

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Gustavo Bittencourt

**Estudo da Compensação Reativa e das Manobras de Religamento Monopolar em Linhas
de Transmissão**

Florianópolis
2021

Gustavo Bittencourt

**Estudo da Compensação Reativa e das Manobras de Religamento Monopolar em Linhas
de Transmissão.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito
para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.
Orientador: Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph D.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração
Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bittencourt, Gustavo
Estudo da Compensação Reativa e das Manobras de
Religamento Monopolar em Linhas de Transmissão / Gustavo
Bittencourt ; orientador, Mauro Augusto da Rosa, 2021.
127 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Linhas de Transmissão. 3.
Compensação Reativa. 4. Manobras de Religamento. I. Rosa,
Mauro Augusto da. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Gustavo Bittencourt

**Estudo da Compensação Reativa e das Manobras de Religamento Monopolar em Linhas
de Transmissão**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica.

Florianópolis 21 de maio de 2021.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Avaliadora:

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Gabriel Santos Bolacell, Me.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao G.A.D.U.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Antônio e Cristina por toda a dedicação, carinho e cuidados durante os 5 anos de graduação, o que possibilitou força e perseverança para vencer os desafios impostos pelo curso, à minha irmã Juliana, pela companhia e paciência durante esses anos desafiadores, e aos meus avós e tios, pois sempre estiveram presentes.

Agradeço aos meus colegas de graduação pelo apoio em todos os momentos necessários, o que possibilitou estudar sempre em boa companhia, e aos meus irmãos e amigos, por todos os momentos de aprendizado e confraternizações vividos ao longo desses anos.

Agradeço também aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina que me ensinaram de forma exemplar todo o conteúdo curricular, conhecimento que será levado para toda a vida, e aos demais funcionários da universidade, que possibilitaram um ambiente adequado para o aprendizado.

Na execução desse trabalho de conclusão de curso agradeço em particular ao professor Mauro pela orientação e à Eng.^a Julia Nunes por toda a ajuda através de ajustes, correções e sugestões no trabalho.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \left(\sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

Carl Friedrich Gauss; André Marie Ampère;
Michael Faraday; Emil Lenz; James Clerk
Maxwell; Oliver Heaviside. Século XIX.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma revisão teórica de um sistema de transmissão de energia clássico, em que se aprofunda dois conceitos: o de compensação reativa de linhas de transmissão e o de manobras de religamento. A teoria revisada é composta por análises matemáticas e modelagens de circuitos de linhas de transmissão de longo comprimento. O sistema estudado pode ser modelado matematicamente através de equações diferenciais que representam ondas eletromagnéticas, essas equações podem ser modeladas através de quadripolos e com isso apresentam um circuito elétrico equivalente. A compensação reativa visa equilibrar a potência reativa gerada ou absorvida na linha, almeja-se a estabilidade do sistema através da manutenção das tensões e correntes dentro de limites aceitáveis. Quando a linha de transmissão está alimentando cargas pesadas - potência ativa acima da potência característica - absorve potência reativa em excesso do sistema, com isso, elementos capacitivos devem ser acoplados para equilibrar o sistema. Quando a linha de transmissão está alimentando cargas leves – potência ativa abaixo da potência característica – fornece potência reativa em excesso ao sistema, elementos indutivos devem, então, ser acoplados ao sistema. Há dois esquemas possíveis de ligação desses dispositivos: em série ou em derivação. As manobras de religamento são importantes para corrigir falhas na transmissão de energia, quando algum evento externo causa uma perturbação no sistema deve ser realizada a interrupção do fornecimento das fases em falta e, após a correção, deve ser realizado o religamento. Verifica-se que faltas são majoritariamente monofásicas em linhas de transmissão. Quando o religamento é tripolar, as três fases do sistema são desligadas, o que não permite o fornecimento de energia à carga. Quando a manobra é monopolar, apenas a fase que sofreu a falta é desligada, então duas fases ainda alimentam a carga. Nota-se que a manobra monopolar tem vantagem em relação à tripolar, mas para que ela seja realizável é necessária a mitigação do arco secundário, fenômeno que ocorre devido ao acoplamento eletromagnético das fases em normal funcionamento. Para verificar essas teorias implementa-se em simulação uma linha de 500 kV e 300 km. Observa-se que essa linha, longa e de alta tensão, está sujeita aos fenômenos explicados, verifica-se a necessidade de compensação reativa, em carga leve e pesada, e a necessidade de implementar métodos de extinção do arco secundário, para possibilitar a manobra monopolar. Para compensar a linha em situação de carga pesada utilizam-se capacitores em série, que resultam em melhoria no carregamento da linha, reduzindo a queda de tensão. Para compensar a linha em situação de carga leve utilizam-se reatores em derivação, que resultam em redução da elevação de tensão. Para permitir a manobra monopolar utiliza-se o reator de neutro acoplado à compensação em derivação dimensionada, que resulta na provável extinção do arco secundário.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão. Compensação Reativa. Manobras de Religamento.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to carry out a theoretical review of a classic energy transmission system, delving into two concepts: reactive transmission line compensation and reclosing maneuvers. The revised theory consists of mathematical analysis and modeling of long-distance transmission line circuits. The studied system can be modeled mathematically by means of differential equations that represent electromagnetic waves, these equations can be modeled by quadripoles and with that they present an equivalent electrical circuit. Reactive compensation aims to balance the reactive power generated or absorbed in the line, seeking at system stability by maintaining voltages and currents within acceptable limits. When the transmission line is feeding heavy loads - active power above surge impedance loading - it absorbs excess reactive power from the system, therefore, capacitive elements must be coupled to balance the system. When the transmission line is feeding light loads - active power below surge impedance loading - it supplies excess reactive power to the system, inductive elements must then be coupled to the system. There are two possible schemes to connect these devices: in series or in shunt. Reclosing maneuvers are important to correct failures in the transmission of energy, when an external event causes an outbreak in the system, the supply of the missing phases must be interrupted and, after correction, reclosing must be performed. It appears that faults are mostly single-phase in transmission lines. When the reclosure is three-pole, the three phases of the system are switched off, which does not allow the supply of energy to the load. When the maneuver is monopolar, only the missing phase is turned off, so two phases still supply the load. It is identified that the monopolar maneuver has an advantage over the three-pole one, but for it to be possible, it is necessary to mitigate the secondary arc, a phenomenon that occurs due to the electromagnetic coupling of the phases in normal operation. To verify these theories, a 500 kV and 300 km line is implemented in simulation. It is observed that this line, long and high voltage, is subject to the phenomena explained, there is a need for reactive compensation, under light and heavy load, and the need to implement methods of extinction of the secondary arc, to enable the monopolar maneuver. To compensate the line under heavy load, series capacitors are used, which result in improved line loading, reducing the voltage drop. To compensate the line under a light load situation, shunt reactors are used, which result in reduced voltage rise. To allow the monopolar maneuver, the neutral reactor coupled to the dimensioned derivation compensation is used, which results in the probable extinction of the secondary arc.

