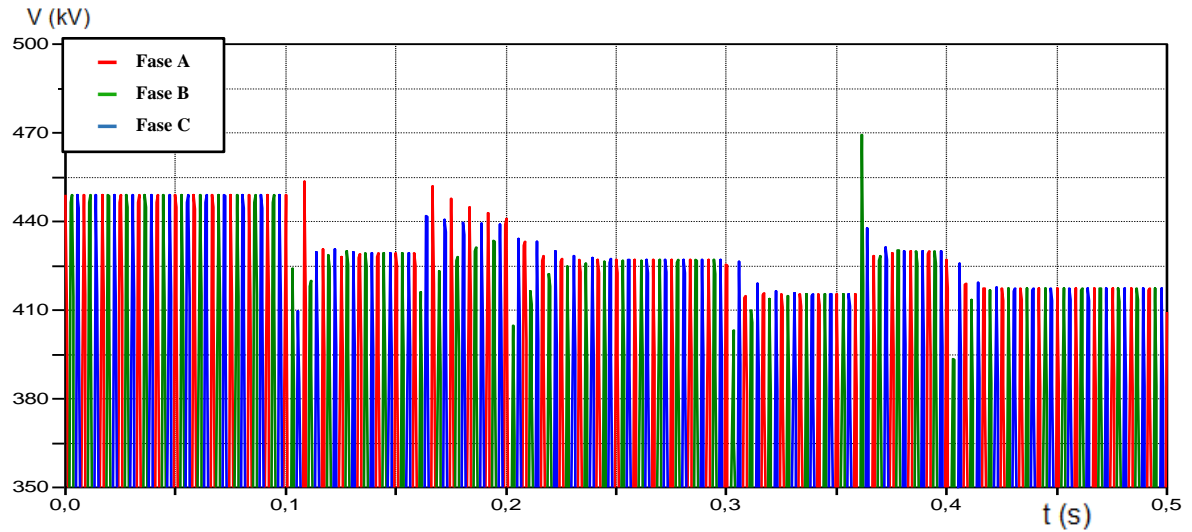
Portanto, esses resultados comprovam a eficácia dos BCS no aumento da estabilidade estática do sistema com a redução do ângulo entre as barras. Os valores obtidos para os modelos com compensação série tiveram resultados bem próximos devido ao fato de utilizar o mesmo grau de redução, sendo o terceiro modelo com a menor diminuição e o sétimo modelo maior.

4.4 Configuração final

O Modelo IV consegue valores bem próximos dos outros com relação a redução da impedância e melhora no ângulo de estabilidade, mas suas principais vantagens estão no fato de utilizar apenas um único Banco de Capacitor Série e poder elevar melhor a tensão no terminal receptor mantendo o sistema mais tempo possível em regime normal de operação. Só que no período de maior carga esse modelo não mais atende esse último requisito.

Posto isto, neste último modelo é colocado um capacitor *shunt*, um pouco antes de adicionar a última carga, que reduz a queda de tensão com o aumento do fator de potência. Já para o capacitor série se instala um disjuntor que insere o mesmo antes de adicionar a segunda carga, e isto é verificado no Gráfico 4.8, os seus efeitos.

Gráfico 4.8 - Visão superior da tensão senoidal no receptor

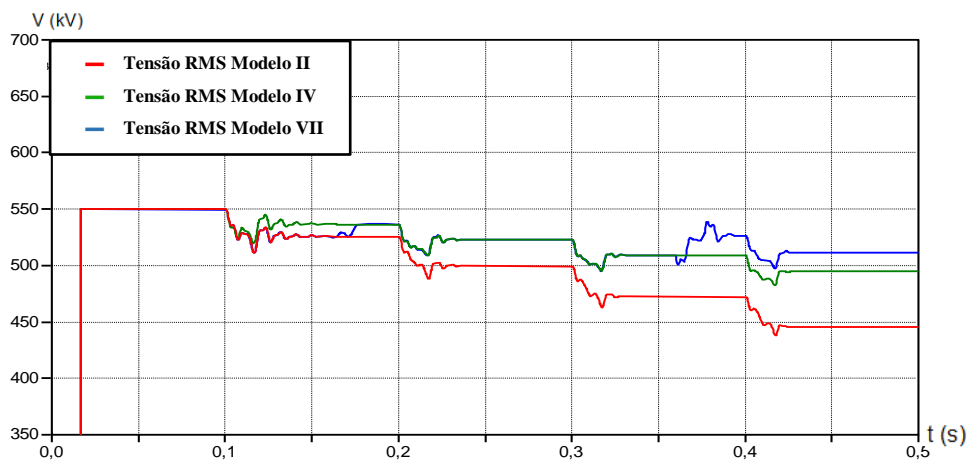


Fonte: Do autor.