Keywords: Transmission Lines. Reactive Compensation. Reclosing Maneuvers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas de Transmissão do SIN	15
Figura 2 – Esquemático Geral de um Sistema de Transmissão.	25
Figura 3 – Modelo Teórico para uma Distância Δx de Linha.	26
Figura 4 – Modelo Teórico Completo para uma Distância Δx de Linha.	30
Figura 5 – Modelo Geral de Quadripolo.	34
Figura 6 – Circuito Equivalente (π) da LT.	35
Figura 7 – Relações de Potência na LT.	38
Figura 8 – Curvas de Potência Reativa em Função da Potência Ativa na LT.....	42
Figura 9 – Compensação Série Capacitiva.	45
Figura 10 – Compensação Série Indutiva.....	46
Figura 11 – Compensação em Derivação Capacitiva.....	47
Figura 12 – Compensação em Derivação Indutiva.	48
Figura 13 – Associação em Cascata de Quadripolos, CR e LT.	49
Figura 14 – Procedimento Geral para Definir a Compensação Reativa.....	50
Figura 15 – Levantamento do ONS para Causas de Perturbações em LTs.....	58
Figura 16 – Esquemático de Religamento Trifásico de Disjuntores da LT.	60
Figura 17 – Esquemático de Religamento Monofásico de Disjuntores na LT.....	62
Figura 18 – Zona de Provável Extinção do Arco Secundário.	63
Figura 19 – Reator de Quatro Pernas	64
Figura 20 – Torre da LT.....	66
Figura 21 – Configuração de Dados do Módulo LCC da LT.....	67
Figura 22 – Configuração do Módulo LCC da LT.....	67
Figura 23 – Modelagem da LT.....	68
Figura 24 – Tensão no TR da LT sob Carga Pesada.	70
Figura 25 – Potência 3f no TR da LT sob Carga Pesada.	71
Figura 26 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Pesada.....	71
Figura 27 – Tensão no TE da LT sob Carga Pesada.	71
Figura 28 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Pesada.....	72
Figura 29 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Pesada.....	72
Figura 30 – Modelagem da LT com Compensação Série Capacitiva.	74
Figura 31 – Tensão no TR da LT sob Carga Pesada Compensada.	74

Figura 32 – Potência 3f no TR da LT sob Carga Pesada Compensada.....	74
Figura 33 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Pesada Compensada.....	75
Figura 34 – Tensão no TE da LT sob Carga Pesada Compensada.....	75
Figura 35 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Pesada Compensada.....	75
Figura 36 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Pesada Compensada	76
Figura 37 – Tensão no TR da LT sob Carga Leve.....	78
Figura 38 – Potência 3f no TR da LT Longa sob Carga Leve.	78
Figura 39 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Leve.....	78
Figura 40 – Tensão no TE da LT sob Carga Leve.	79
Figura 41 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Leve.....	79
Figura 42 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Leve.	79
Figura 43 – Modelagem da LT Longa com Compensação Shunt Indutiva.....	81
Figura 44 – Tensão no TR da LT sob Carga Leve Compensada.	81
Figura 45 – Potência 3f no TR da LT sob Carga Leve Compensada.....	81
Figura 46 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Leve Compensada.	82
Figura 47 – Tensão no TE da LT sob Carga Leve Compensada.....	82
Figura 48 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Leve Compensada.	82
Figura 49 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Leve Compensada.	83
Figura 50 – Circuito da LT Para Manobra Monofásica.	84
Figura 51 – Corrente de Falta da LT.	84
Figura 52 – Corrente RMS de Falta da LT.....	85
Figura 53 – Corrente de Arco Secundário da LT.	85
Figura 54 – Corrente de Arco Secundário RMS da LT.....	85
Figura 55 – Circuito de Manobra da LT Compensada.	86
Figura 56 – Corrente de Falta da LT Compensada	86
Figura 57 – Corrente RMS de Falta da LT Compensada	87
Figura 58 – Corrente de Arco Secundário da LT Compensada.	87
Figura 59 – Corrente de Arco Secundário RMS da LT Compensada	87
Figura 60 – Circuito de Manobra da LT Compensada e Com RN.....	88
Figura 61 – Corrente de Falta da LT Compensada e RN	88
Figura 62 – Corrente RMS de Falta da LT Compensada e RN.....	89
Figura 63 – Corrente de Arco Secundário da LT Compensada e RN.	89
Figura 64 – Corrente de Arco Secundário RMS da LT Compensada e RN.....	89

Figura 65 – Corrente de Arco Secundário RMS na LT com RN 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN	21
Tabela 2 – Valores Típicos de Impedância e Potência Característica.....	40
Tabela 3 – Estatísticas de Faltas em LTs.	59
Tabela 4 – Características da Manobra de Religamento Trifásica.	61
Tabela 5 – Características da Manobra de Religamento Monofásica.	62
Tabela 6 – Características dos Condutores da LT.....	66
Tabela 7 – Parâmetros Obtidos Através do Módulo LCC da LT.....	67
Tabela 8 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Pesada.	70
Tabela 9 – Comparação de Variáveis na LT sob Carga Pesada.	72
Tabela 10 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Pesada Compensada.	73
Tabela 11 – Comparação de Variáveis na LT sob Carga Pesada Compensada.	76
Tabela 12 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Leve.	77
Tabela 13 – Comparação de Variáveis na LT sob Carga Leve.	80
Tabela 14 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Leve Compensada.	80
Tabela 15 – Comparação de Variáveis na LT sob Carga Leve Compensada.	83
Tabela 16 – Corrente de Arco Secundário RMS na LT com RN	90
Tabela 17 – Tensão de Linha no TE na Situação de Carga Pesada.....	91
Tabela 18 – Fator de Potência no TE na Situação de Carga Pesada	91
Tabela 19 – Erros Relativos na Situação de Carga Pesada.	92
Tabela 20 – Tensão de Linha no TE na Situação de Carga Leve.....	93
Tabela 21 – Fator de Potência no TE na Situação de Carga Leve	93
Tabela 22 – Erros Relativos na Situação de Carga Leve.	93
Tabela 23 – Corrente de Arco Secundário na Manobra Monopolar	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico
LT Linha de Transmissão
SIN Sistema Interligado Nacional
ATP *Alternative Transients Program* (Programa Alternativo de Transitórios)
FRV Fontes Renováveis
EPE Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica
HVDC *High Voltage Direct Current* (Linhas de Alta Tensão de Corrente Contínua)
SIL *Surge Impedance Loading* (Potência Característica da Linha de Transmissão)
SEP Sistema Elétrico de Potência
CR Compensação Reativa
FACTS *Flexible AC Transmission System* (Sistema de Transmissão Alternado Flexível)
TCSC *Thyristor Controlled Series Capacitor* (Capacitor Série Controlado por Tiristor)
TSSC *Thyristor Switched Series Capacitor* (Capacitor Série Comutado Tiristor)
TSC *Thyristor Switched Capacitor* (Capacitor Comutado por Tiristor)
TSR *Thyristor Switched Reactor* (Reator Comutado por Tiristor)
TCR *Thyristor-Controlled Reactor* (Reator Controlado por Tiristor)
SVC *Static VAR Compensator* (Compensador Reativo Estático)
EAT Extra Alta Tensão
TRV *Transient Recovery Voltage* (Tensão de Restabelecimento Transitória)
LCC Módulo de Linhas de Transmissão do ATP
CC Corrente Contínua
RMS *Root Mean Square* (Raiz do Valor Médio ao Quadrado)
3f Trifásico
1f Monofásico
TR Terminal Receptor
TE Terminal Emissor
RN Reator de Neutro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	MOTIVAÇÃO.....	18
1.2.1	Fontes de Geração e a Transmissão de Energia	18
1.2.2	Expansão do Sistema de Transmissão Brasileiro	20
1.3	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1	O FENÔMENO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	25
2.2	MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	30
2.3	MODELOS DE QUADRIPOLO PARA CÁLCULOS SIMPLIFICADOS.....	33
2.4	RELAÇÕES DE POTÊNCIA NA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	36
2.4.1	Potência Complexa	37
2.4.2	Fluxo de Potência na Linha	38
2.4.3	Potência Característica da Linha	39
2.5	MODELAGEM TRIFÁSICA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	40
3	COMPENSAÇÃO REATIVA	41
3.1	COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA	41
3.1.1	Compensação Série.....	44
3.1.1.1	<i>Compensação Série Capacitiva.....</i>	44
3.1.1.2	<i>Compensação Série Indutiva</i>	46
3.1.2	Compensação em Derivação	47
3.1.2.1	<i>Compensação em Derivação Capacitiva.....</i>	47
3.1.2.2	<i>Compensação em Derivação Indutiva.....</i>	48