Se o capacitor shunt fosse inserido desde do início, acarretaria um aumento considerável de tensão com a linha em vazio quase que anulando o efeito do reator e com isso ultrapassando os limites operacionais. Já no caso do BCS inserido, a sua influência é quase nula no sistema mesmo em pequenas cargas, além disso energizar uma linha com o banco pode gerar esforços desnecessários, principalmente se a linha estiver em curto, com isso, reduzindo assim sua vida útil.

O Gráfico 4.9, mostra melhor a comparação entre os modelos com as alterações.

Gráfico 4.9 - Tensão de linha no Modelo VIII e comparação



Fonte: Do autor.

No Modelo IV para o período que carga mais pesada a tensão chegava a 494,56 kV, conforme Tabela 4.8, e com a correção subiu para 511,21 kV representando um aumento de 3,37% ficando dentro dos limites normais de operação. A potência reativa trifásica do capacitor *shunt*, com base na reatância capacitiva e tensão de 138 kV, resultam em 136,946 MVar.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados tipos de compensação fixa, série e paralelo, para linhas de transmissão de energia simétricos em extra-alta tensão com o objetivo de avaliar seus impactos no sistema elétrico nas mais variadas configurações. Analisando principalmente a relação com o nível de tensão, a potência dos equipamentos utilizados com a sua eficiência e a influência na estabilidade sistêmica para cada modelo estudado.

A obtenção dos parâmetros concentrados e distribuídos da LT e sua representação por quadripolos com a utilização de constantes generalizadas, possibilitou uma melhor visualização dos efeitos de cada compensação. O *software* ATPDraw, como uma ferramenta que possibilita esses estudos, contribuiu para compreender melhor as compensações através dos resultados obtidos em cada modelo, atendendo aos objetivos e as expectativas.

Assim, os resultados obtidos em cada modelo, tanto computacional como teórico, foi possível fazer a avaliação dos valores de tensões eficazes nos terminais receptores de cada modelo, desde do aumento gradual das cargas até sua rejeição, a potência de cada equipamento relacionado a sua eficiência na redução da reatância indutiva da linha e a redução do ângulo de estabilidade com o aumento da potência máxima transmitida pela LT.

Os cálculos dos valores dos reatores *shunt* para minimizar os impactos do Efeito *Ferranti* obtiveram resultados satisfatórios quando inseridos no programa, ficando dentro das especificações técnicas do ONS para a classe de 500 kV, e comprovado também que eles pouco influenciam na estabilidade do sistema. Algo a se considerar é a adição ao sistema de linhas que tenham alto valor de impedância paralela, assim é interessante fazer uma divisão dos reatores nos terminais, considerando um fixo de linha e outro manobrável de barra que pode ser ligado solidário a linha quando há a energização da mesma.

Já os BCS, tiveram resultados consideráveis no aumento da potência máxima transmitida pela linha, independente da configuração, e uma melhoria significativa no ângulo de estabilidade, deixando o sistema mais robusto.

Portanto, a instalação dos bancos retira a necessidade da construção de novas linhas de transmissão paralelas e auxilia no controle sistêmico, mas como eles possuem componentes caros, se deve ter uma maior preocupação em regimes transitórios e em faltas externas e internas

a sua linha. Também se deve ter um cuidado na aplicação em linhas com mais de um circuito, pois na ausência da compensação em um desses circuitos, se tem o desequilíbrio de impedância e assim uma boa parte da potência será redirecionada para as restantes podendo ultrapassar seus limites de corrente.

Diante destas conclusões, é sugerido como trabalhos futuros as seguintes propostas:

- Dimensionar e avaliar o desempenho do MOV em sistemas com regimes transitórios;
- Avaliar o desempenho da compensação série fixa em linha de circuitos duplos;
- Avaliar os efeitos nos equipamentos de proteção por distância para linhas compensadas quanto a alteração da impedância série; e
- Avaliar as particularidades e diferenças entre a compensação série fixa e controlada.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, Paul M.; FARMER, Richard G. **Series Compensation of Power Systems**. California: PBLSH! Incorporated, 1996.

ANEEL. **Especificações Técnicas Gerais**. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_transmissao/documentos/Anexo_T%C3%A9cnico_Geral_Leil%C3%A3o_02_2017.pdf>. Acesso em: 10 maio 2018.

ATP. **Alternative Transients Program**. 2015. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net>>. Acesso em: 02 maio 2018.

BAKSHI, Uday A. **Transmission lines and waveguides**. 3. ed. [S.l.]: Technical Pub, 2012.

EPE. **Balanco Energético Nacional**. 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>>. Acesso em: 20 mar 2018.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica**. 3. ed. Uberlândia: EDUFU, 2015.