3.2	MODELAGEM POR QUADRIPOLOS	48
3.2.1.1	<i>Modelo de Quadripolo de Compensação em Série</i>	49
3.2.1.2	<i>Modelo de Quadripolo de Compensação em Derivação.....</i>	50
3.3	PROCEDIMENTOS PARA COMPENSAÇÃO.....	50
3.3.1	Esquema de Ligação	51
3.3.2	Montante.....	51
3.3.2.1	<i>Montante da Compensação Série</i>	52
3.3.2.2	<i>Montante da Compensação em Derivação.....</i>	53
3.3.3	Localização	53
3.3.4	Tipo e Controle	54
3.3.4.1	<i>Máquinas Síncronas</i>	54
3.3.4.2	<i>Bancos de Capacitores e Reatores Fixos</i>	55
3.3.4.3	<i>Compensadores Controlados por Eletrônica de Potência</i>	55
3.3.5	Demais Procedimentos	56
4	MANOBRAS DE RELIGAMENTO	57
4.1	FALTAS NA LINHA DE TRANSMISSÃO	57
4.1.1	Arco Primário	59
4.1.2	Arco Secundário.....	60
4.2	MANOBRAS DE RELIGAMENTO TRIPOLAR	60
4.3	MANOBRAS DE RELIGAMENTO MONOPOLAR	61
4.4	EXTINÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO	62
4.4.1	Rreator de Neutro.....	64
5	SIMULAÇÕES	65
5.1	SIMULAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	65
5.1.1	Carga Pesada.....	69
5.1.1.1	<i>Carga Pesada sem Compensação</i>	69
5.1.1.2	<i>Carga Pesada com Compensação</i>	73

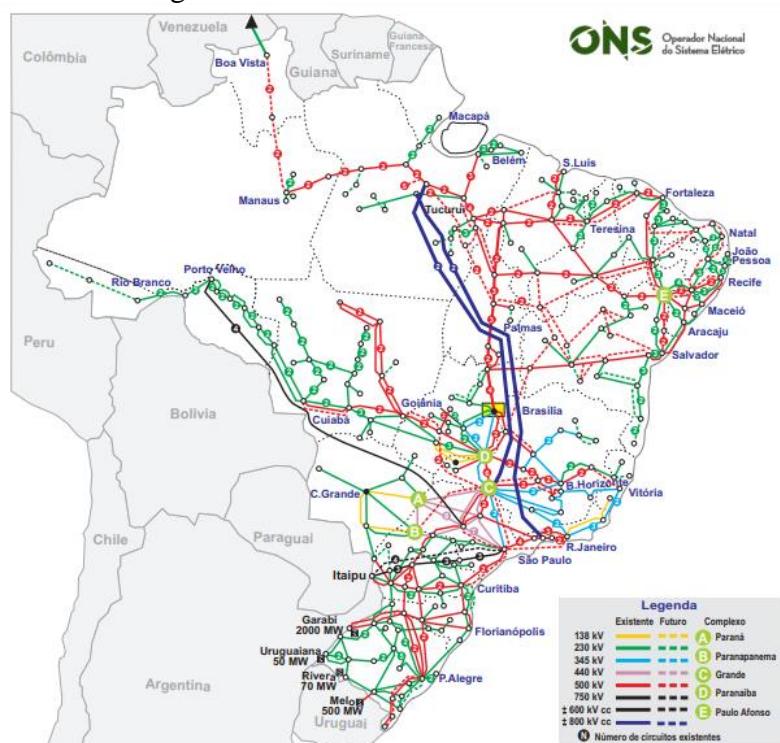
5.1.2	Carga Leve	76
5.1.2.1	<i>Carga Leve sem Compensação.....</i>	77
5.1.2.2	<i>Carga Leve com Compensação</i>	80
5.1.3	Manobra	83
5.1.3.1	<i>Manobra sem Compensação.....</i>	84
5.1.3.2	<i>Manobra com Compensação</i>	86
5.1.3.3	<i>Manobra com Compensação e com Reator de Neutro.....</i>	88
5.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	90
5.2.1	Resultados da Modelagem da Linha de Transmissão	90
5.2.2	Resultados com Carga Pesada.....	91
5.2.3	Resultados com Carga Leve.....	92
5.2.4	Resultados com Manobra.....	94
6	CONCLUSÃO.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	APÊNDICE A – Módulos dos Medidores do ATP	101
	APÊNDICE B – Programas de Cálculo.....	107
	ANEXO A – Modelos de Quadripolos	113

1 INTRODUÇÃO

Por volta de 1884/1885 foi inventado o transformador, tal tecnologia permitiu elevar e abaixar a tensão com funcionamento em corrente alternada e ótimo rendimento, isso possibilitou o transporte de energia elétrica em tensões elevadas, condição com menores perdas. O sistema que transporta a energia elétrica em tensões mais elevadas é denominado sistema de transmissão. A evolução de sistemas de transmissão é consequência do crescimento da demanda de energia elétrica e da extensão dos sistemas de energia. Tal evolução nos últimos anos resultou em tensões cada vez maiores e linhas cada vez mais longas. Por volta de 1903 eram projetadas linhas de 60 kV, já entre 1964-1965 as primeiras linhas de 735 kV entravam em operação (FUCHS, 1977).

No Brasil, conforme diretrizes do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a rede básica de transmissão compreende as tensões entre 230 kV a 750 kV e tem como principal função a transmissão da energia gerada pelas usinas aos centros de consumo, de modo a interligar o sistema, garantindo confiabilidade e estabilidade à rede. A Figura 1 mostra as linhas de transmissão (LTs) do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro.

Figura 1 – Linhas de Transmissão do SIN.



Fonte: ONS (2021).

As linhas de transmissão incorporam um equilíbrio complexo e eficaz entre custos financeiros, transporte de energia, desempenho elétrico, mecânico e civil e impactos ambientais. Não seria surpreendente afirmar que tais sistemas agrupados são considerados a maior estrutura construída pela humanidade (EPRI, 2005).

Alto rendimento na linha, desempenho elétrico, mecânico e civil de excelência e a ausência de problemas ambientais são difíceis de serem alcançados a um custo financeiro aceitável às sociedades, dessa forma cabe ao engenheiro encontrar soluções que permitam a otimização desse sistema a um custo reduzido.

Ao estudar a teoria de transmissão de energia elétrica é observado uma série de fenômenos eletromagnéticos compreendidos pelo engenheiro eletricista, tais fenômenos, se corretamente interpretados, permitem ao profissional adotar procedimentos que visam a melhoria do rendimento do sistema, seja para a construção de um sistema novo, seja para a otimização de um sistema já existente.

Compensar reativamente uma linha de transmissão permite aumentar a capacidade do sistema, ou seja, o grau de potência que pode ser transmitido por uma linha em função do seu comprimento, ou até mesmo reduzir perdas e manter a estabilidade do sistema. Existem dois tipos básicos de compensação exigidos por um sistema como consequência dos requisitos de potência reativa: compensação série, composta por elementos capacitivos conectados em série com a LT e compensação em derivação, composta por elementos indutivos ou capacitivos ligados em derivação com a LT (CIGRE, 2017) (GLOVER et al., 2017).

Um sistema de transmissão está sujeito também a falhas. Perturbações em um sistema de transmissão podem ser originadas por diversos tipos de fenômenos, de natureza térmica e de isolamento, fatores climáticos ou erros humanos na operação do sistema. Tais interrupções do suprimento na operação prejudicam a estabilidade do sistema e devem ser mitigadas. Essas interrupções podem ser do tipo monofásicas-terra, bifásicas, bifásicas-terra ou trifásicas. Faltas monofásicas são mais prováveis nos sistemas (KINDERMANN, 1997).

Manobras de religamento permitem o desligamento momentâneo das fases em falta de uma LT, podem envolver as três fases simultaneamente (manobra trifásica ou tripolar) ou uma única fase (manobra monofásica ou monopolar). A manobra monopolar leva vantagem em relação à tripolar quando ocorrem faltas monofásicas na LT, pois permite a operação das fases não atingidas durante a falha. Entretanto, para que seja possível tal manobra em linhas longas de alta tensão, é necessária a mitigação do arco secundário (ZEVALLOS, 2013).

1.1 OBJETIVOS

Objetiva-se como finalidade principal realizar uma revisão teórica de um sistema de transmissão de energia clássico, dentro disso aprofunda-se dois conceitos: o de compensação reativa de linhas de transmissão e o de manobras de religamento. Além disso, pretende-se realizar simulações em regime permanente e transitório de uma LT nas condições estudadas.

1.1.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral visa-se revisitar a bibliografia já vista na graduação a respeito de sistemas de energia, com foco na transmissão de energia, e então consolidar esse conhecimento com uma fundamentação teórica bem difundida a respeito do assunto, com ênfase nas teorias de compensação reativa e manobras de religamento.

A teoria de transmissão é explicada a partir de modelos matemáticos, modelos de quadripolos, modelos de circuitos e relações de potência, através de um equivalente monofásico de um sistema de transmissão, com breve abordagem trifásica.

A teoria de compensação reativa compara os casos de atendimento de cargas leve e pesada, em função da potência característica, apresentando os modelos de quadripolos e os critérios e procedimentos.

A teoria de manobras de religamento aborda as faltas em sistemas de transmissão, compara as manobras tripolares e monopolares e apresenta um método para extinção do arco secundário, o acoplamento de reatores de neutro.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivo específico, destaca-se a simulação de uma LT transmissão longa em classe de tensão amplamente usada em território nacional. Para ser possível realizar tal simulação pretende-se também realizar os cálculos em *software* de programação.

Para a simulação planeja-se utilizar o ATP, *software* que permite a elaboração de circuitos com módulos específicos de linhas de transmissão. O módulo LCC na configuração JMarti permite simular a linha estudada, dessa forma é escolhido para as simulações.

Para os cálculos complementares visa-se a utilização do *software* Scilab, ferramenta de programação científica, completa e eficiente. Nesse ambiente é pretendida a implementação dos modelos matemáticos estudados, através da teoria de quadripolos.

De maneira geral visa-se comparar os resultados entre o que foi simulado e o que foi calculado, além disso, ressalta-se a verificação dos resultados com os critérios nacionalmente e internacionalmente aceitos para esse sistema.

1.2 MOTIVAÇÃO

É notório o crescimento do consumo de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro e nos demais sistemas mundiais, o barateamento de tecnologias ligadas à rede elétrica correlacionado com o crescimento populacional, demanda que novas fontes sejam incorporadas ao sistema. Todavia o sistema de geração que um dia era predominantemente hidrotérmico ganha a cada ano mais fontes de geração alternativas.

O que motivou a realização desse trabalho de conclusão de curso foi observar que independente das fontes utilizadas para geração de energia elétrica, a construção de sistemas de transmissão de energia é necessária e, principalmente, que cada vez mais sistemas desse tipo são implementados no Brasil e nos demais países.

1.2.1 Fontes de Geração e a Transmissão de Energia

A fusão nuclear é um processo físico em que dois átomos se juntam e formam um átomo de tamanho maior, para que esse processo ocorra é necessária uma grande quantidade de energia e se a reação for suficientemente grande a quantidade de energia liberada é muito maior que a energia consumida.

Um exemplo conhecido de fusão nuclear é o Sol, a estrela funde átomos de hidrogênio ininterruptamente, suas variações dão origem ao átomo de Hélio. As novas reações surgem devido à energia liberada de reações anteriores e dessa forma o processo libera em nosso sistema uma quantidade de energia muito maior que a consumida na reação.

Essa energia que chega ao planeta Terra é vital para sobrevivência da espécie humana, após ultrapassar a atmosfera do planeta, evapora quantidades de água, aquece massas de ar, ilumina a superfície e atua na fotossíntese das plantas, entre tantos outros fenômenos.

A energia que foi absorvida na fotossíntese fica armazenada nas ligações de carbono e é transferida aos demais seres vivos, após a morte os restos de vida soterrados nas profundezas do planeta ainda dispõem dessa energia, sob a forma de carvão, petróleo e gás natural. As massas de ar aquecidas entram em movimento. A água evaporada gera chuvas, que ao precipitar enche reservatórios. A energia luminosa fica disponível em abundância durante dias a céu aberto. O uso da eletricidade permite transportar essa energia da captação na fonte até o consumo, podendo ser em longas distâncias ou em curtas distâncias.