GLÁSSIO, Car Mar. **Uma contribuição ao estudo do efeito corona em linhas de transmissão utilizando o método dos elementos finitos**. 1994. 123 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

JOSHI, Himanshu M.; KOTHARI, Nishant H. **A review on Series Compensation of Transmission Lines and Its Impact on Performance of Transmission Lines**. In: International Journal of Engineering Development and Research, 14., 2014, Rajkot. Anais... RTEECE: MEFGI, 2014. p. 72-76.

LEÃO, Ruth. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Fortaleza: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2009.

MILLER, Timothy John Eastham. **Reactive Power Control in Electric Systems**. New York: John Wiley and Sons, 1988.

NATARAJAN, Ramasamy. **Power System Capacitors**. New York: CRC Press, 2005.

ONS. **Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN**. 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes?categoria=Relat%C3%B3rio+PAR>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

ONS. **Mapa Dinâmico do SIN**. 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-oi-sin/mapas>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

ONS. **Submódulo 10.7 - Controle da transmissão**. 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2010%2FSubm%C3%B3dulo%2010.7%2FSubm%C3%B3dulo%2010.7%202016.12.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2018.

ONS. **Submódulo 10.21.3 - Instruções de Operação**. 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/mpo>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ONS. **Submódulo 23.2 - Critérios para definição das redes do Sistema Interligado Nacional**. 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2023%2FSubm%C3%B3dulo%2023.2%2FSubm%C3%B3dulo%2023.2%202016.12.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2018.

REZENDE, Paulo H. O. *et al.* **Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando compensadores estáticos fixos**. In: Conferência de Estudo em Engenharia Elétrica, 11., 2013, Uberlândia. Anais... Uberlândia: UFU, 2013.

SARTORI, José Carlos. **Linhas de transmissão e Carta de Smith**: projeto assistido por computador. 2. ed. São Carlos: EESC/USP, 2004.

SIEMENS. **Fixed Series Capacitor**. 2018. Disponível em: <[https://www.energy.siemens.com/nl/en/power-transmission/facts/series-compensation/#content=Fixed%20Series%20Capacitor%20\(FSC\)](https://www.energy.siemens.com/nl/en/power-transmission/facts/series-compensation/#content=Fixed%20Series%20Capacitor%20(FSC))>. Acesso em: 03 maio 2018.

SOOD, Vijay K. **Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**. Ottawa: John Wiley & Sons, 2002.

EMINOGLU, Ulas; HOCAOGLU, M. Hakan; YALCINOZ, Tankut. **Transmission Line Shunt and Series Compensation with Voltage Sensitive Loads**. International Journal of Electrical Engineering Education, [S.l.], v. 46, n. 4, p. 354-369, out. 2012.