No cenário dos últimos séculos foi possível converter energia em eletricidade a partir da rotação de geradores síncronos: através da combustão de combustíveis fósseis, em termoelétricas; através da energia potencial da água acumulada nas represas, em hidroelétricas; ou até mesmo em um processo que não depende da energia já existente no sistema, convertendo a massa em energia, através de reações de fissão nuclear, em usinas nucleares. Nessas fontes a geração é distante do consumo, desse modo o transporte dessa energia é realizado através de sistemas de transmissão, que possibilitam o transporte de grandes quantidades de energia em longas distâncias, ao custo de perdas no processo.

Como nem todos os locais dispõem de recursos hídricos e como a fissão nuclear gera lixo radioativo, os combustíveis fósseis marcaram os últimos séculos. Dispor de baterias prontas na natureza que para ativá-las basta uma pequena faísca possibilitou avanços sociais e tecnológicos que seriam inimagináveis na ausência dessas fontes. O custo, entretanto, foi a poluição de diversas regiões, comprometendo a saúde de muitos e gerando efeitos ainda não compreendidos totalmente na atmosfera.

Nas últimas décadas buscou-se diminuir a emissão de gases poluentes e o uso de fontes alternativas foi incentivado. Eólicas e fotovoltaicas, por exemplo, captam a energia disponível e permitem, além da geração centralizada (em um local com grande disponibilidade de recursos), a geração distribuída (em que a energia pode ser convertida em eletricidade diretamente no local de consumo). Nessas fontes a transmissão é necessária quando a geração é centralizada ou quando é distribuída, pois um centro consumidor pode transferir o excedente para outra cidade próxima.

Pensando ainda em uma solução sustentável para geração de energia elétrica, outra tecnologia proveniente de reações nucleares é estudada, a usina de fusão nuclear. Tal usina realizaria o mesmo processo que ocorre no Sol (sem lixo radioativo) e com isso seria capaz de gerar grande quantidade de energia, todavia para que a quantidade gerada seja maior que a consumida é necessária a construção de um sistema de grande porte. Pensando em um horizonte

de 25 até 40 anos no futuro é possível que tecnologias de fusão nuclear atinjam patamares suficientes para gerar mais energia do que consomem em seu funcionamento, com custo de implementação reduzido. Projetos como o ITER estão em fase final de construção neste momento e servirão como base para projetos futuros que podem funcionar como usinas de fusão nuclear (ITER, 2021). Pelo caráter centralizado e consideravelmente caro dessa fonte de geração, seria necessário construir um sistema de transmissão que permitisse levar a grande quantidade de energia gerada a todos os locais de consumo. As distâncias das linhas de transmissão desse sistema seriam muito longas e as classes de tensão bastante elevadas.

Existem outras fontes de geração além das supracitadas, mas ao se observar o que foi relatado constata-se que independente da fonte de geração utilizada é necessário um sistema de transmissão para transporte da energia gerada. Tal necessidade pode ser reduzida com o avanço de baterias, mas a tendência para os próximos anos é de um aumento significativo nas instalações de transmissão a nível mundial, cenário equivalente no Brasil.

1.2.2 Expansão do Sistema de Transmissão Brasileiro

No Brasil, conforme o estudo Integração de Fontes Variáveis de Energia Renovável na Matriz Energética Brasileira (ENGIE et al., 2019):

“Uma forte expansão do sistema de transmissão (cerca de +23% em relação à rede existente e planejada até 2026) é necessária para garantir a operação segura, confiável e estável do SIN como consequência do forte crescimento da demanda e da inserção massiva de fontes renováveis (FRV). Esta expansão também permite que grandes volumes de energia sejam transferidos entre as regiões, explorando complementaridades espaciais de fontes do mesmo tipo (hidrelétricas) e de diferentes fontes (complementaridade entre eólica e hidrelétrica).”

Conforme o Plano Decenal da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), a evolução física e investimentos dos sistemas de transmissão no período 2017-2026 referentes às instalações da Rede Básica das linhas de transmissão (km) são dados na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN.

Tensão (kV)	±800	750	±600	500	440	345	230	TOTAL
km								
Existente 2016	0	2.683	12.816	46.569	6.748	10.320	55.820	134.956
Evolução 2017-2026	12.078	0	0	30.737	439	1.337	17.293	61.884
Estimativa 2026	12.078	2.683	12.816	77.306	7.187	11.657	73.113	196.840
%								
Existente 2016	0,0%	2,0%	9,5%	34,5%	5,0%	7,6%	41,4%	100,0%
Evolução 2017-2026	19,5%	0,0%	0,0%	49,7%	0,7%	2,2%	27,9%	100,0%
Estimativa 2026	6,1%	1,4%	6,5%	39,3%	3,7%	5,9%	37,1%	100,0%

Fonte: EPE (2016) - adaptado.

Pensando em um cenário além de 2026, acredita-se em um crescimento ainda maior da demanda por energia elétrica no Brasil e com isso o crescimento das redes de transmissão. Países desenvolvidos estão realizando a transição de veículos a combustão para veículos elétricos, além de diversas outras tecnologias novas mais sustentáveis. Em breve isso será uma realidade brasileira e com isso a demanda tenderá a aumentar. Para suprir essas demandas as fontes renováveis citadas anteriormente devem ser adotadas, sejam as já utilizadas, como eólicas, fotovoltaicas ou a biomassa, sejam futuras como a fusão nuclear, que embora possam demorar muito tempo, virão a ser realidade um dia no país.

Dadas as mudanças recentes do SIN atreladas ao crescimento do sistema de transmissão brasileiro, necessário até 2026 e dado que possivelmente o crescimento e as mudanças devem se intensificar nos anos seguintes a 2026, julga-se adequado o estudo a ser realizado nesse trabalho, pois as linhas que serão construídas no Brasil nos próximos anos utilizarão a teoria estudada e as linhas do futuro provavelmente terão tecnologias semelhantes.

1.3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

O livro da referência FUCHS (1977), Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas, focado na teoria de transmissão de energia elétrica, é uma obra brasileira e bastante completa. Nesse livro é abordada não apenas a teoria de transmissão, mas também tem parte voltada para o dimensionamento de linhas aéreas. Os capítulos desse livro são estruturados de forma que primeiramente introduz o conceito de transmissão de energia, então aborda o dimensionamento desses sistemas, segue com a teoria de transmissão e, por fim, a teoria da operação desses

sistemas, assim com ampla abordagem do tema contempla bem os tópicos deste trabalho de conclusão de curso.

O livro da referência GLOVER et al. (2017), *Power System Analysis and Design*, é em língua inglesa e é focado em sistemas de energia elétrica, aborda a teoria de transmissão e demais teorias relacionadas a sistema de energia, a forma como a teoria de transmissão é construída é semelhante à referência anterior e tem grande validade nos tópicos estudados nesse trabalho.

O livro da referência CIGRE (2017), *Overhead Lines*, tem foco no dimensionamento de diversos tipos de linhas de transmissão existentes em diversos países, com isso, revisa também parte da teoria de transmissão, de modo a introduzir o dimensionamento desses sistemas. Esse livro é de língua inglesa, pertence à coleção CIGRE *Green Books*, coleção que concentra todo o estado da arte existente até o momento no tema específico, então é muito completo e engloba muito mais que o que será tratado neste trabalho, porém parte da obra terá validade como estado da arte do TCC.