ZANETTA, Luiz Cera Jr. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

ZANETTA, Luiz Cera Jr. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: Edusp, 2002.


```

Another ordinary MODELS data card. | xrms_ini:= -1.
Another ordinary MODELS data card. | scale:= 1.732051
Another ordinary MODELS data card. | SampleFreq:= 5.E3
Another ordinary MODELS data card. |OUTPUT
Another ordinary MODELS data card. | RMS02A:=xrms[1]
Another ordinary MODELS data card. | RMS02B:=xrms[2]
Another ordinary MODELS data card. | RMS02C:=xrms[3]
Another ordinary MODELS data card. |ENDUSE
Another ordinary MODELS data card. |RECORD
Another ordinary MODELS data card. | RMS02A AS RMS02A
Another ordinary MODELS data card. | RMS02B AS RMS02B
Another ordinary MODELS data card. | RMS02C AS RMS02C
Another ordinary MODELS data card. | RMS01A AS RMS01A
Another ordinary MODELS data card. | RMS01B AS RMS01B
Another ordinary MODELS data card. | RMS01C AS RMS01C
Termination of data for Laurent Dube's MODELS. |ENDMODELS
Comment card. NUMDCD = 102. |C 1 2 3 4 5 6 7 8
Comment card. NUMDCD = 103. |C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
Optional blank card follows last of MODELS data. |BLANK MODELS
Comment card. NUMDCD = 105. |C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
Comment card. NUMDCD = 106. |C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><<><>0
1st of PI-ckt. 6.766E+00 3.328E-01 6.533E-06 |1 X0005AX0006A 6.766125.462462.7
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.766E+00 3.328E-01 |2 X0005BX0006B 6.766125.462462.7
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 |3 X0005CX0006C 6.766125.462462.7
Séries R-L-C. 1.000E+21 0.000E+00 0.000E+00 | FONTEA 1.E21 0
Séries R-L-C. 1.000E+21 0.000E+00 0.000E+00 | FONTEB 1.E21 0
Séries R-L-C. 1.000E+21 0.000E+00 0.000E+00 | FONTEC 1.E21 0
Begin ideal Xformer. 2 winding cards follow. | IDEAL TRANSFORMER
Xformer winding 1. Voltage = 1.380E-01 |1FONTEA 0.138
Xformer winding 2. Voltage = 1.000E+00 |2B501A 1.
Begin ideal Xformer. 2 winding cards follow. | IDEAL TRANSFORMER
Xformer winding 1. Voltage = 1.380E-01 |1FONTEB 0.138
Xformer winding 2. Voltage = 1.000E+00 |2B501B 1.
Begin ideal Xformer. 2 winding cards follow. | IDEAL TRANSFORMER
Xformer winding 1. Voltage = 1.380E-01 |1FONTEC 0.138
Xformer winding 2. Voltage = 1.000E+00 |2B501C 1.
Begin ideal Xformer. 2 winding cards follow. | IDEAL TRANSFORMER
Xformer winding 1. Voltage = 3.623E+00 |1B502A 3.6232
Xformer winding 2. Voltage = 1.000E+00 |2B138A 1.
Begin ideal Xformer. 2 winding cards follow. | IDEAL TRANSFORMER
Xformer winding 1. Voltage = 3.623E+00 |1B502B 3.6232
Xformer winding 2. Voltage = 1.000E+00 |2B138B 1.
Begin ideal Xformer. 2 winding cards follow. | IDEAL TRANSFORMER
Xformer winding 1. Voltage = 3.623E+00 |1B502C 3.6232
Xformer winding 2. Voltage = 1.000E+00 |2B138C 1.
Séries R-L-C. 1.000E+21 0.000E+00 0.000E+00 | B138A 1.E21 0
Séries R-L-C. 1.000E+21 0.000E+00 0.000E+00 | B138B 1.E21 0
Séries R-L-C. 1.000E+21 0.000E+00 0.000E+00 | B138C 1.E21 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0001A 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0001B 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0001C 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0002A 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0002B 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0002C 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0003A 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0003B 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0003C 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0004A 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0004B 90.45929.732 0
Séries R-L-C. 9.046E+01 7.887E-02 0.000E+00 | X0004C 90.45929.732 0
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 21 25 |BLANK BRANCH
Comment card. NUMDCD = 147. |C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
Permanently-closed switch used for metering. | B501A X0005A MEASURING 1
Permanently-closed switch used for metering. | B501B X0005B MEASURING 1
Permanently-closed switch used for metering. | B501C X0005C MEASURING 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0006AB502A MEASURING 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0006BB502B MEASURING 1
Permanently-closed switch used for metering. | X0006CB502C MEASURING 1
Switch. 1.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138A X0001A .1 .5 1.E3 0
Switch. 1.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138B X0001B .1 .5 1.E3 0
Switch. 1.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138C X0001C .1 .5 1.E3 0
Switch. 2.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138A X0002A .2 .5 1.E3 0
Switch. 2.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138B X0002B .2 .5 1.E3 0
Switch. 2.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138C X0002C .2 .5 1.E3 0
Switch. 3.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138A X0003A .3 .5 1.E3 0
Switch. 3.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138B X0003B .3 .5 1.E3 0
Switch. 3.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138C X0003C .3 .5 1.E3 0
Switch. 4.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138A X0004A .4 .5 1.E3 0
Switch. 4.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138B X0004B .4 .5 1.E3 0
Switch. 4.00E-01 5.00E-01 1.00E+03 0.00E+00 | B138C X0004C .4 .5 1.E3 0
Blank card ending switches. KSWTCH = 18. |BLANK SWITCH
Source. 1.00E-20 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 |14FONTEA 1.E-20 1.0
Source-18. 1.3800E-01 "B501A "," " " " |18 .138B501A
Source. 1.00E-20 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 |14FONTEB 1.E-20 1.0
Source-18. 1.3800E-01 "B501B "," " " " |18 .138B501B
Source. 1.00E-20 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 |14FONTEC 1.E-20 1.0
Source-18. 1.3800E-01 "B501C "," " " " |18 .138B501C
Source. 1.00E-20 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 |14B502A 1.E-20 1.0
Source-18. 3.6232E+00 "B138A "," " " " |18 3.6232B138A
Source. 1.00E-20 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 |14B502B 1.E-20 1.0
Source-18. 3.6232E+00 "B138B "," " " " |18 3.6232B138B
Source. 1.00E-20 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 |14B502C 1.E-20 1.0
Source-18. 3.6232E+00 "B138C "," " " " |18 3.6232B138C
Comment card. NUMDCD = 167. |C < n 1><< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
Source. 5.63E+04 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 |14FONTEA 56338.2641 60. -1. 100.
Source. 5.63E+04 6.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00 |14FONTEB 56338.2641 60. -120. -1. 100.
Source. 5.63E+04 6.00E+01 -2.40E+02 -1.00E+00 |14FONTEC 56338.2641 60. -240. -1. 100.
Blank card ends electric sources. KCONST = 15 |BLANK SOURCE

```

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

```

-----
From bus name | Names of all adjacent busses.
-----
X0005A |X0006A*B501A *
X0006A |X0005A*B502A *
X0005B |X0006B*B501B *
X0006B |X0005B*B502B *
X0005C |X0006C*B501C *
X0006C |X0005C*B502C *
FONTEA |TERRA *TERRA *18TYF1*

```


		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	TERRA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B138B		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	TERRA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B138C		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	TERRA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TERRA		0.0	0.0	0.0	7950.6066393648	0.0	.31606072967E8
		0.0	0.0	-7950.606639365	-90.0000000	0.0	0.0
	18TYP1	0.0	7950.6066393648	0.0	7950.6066393648	.31606072967E8	
		7950.6066393648	90.0000000	7950.6066393648	90.0000000	0.0	
B501A		408248.29057971	408248.29057971	56338.2641	56348.946874884	.11500000007E11	.11504361645E11
		-.639633808E-11	0.0000000	-1097.183716232	-1.1156902	.223961688302E9	0.0000000
	18TYP1	0.0	7950.6066393648	-56338.2641	56348.946874884	.436163806944E7	
		7950.6066393648	90.0000000	1097.1837162323	178.8843098	-.2239616883E9	
B501A		408248.29057971	408248.29057971	-56338.2641	56338.2641	-.1150000001E11	-.1150000001E11
		-.639633808E-11	0.0000000	.8826946551E-12	180.0000000	.4497794581E-23	0.0000000
	TERRA	0.0	0.0	56338.2641	56338.2641	0.0	0.0
		0.0	0.0	-.882694655E-12	0.0000000	0.0	0.0
TERRA		0.0	0.0	0.0	1097.1837162323	0.0	-.43616380694E7
		0.0	0.0	1097.1837162323	90.0000000	0.0	0.0
	18TYP1	0.0	7950.6066393648	0.0	1097.1837162323	-.43616380694E7	
		7950.6066393648	90.0000000	-1097.183716232	-90.0000000	0.0	
FONTEA		56338.2641	56338.2641	-56338.2641	56896.503826995	-.1587000001E10	-.1618606074E10
		0.0	0.0	7950.6066393648	171.9673112	-.2239616883E9	0.0
	18TYP1	0.0	7950.6066393648	56338.2641	56896.503826995	-.31606072967E8	
		7950.6066393648	90.0000000	-7950.606639365	-8.0326888	.223961688302E9	
FONTEA		56338.2641	56338.2641	56338.2641	56338.2641	.15870000009E10	.15870000009E10
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	TERRA	0.0	0.0	-56338.2641	56338.2641	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	180.0000000	0.0	0.0
TERRA		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	18TYP2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B501B		-204124.1452899	408248.29057971	-28169.13205	56338.2641	.11500000007E11	.11500000007E11
		-353553.3906936	-120.0000000	-48790.36791572	-120.0000000	.28312206268E-6	0.0000003
	18TYP2	0.0	0.0	28169.13205	56338.2641	0.0	
		0.0	0.0	48790.367915717	60.0000000	0.0	
B501B		-204124.1452899	408248.29057971	28169.13205	56338.2641	-.1150000001E11	-.1150000001E11
		-353553.3906936	-120.0000000	48790.367915717	60.0000000	-.2831220627E-6	-0.0000003
	TERRA	0.0	0.0	-28169.13205	56338.2641	0.0	0.0
		0.0	0.0	-48790.36791572	-120.0000000	0.0	0.0
TERRA		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	18TYP2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FONTEB		-28169.13205	56338.2641	28169.13205	56338.2641	-.1587000001E10	-.1587000001E10
		-48790.36791572	-120.0000000	48790.367915717	60.0000000	0.0	0.0
	18TYP2	0.0	0.0	-28169.13205	56338.2641	0.0	
		0.0	0.0	-48790.36791572	-120.0000000	0.0	
FONTEB		-28169.13205	56338.2641	-28169.13205	56338.2641	.15870000009E10	.15870000009E10
		-48790.36791572	-120.0000000	-48790.36791572	-120.0000000	0.0	0.0
	TERRA	0.0	0.0	28169.13205	56338.2641	0.0	0.0
		0.0	0.0	48790.367915717	60.0000000	0.0	0.0
TERRA		0.0	0.0	32768.	32768.	0.0	.536870912E9
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	18TYP3	-32768.	32768.	-32768.	32768.	.536870912E9	
		0.0	180.0000000	0.0	-180.0000000	0.0	
B501C		-204124.1452899	408248.29057971	-23647.14805	54218.88612144	.11038476947E11	.10651042073E11
		353553.3906936	120.0000000	48790.367915717	115.8580006	.799381387931E9	0.0000004
	18TYP3	-32768.	32768.	23647.14805	54218.88612144	-.38743487365E9	
		0.0	180.0000000	-48790.36791572	-64.1419994	-.79938138793E9	
B501C		-204124.1452899	408248.29057971	28169.13205	56338.2641	-.1150000001E11	-.1150000001E11
		353553.3906936	120.0000000	-48790.36791572	-60.0000000	-.4060566425E-6	-0.0000004
	TERRA	0.0	0.0	-28169.13205	56338.2641	0.0	0.0
		0.0	0.0	48790.367915717	120.0000000	0.0	0.0
TERRA		0.0	0.0	-4521.984	4521.984	0.0	-.74088185856E8
		0.0	0.0	0.0	180.0000000	0.0	0.0
	18TYP3	-32768.	32768.	4521.984	4521.984	-.74088185856E8	
		0.0	180.0000000	0.0	0.0	0.0	