Da mesma forma o livro *AC Transmission Line Reference Book – 200kV and Above*, referência EPRI (2005), é bastante completo e em língua inglesa. Esse livro também é focado no dimensionamento de linhas de transmissão, tanto o dimensionamento elétrico quanto o mecânico, e para isso revisa parte dos conceitos da teoria de transmissão de energia que é de interesse bibliográfico deste trabalho de conclusão de curso.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), dispõem de documentos com critérios e procedimentos voltados às linhas de transmissão de energia. Como esses órgãos são referência no Brasil, tais documentos serão também de benefício bibliográfico. Destaca-se aqui os procedimentos de rede, submódulo 2.7 - requisitos mínimos para linhas de transmissão -, disponível em (ONS, 2021).

A compensação reativa e as manobras de religamento são bem exploradas nas dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos citados nas referências, em conformidade com as normas brasileiras e internacionais, são também de interesse bibliográfico para o trabalho.

Entre esses documentos, destaca-se o trabalho de VALE et al. (2003), que mostra critérios e procedimentos para compensação reativa e controle de tensão e o trabalho de ZEVALLOS (2013) que compara as manobras monopolares e tripolares, apresentando a

otimização das linhas de transmissão para as aberturas monopolares e explorando bem o conceito de reator de neutro.

Observa-se a partir dessas referências que o estado da arte se encontra bem difundido. Nas referências mais antigas percebe-se os sistemas de transmissão atrelados exclusivamente às fontes tradicionais hidrotérmicas e sem grandes aplicações de eletrônica de potência, já as referências mais modernas tratam dos sistemas novos que vêm sendo utilizados nos últimos anos, abrangendo a relação com as fontes distribuídas e o uso de eletrônica de potência, como linhas que transmitem energia em corrente contínua (HVDC).

Como abordado nos objetivos deste trabalho, o escopo é apenas para sistemas clássicos de transmissão de energia, cujo funcionamento é em corrente alternada, como tais sistemas são amplamente utilizados e continuarão sendo nos próximos anos, todo o estado da arte supracitado trata com maior importância tais sistemas tradicionais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de simular computacionalmente e entender os fenômenos por trás da compensação reativa de linhas de transmissão e manobras de religamento, fundamenta-se a teoria de transmissão de energia elétrica partindo de seus fenômenos físicos básicos, passando por sua modelagem matemática, descrevendo seus modelos elétricos e por fim analisando as relações de potência.

Sabe-se que em sistemas de potência as linhas de transmissão operam com tensões e correntes alternadas trifásicas, balanceadas e com frequência podendo ser 50 Hz ou 60 Hz. Isso ocorre, pois, a maior parte dos geradores são geradores síncronos, que produzem tensões defasadas de 120° e alimentam três condutores que podem estar ligados em estrela (Y) ou em delta (Δ). Cada uma dessas 3 ramificações é chamada de fase. Como o sistema é dimensionado para a condição de balanceamento entre as fases (na maior parte do tempo), quando se analisa algum fenômeno é possível separá-lo em um modelo monofásico, e assim as tensões e correntes nas demais fases são equivalentes, apenas defasadas de 120° (GLOVER et al., 2017).

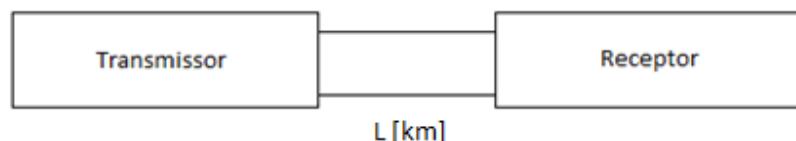
Nos tópicos seguintes será estudado o equivalente monofásico de um sistema de transmissão de energia elétrica.

2.1 O FENÔMENO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para que se possa entender matematicamente os fenômenos que ocorrem em linhas de transmissão de energia de um sistema de alta potência, se aborda previamente uma análise qualitativa de uma linha comum ligada a um transmissor em uma extremidade e a um receptor na outra. A Figura 2 ilustra o esquemático do sistema.

Esse sistema em escala de alta potência é equivalente a uma central geradora alimentando uma carga, mas nesta análise trataremos como uma fonte de tensão alimentando uma carga puramente resistiva, separada por uma distância variável L [km] (Figura 2).

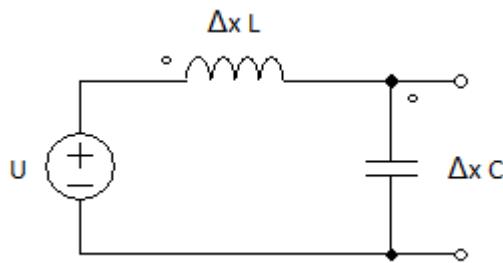
Figura 2 – Esquemático Geral de um Sistema de Transmissão.



Fonte: Autor (2021).

Sabe-se que quando dois condutores alimentam uma carga e estão separados por uma certa distância, há o surgimento de fenômenos elétricos e magnéticos no sistema. O campo elétrico que surge entre os condutores é representado por uma capacitância C [Farad/km], e o campo magnético que surge nos condutores é representado por uma indutância L [Henry/km], (FUCHS, 1977). Esse sistema, para uma distância infinitesimal Δx , é representado através do circuito da Figura 3.

Figura 3 – Modelo Teórico para uma Distância Δx de Linha.



Fonte: Autor (2021).

Estuda-se então como ocorre o carregamento desta linha, ou seja, o que acontece quando a fonte de tensão é ligada em uma das extremidades da linha.

Sabe-se que a distância é o produto da velocidade pelo tempo e nesta análise será considerada uma distância de 1 km de linha (Equação (2.1)). Durante o carregamento a carga elétrica acumulada nesse trecho é dada pelo produto da tensão pela capacitância (Equação (2.2)). A corrente é o produto da carga pela velocidade (Equação (2.3)).

$$l = v \cdot T \text{ [km]} \quad (2.1)$$

$$q = U \cdot C \text{ [Coulomb]} \quad (2.2)$$

$$I_0 = q \cdot v \text{ [A]} \quad (2.3)$$

Aplicando a Equação (2.2) na Equação (2.3), obtém-se a corrente de carregamento em função da tensão, capacitância e velocidade, na Equação (2.4). Observa-se então que a corrente que surge no processo de carregamento da linha está sujeita a uma tensão, então existe uma impedância de entrada na linha, descrita pela Equação (2.5).

$$I_0 = U \cdot C \cdot v [A] \quad (2.4)$$

$$Z_0 = \frac{U}{I_0} [\Omega] \quad (2.5)$$

Aplicando a Equação (2.4) na Equação (2.5) chega-se na Equação (2.6) que representa a impedância de entrada em função dos fenômenos elétricos.

$$Z_0 = \frac{1}{C \cdot v} [\Omega] \quad (2.6)$$

Sabe-se também que a corrente de carregamento parte de zero até atingir o pico máximo, ao completar o carregamento, logo existe variação do efeito da indutância (Equação (2.7)). Assim como explícito na Equação (2.1) a distância é produto da velocidade pelo tempo, com a variação dada na Equação (2.8).