FONTEC	-28169.13205 48790.367915717	56338.2641 120.0000000	-4598.86795 -48790.36791572	49006.62799839 -95.3846594	-.1125476941E10 -.79938138793E9	-.1200824794E10 0.0
18TYP3	-32768. 0.0	32768. 180.0000000	4598.86795 48790.367915717	49006.62799839 84.6153406	-.75347852493E8 .799381387931E9	
FONTEC	-28169.13205 48790.367915717	56338.2641 120.0000000	-28169.13205 48790.367915717	56338.2641 120.0000000	.15870000009E10 0.0	.15870000009E10 0.0
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	28169.13205 -48790.36791572	56338.2641 -60.00000000	0.0 0.0	
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP4	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B138A	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP4	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B138A	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP4	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B502A	482793.01874123 -4757.220271556	482816.45590222 -0.5645480	-482793.0187412 4757.2202715564	482816.45590222 179.4354520	-.116555865E12 0.0	-.116555865E12 0.0
18TYP4	0.0 0.0	0.0 0.0	482793.01874123 -4757.220271556	482816.45590222 -0.5645480	0.0 0.0	
B502A	482793.01874123 -4757.220271556	482816.45590222 -0.5645480	482793.01874123 -4757.220271556	482816.45590222 -0.5645480	.11655586504E12 0.0	.11655586504E12 0.0
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	-482793.0187412 4757.2202715564	482816.45590222 179.4354520	0.0 0.0	
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP5	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B138B	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP5	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B138B	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP5	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B502B	-245516.3829772 -415732.4088639	482816.45590222 -120.5645480	245516.38297718 415732.4088639	482816.45590222 59.4354520	-.116555865E12 0.0	-.116555865E12 0.0
18TYP5	0.0 0.0	0.0 0.0	-245516.3829772 -415732.4088639	482816.45590222 -120.5645480	0.0 0.0	
B502B	-245516.3829772 -415732.4088639	482816.45590222 -120.5645480	-245516.3829772 -415732.4088639	482816.45590222 -120.5645480	.11655586504E12 0.0	.11655586504E12 0.0
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	245516.38297718 415732.4088639	482816.45590222 59.4354520	0.0 0.0	
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP6	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B138C	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP6	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B138C	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
TERRA	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
18TYP6	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
B502C	-237276.635764 420489.62913546	482816.45590222 119.4354520	237276.63576405 -420489.6291355	482816.45590222 -60.5645480	-.116555865E12 0.0	-.116555865E12 0.0

```

18TYP6          0.0          0.0          -237276.635764  482816.45590222          0.0
                0.0          0.0          420489.62913546  119.4354520          0.0
B502C          -237276.635764  482816.45590222  -237276.635764  482816.45590222  .11655586504E12  .11655586504E12
                420489.62913546  119.4354520  420489.62913546  119.4354520          0.0          0.0
TERRA          0.0          0.0          237276.63576405  482816.45590222          0.0
                0.0          0.0          -420489.6291355  -60.5645480          0.0
Total network loss P-loss by summing injections = 3.587157203027E+06

```

```

Output for steady-state phasor switch currents.
Node-K Node-M I-real I-imag I-magn Degrees Power Reactive
B501A X0005A 0.00000000E+00 1.09718372E+03 1.09718372E+03 90.0000 -3.50897899E-09 -2.23961688E+08
B501B X0005B 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.0000 0.00000000E+00 0.00000000E+00
B501C X0005C -4.52198400E+03 0.00000000E+00 4.52198400E+03 -180.0000 4.61523060E+08 -7.99381388E+08
X0006A B502A -1.83612144E-14 1.07691633E-13 1.09245696E-13 99.6758 -4.68848949E-09 -2.59527102E-08
X0006B B502B -1.38555833E-13 -1.07913678E-13 1.75621983E-13 -142.0869 3.94404702E-08 1.55537873E-08
X0006C B502C -7.32747196E-14 -3.65263375E-14 8.18740366E-14 -153.5044 1.01371642E-09 -1.97390531E-08
B138A X0001A Open Open Open Open Open
B138B X0001B Open Open Open Open Open
B138C X0001C Open Open Open Open Open
B138A X0002A Open Open Open Open Open
B138B X0002B Open Open Open Open Open
B138C X0002C Open Open Open Open Open
B138A X0003A Open Open Open Open Open
B138B X0003B Open Open Open Open Open
B138C X0003C Open Open Open Open Open
B138A X0004A Open Open Open Open Open
B138B X0004B Open Open Open Open Open
B138C X0004C Open Open Open Open Open