$$U = -\Delta x \cdot L \cdot \frac{dI_0}{dt} [V] \quad (2.7)$$

$$\Delta x = \Delta t \cdot v [km] \quad (2.8)$$

Aplicando a Equação (2.8) na Equação (2.7), chega-se à tensão que neutraliza a tensão da fonte em função da velocidade, indutância e corrente de carregamento (Equação (2.9)).

$$U = v \cdot L \cdot I_0 [V] \quad (2.9)$$

Então a partir da Equação (2.9) em conjunto com a Equação (2.5), chega-se na impedância de entrada, dada pela Equação (2.10), vista sob a influência do campo magnético que é representado pela indutância.

$$Z_0 = L \cdot v [\Omega] \quad (2.10)$$

Igualando as equações (2.6) e (2.10), ambas representando a impedância de entrada da linha, chega-se na Equação (2.11), que representa a velocidade de propagação dos campos elétricos e magnéticos ao longo da linha.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \text{ [km/s]} \quad (2.11)$$

Ou seja, a velocidade de propagação dos campos ao longo de uma linha de transmissão é função apenas da indutância e capacidade da linha, valores estes que são obtidos dependendo das características do cabeamento utilizado e distância entre condutores. Em condições ideais essa velocidade é a velocidade da luz no vácuo, valor que diminui um pouco em condições reais (FUCHS, 1977).

Além disso, observa-se também que igualando as velocidades nas Equações (2.6) e (2.10), encontra-se a impedância de entrada, também chamada impedância característica, da linha em função da indutância e capacidade (Equação (2.12)).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ [\Omega]} \quad (2.12)$$

Isso mostra que a velocidade e a impedância de entrada independem do comprimento da linha, apenas dependem de características físicas do equipamento utilizado (FUCHS, 1977).

Percebe-se que tanto a tensão quanto a corrente se comportam como ondas viajantes ao longo da linha, com velocidade específica. Dessa forma, quando uma dessas ondas atinge a extremidade oposta da linha, ela pode ser refletida, dependendo da carga terminal acoplada nessa extremidade e sua relação com a impedância característica (FUCHS, 1977).

Para entender essa possível reflexão toma-se a impedância da carga como a soma das tensões direta e refletida dividida pela soma das correntes direta e refletida (Equação (2.13)). A corrente direta é então dada pela Equação (2.14) e a corrente refletida pela Equação (2.15).

$$Z_2 = \frac{U_d + U_r}{I_d + I_r} \text{ [\Omega]} \quad (2.13)$$

$$I_d = \frac{U_d}{Z_0} [\text{A}] \quad (2.14)$$

$$I_r = \frac{U_r}{Z_0} [\text{A}] \quad (2.15)$$

Dadas as Equações (2.13), (2.14) e (2.15) chega-se nas Equações (2.16) e (2.17), que representam a tensão e a corrente refletida, respectivamente.

$$U_r = \left(\frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} \right) \cdot U_d [\text{V}] \quad (2.16)$$

$$I_r = \left(\frac{Z_0 - Z_2}{Z_2 + Z_0} \right) \cdot I_d [\text{A}] \quad (2.17)$$

Essas equações mostram que para impedâncias terminais diferentes da impedância característica da linha ocorre reflexão com ou sem inversão, dependendo apenas de um fator k_U ou k_I dado pela relação entre as impedâncias. Esse fator, tanto para corrente quanto para tensão varia entre -1 e 1 (FUCHS, 1977).

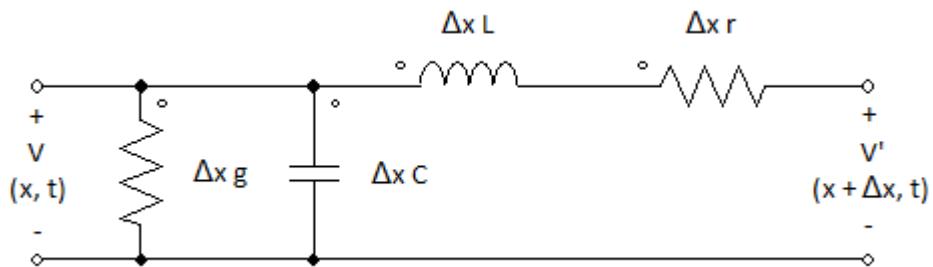
Outro ponto interessante no fenômeno de reflexão das ondas é que esse processo não ocorre apenas após o carregamento e com reflexão exclusiva no terminal da carga. Depois de sofrer a primeira reflexão no terminal da carga as ondas que viajam de volta podem também sofrer reflexão no terminal da fonte, isso ocorre em fontes não ideais devido à impedância ali existente (FUCHS, 1977).

Até então detalhou-se os procedimentos físicos que ocorrem em Linhas de Transmissão (LT), de tal forma que foi possível entender como ocorre o carregamento dessas linhas e como esse processo se propaga ao longo da linha. Foi afirmado que essa propagação é na forma de ondas eletromagnéticas, concluiu-se isso através da equação de velocidade dos fenômenos estudados. Todavia, para verificar se a propagação desses fenômenos se assemelha a equações de ondas é necessário analisar matematicamente o modelo de linha.

2.2 MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Assim como no modelo visto na Figura 3, toma-se um trecho infinitesimal de linha de comprimento Δx . Como o processo será mais detalhado, além de considerar a indutância e a capacitância por trecho da linha, L e C, respectivamente, inclui-se as perdas no condutor e no dielétrico, representados por r e g, respectivamente. O modelo de linha a ser analisado é dado na Figura 4.

Figura 4 – Modelo Teórico Completo para uma Distância Δx de Linha.



Fonte: Autor (2021).

Observa-se que os elementos associados aos condutores, a indutância e a resistência, causam queda de tensão ao longo do comprimento da linha, ou seja, há uma variação negativa de tensão dentro da parcela de comprimento analisada (Equação (2.18)).

$$\frac{-\partial V}{\partial x} = r \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.18)$$

Da mesma forma, os elementos associados ao dielétrico, a capacitância e a condutância, causam desvio de corrente ao longo do comprimento da linha, ou seja, há uma variação negativa de corrente dentro da parcela de comprimento analisada (Equação (2.19)).

$$\frac{-\partial i}{\partial x} = g \cdot V + C \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.19)$$

Para resolver as Equações (2.18) e (2.19) como realizado em (FUCHS, 1977) diferencia-se ambas em relação a x, em um primeiro momento, e então em relação a t, em um segundo momento. Relaciona-se os termos semelhantes e chega-se nas Equações (2.20) e (2.21).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = r \cdot g \cdot V + (r \cdot C + L \cdot g) \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + L \cdot C \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = r \cdot g \cdot i + (r \cdot C + L \cdot g) \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + L \cdot C \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

Essas equações são as equações gerais de linhas de transmissão. Equações desse tipo são conhecidas como equações de ondas, pois a solução representa ondas que podem viajar ao longo da linha, ondas viajantes ou progressivas (FUCHS, 1977) (GLOVER et al., 2017).