```

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MVA" is $\sqrt{P^2 + Q^2}$ in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

Node name	Source Rectangular	node voltage Polar	Injected Rectangular	source current Polar	Injected source P and Q	power MVA and P.F.
FONTEA	56338.2641 0.0	56338.2641 0.0	7950.6066393648 7950.6066393648	0.0 90.0000000	0.0 -.2239616883E9	.223961688302E9 0.0
FONTEB	-28169.13205 -48790.36791572	56338.2641 -120.0000000	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
FONTEC	-28169.13205 48790.367915717	56338.2641 120.0000000	-32768. 0.0	32768. 180.0000000	.461523059507E9 -.79938138793E9	.923046119014E9 0.50000000

```

+++ Node "B502C " has no connected linear branches. Add (to ground) the conductance G = 1.00000000E-08 mhos.
+++ Node "B502B " has no connected linear branches. Add (to ground) the conductance G = 1.00000000E-08 mhos.
+++ Node "B502A " has no connected linear branches. Add (to ground) the conductance G = 1.00000000E-08 mhos.
Card of names for time-step loop output. | B502A B502B B502C FONTEA FONTEB FONTEC B501A B501B B501C B138A B138B B138C
Blank card ending requests for output variables. |BLANK OUTPUT

```

Column headings for the 24 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ...

```

First 12 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Next 6 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
Next 6 output variables belong to MODELS (with "MODELS" an internally-added upper name of pair).
Step Time B502A B502B B502C FONTEA FONTEB FONTEC B501A B501B B501C B138A
      B138B B138C B501A B501B B501C X0006A X0006B X0006C MODELS MODELS
      X0005A X0005B X0005C B502A B502B B502C RMS02A RMS02B
      MODELS MODELS MODELS MODELS
      RMS02C RMS01A RMS01B RMS01C

```

```

*** Phasor I (0) = 0.0000000E+00 Switch "B501A " to "X0005A" closed in the steady-state.
*** Phasor I (0) = 0.0000000E+00 Switch "B501B " to "X0005B" closed in the steady-state.
*** Phasor I (0) = -4.5219840E+03 Switch "B501C " to "X0005C" closed in the steady-state.
*** Phasor I (0) = -1.8361214E-14 Switch "X0006A" to "B502A " closed in the steady-state.
*** Phasor I (0) = -1.3855583E-13 Switch "X0006B" to "B502B " closed in the steady-state.
*** Phasor I (0) = -7.3274720E-14 Switch "X0006C" to "B502C " closed in the steady-state.
0 0.0 482793.019 -245516.38 -237276.64 56338.2641 -28169.132 -28169.132 408248.291 -204124.15 -204124.15 0.0
    0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 -4521.984 -1836E-13 -1.1386E-12 -.7327E-13 0.0 0.0
    0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*** Close switch "B138A " to "X0001A" after 1.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138B " to "X0001B" after 1.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138C " to "X0001C" after 1.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138A " to "X0002A" after 2.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138B " to "X0002B" after 2.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138C " to "X0002C" after 2.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138A " to "X0003A" after 3.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138B " to "X0003B" after 3.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138C " to "X0003C" after 3.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138A " to "X0004A" after 4.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138B " to "X0004B" after 4.00000000E-01 sec.
*** Close switch "B138C " to "X0004C" after 4.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138A " to "X0001A" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0001B" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138C " to "X0001C" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138A " to "X0002A" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0002B" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138C " to "X0002C" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138A " to "X0003A" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0003B" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138C " to "X0003C" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138A " to "X0004A" after 5.00000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0004B" after 5.00000000E-01 sec.
500 0.5 357686.35 -299785.61 -57900.745 56338.2641 -28169.132 -28169.132 408248.291 -204124.15 -204124.15 98721.1167
    -82740.562 -15980.554 1117.95399 -416.91114 -701.04285 943.927152 -1151.258 207.330855 469597.367 471380.125
    469861.181 500098.714 500969.772 498929.585
*** Open switch "B138B " to "X0001B" after 5.01000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0002B" after 5.01000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0003B" after 5.01000000E-01 sec.
*** Open switch "B138B " to "X0004B" after 5.01000000E-01 sec.
% % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
600 0.6 602551.507 -317654.72 -199807.07 56338.2641 -28169.132 -28169.132 408248.291 -204124.15 -204124.15 166303.684
    -87672.423 -55146.575 377.151206 616.888385 -1163.5723 .006025515 -0.00317655 -.00199807 610812.837 588993.982
    586529.67 500098.714 500969.772 498929.585

```

```

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 791816.309 753789.964 600527.847 56338.2641 56288.8459 56288.8459 408248.291 407890.187 407890.187 218540.602
                  208045.364 165745.155 2048.92927 1815.23958 1542.27567 1225.03376 1227.24239 1227.07956 822348.93 747599.742
                  670604.499 501180.318 501174.136 501178.23
Times of maxima : .517 .506 .528 0.0 .039 .561 0.0 .039 .561 .517
                  .506 .528 .529 .518 .506 .452 .424 .463 .518 .522

```

	.519	.527	.441	.563								
Variable minima :	-738635.43	-706929.79	-601672.48	-56338.264	-56288.846	-56288.846	-408248.29	-407890.19	-407890.19	-203862.73		
	-195112.	-166061.07	-2238.3289	-1759.2678	-4521.984	-1242.0911	-1226.9735	-1227.0793	0.0	0.0		
	0.0	0.0	0.0	0.0								
Times of minima :	.541	.531	.504	.025	.014	.586	.175	.014	.586	.541		
	.531	.504	.504	.508	0.0	.41	.449	.488	0.0	0.0		
	0.0	0.0	0.0	0.0								

Blank card terminating all plot cards.

|BLANK PLOT

Memory storage figures for the preceding, now-completed data case. ----- Present Program
A value of "-9999" indicates that no figure is available. 05-Jun-18 21:06:12 figure limit (name)

Size List 1.	Number of electric network nodes.	31	6000	(LBUS)
Size List 2.	Number of electric network branches.	57	10000	(LBRNCH)
Size List 3.	Number of data values in R, L, C tables.	60	192000	(LDATA)
Size List 4.	Number of electric network sources.	15	900	(LEXCT)
Size List 5.	Storage for [Y] and triangularized [Y]. No. times = 7 Factors = 69	126	420000	(LYMAT)
Size List 6.	Number of entries in switch table. No. flops = 30	18	1200	(LSWTCH)
Size List 7.	Number of distinct ALPHANUMERIC data names plus program SPY variables.	54	15000	(LSIZE7)
Size List 8.	History points of distributed lines.	0	120000	(LPAST)
Size List 9.	Number of nonlinear elements.	0	2250	(LNONL)
Size List 10.	Points of nonlinear characteristics.	0	3800	(LCHAR)
Size List 11.	Number of Type-59 S.M. outputs.	0	720	(LSMOUT)
Size List 12.	Total number of EMTP output variables.	24	2000	(LSIZ12)
Size List 13.	Working space for batch/SPY plotting.	-9999	72800	(LSIZ13)
Size List 14.	S.M./U.M. connections to TACS.	-9999	510	(LBSTAC)
Size List 15.	Character storage in bytes for MODELS.	2754	800000	(LCTACS)
Size List 16.	Total number of Type-59 S.M. masses.	0	800	(LTMASS)
Size List 17.	Number of Type-59 Synchronous machines.	0	90	(LSYN)
Size List 18.	Branch and switch power/energy outputs.	0	254	(MAXPE)
Size List 19.	Total floating-point TACS table space.	23	800000	(LTACST)
Size List 20.	Non-copied recursive convolution data plus SEEK of MODELS.	0	100000	(LFSSEM)
Size List 21.	Total modal/phase [T] matrix storage.	0	3000	(LFD)
Size List 22.	Total recursive convolution history.	0	15000	(LHIST)
Size List 23.	Giant vectors for renumbering, phasors; also extrema accumulation.	81	192000	(LSIZ23)
Size List 24.	Peak phases of compensation for data.	0	120	(LCOMP)
Size List 25.	Total table space for all U.M usage.	-9999	45000	(LSPCUM)
Size List 26.	Square of max number of coupled phases.	9	260000	(LSIZ26)
Size List 27.	Maximum number of MODELS top variables.	18	600	(LSIZ27)
Size List 28.	MODELS. Total work space is divided into INTEGER and REAL. 1st, REAL: Second and last, statistics for INTEGER work space.	2137	210000	(LRTACS)
		5947	0	(LITACS)
Size List 29.	RAM disk used by "TAPSAV" table saving (limit is "LABCOM" size LTLABL).	-9999	1100	(LSIZ29)
Size List 30.	Taku Noda frequency-dependent circuits.	0	19	(LSIZ30)

Timing figures characterizing central processor (CP) solution speed. ----- CP sec Wait sec Real sec
Data input time (through blank card ending branches) 0.016 0.000 0.016
Node renumbering and phasor solution 0.016 0.000 0.016
After phasor solution, but before time-step loop 0.000 0.000 0.000
Integration of equations (time-step loop) 0.016 0.000 0.016
Plotting or STATISTICS termination overlays 0.000 0.000 0.000

Totals 0.047 0.000 0.047