Para encontrar a solução dessas equações diferenciais, utiliza-se o domínio da frequência, considerando sinais senoidais e de baixa frequência, característicos do sistema elétrico. Dessa forma as tensões e correntes das Equações (2.20) e (2.21) são tomadas como fasores, e com a devida manipulação algébrica chega-se nas Equações (2.22) e (2.23). Ressalta-se que os termos em negrito são fasores.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial x^2} \cdot (r + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (g + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \mathbf{V} = \mathbf{z} \cdot \mathbf{y} \cdot \mathbf{V} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{I}}{\partial x^2} \cdot (r + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (g + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \mathbf{I} = \mathbf{z} \cdot \mathbf{y} \cdot \mathbf{I} \quad (2.23)$$

As variáveis de ambas as equações são então \mathbf{V} , \mathbf{I} e x . Percebe-se que a solução dessas equações é do tipo exponencial, com forma dada na Equação (2.24).

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}_1 \cdot e^{x\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}} - \mathbf{A}_2 \cdot e^{-x\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}} \quad [V] \quad (2.24)$$

Conforme deduzido em (FUCHS, 1977) e (GLOVER et al., 2017), derivando adequadamente as equações e aplicando as devidas condições de contorno, pode-se encontrar os valores de \mathbf{A}_1 e \mathbf{A}_2 . A solução é então dada nas Equações (2.25) e (2.26), onde \mathbf{V}_2 e \mathbf{I}_2 são os fasores de tensão e corrente na saída da linha, respectivamente.

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{V}_2 + \mathbf{I}_2 \cdot \sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}}{2} \cdot e^{x\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}} - \frac{\mathbf{V}_2 - \mathbf{I}_2 \cdot \sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}}{2} \cdot e^{-x\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}} \quad [V] \quad (2.25)$$

$$I = \frac{V_2 + I_2 \cdot \sqrt{z/y}}{2 \cdot \sqrt{z/y}} \cdot e^{x\sqrt{zy}} - \frac{V_2 - I_2 \cdot \sqrt{z/y}}{2 \cdot \sqrt{z/y}} \cdot e^{-x\sqrt{zy}} \text{ [A]} \quad (2.26)$$

Verifica-se nessas soluções que a tensão e a corrente se relacionam por um fator $\sqrt{z/y}$. Esse elemento é a impedância característica da linha (Equação (2.27)).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{(r + j \cdot \omega \cdot L)}{(g + j \cdot \omega \cdot C)}} \text{ [\Omega]} \quad (2.27)$$

Desconsiderando as perdas nos condutores e no dielétrico, a impedância característica se torna a mesma que analisada qualitativamente, conforme Equação (2.12). Como já visto essa impedância é o que define os fenômenos de reflexão das ondas.

Outro ponto interessante para ser observado nas equações (2.25) e (2.26) é a parcela exponencial. Considerando que x multiplica o fator $\sqrt{z \cdot y}$, é atribuída uma variável para esse fator, conforme Equação (2.28).

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} = \sqrt{(r + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (g + j \cdot \omega \cdot C)} \quad (2.28)$$

O expoente γ é denominado função de propagação, pois dita a forma como se propagam ao longo da linha as tensões e correntes. A função também é conhecida como constante de propagação, pois é realmente uma constante nas linhas de transmissão de energia elétrica em regime permanente, com frequência constante. (FUCHS, 1977).

Observa-se que o fator γ consiste em um fasor complexo que possui parte real e parte imaginária. Essas componentes são separadas nas Equações (2.29) e (2.30).

$$\alpha = \operatorname{Re}\{\gamma\} \therefore \alpha = \frac{1}{2} [(r \cdot g - \omega^2 \cdot L \cdot C + \sqrt{(r^2 + \omega^2 \cdot L^2) \cdot (g^2 + \omega^2 \cdot C^2)}) \text{ [néper/km]} \quad (2.29)$$

$$\beta = \operatorname{Im}\{\gamma\} \therefore \beta = \frac{1}{2} [(\omega^2 \cdot L \cdot C - r \cdot g) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 \cdot L^2) \cdot (g^2 + \omega^2 \cdot C^2)} \text{ [rad/km]} \quad (2.30)$$

Como o fator γ se encontra como múltiplo da variável expoente x , da parcela exponencial, sua parte real (α) causa atenuação nas senoides de tensão e corrente, com o aumento da distância, já a parte imaginária (β) causa desfasagem nas senoides.

A componente α é denominada constante de atenuação, tem unidade de medida néper/km e está diretamente relacionada às perdas de energia na resistência e na condutância da linha. Já a componente β é denominada constante de fase, tem unidade de medida rad/km e está diretamente relacionada à variação de fase das tensões e das correntes (FUCHS, 1977).

Até então foi explicado como ocorre o processo de carregamento de uma Linha de Transmissão (LT), como esse fenômeno se propaga e quais são as equações que regem esse sistema. Percebe-se que as equações obtidas contemplam os fenômenos elétricos e magnéticos que ocorrem ao longo da LT e que através delas é possível obter a tensão e corrente em qualquer ponto da linha.

Todavia, essas equações exigem uma complexidade matemática para solução. Dessa forma, para situações práticas, seja para cálculos rápidos, seja para programas em sistemas computacionais, é mais adequado modelar esse sistema através de modelos de quadripolos.

2.3 MODELOS DE QUADRIPOLO PARA CÁLCULOS SIMPLIFICADOS

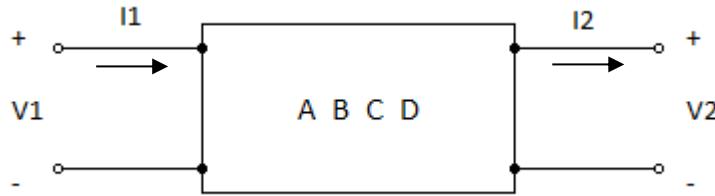
Modelar as equações de propagação de ondas eletromagnéticas através de quadripolos permite simplificar o cálculo sob o ponto de vista computacional, isso permite ao operador calcular as variáveis da LT em qualquer ponto do sistema balanceado através dos parâmetros da LT e medições ou estimativas realizadas.

Quando se fala em quadripolos, deve-se lembrar que se trata de um sistema com 2 terminais de entrada e 2 terminais de saída. Caracterizar um quadripolo requer que se estabeleça uma relação entre as quantidades V_1 , V_2 , I_1 e I_2 de um circuito de duas portas. É interessante modelar circuitos dessa forma, pois podem ser ligados em série, em paralelo ou em cascata, e através dessas associações os cálculos são simplificados (SADIKU, 2013). Utiliza-se o modelo de quadripolo dado nas Equações (2.31) e (2.32), ilustrado na Figura 5.

$$V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2 [V] \quad (2.31)$$

$$I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2 [A] \quad (2.32)$$

Figura 5 – Modelo Geral de Quadripolo.



Fonte: Autor (2021)

Quando o sistema é modelado dessa forma é possível utilizar notações matriciais para representação, tal qual é utilizado em cálculos através de programas computacionais. A Equação (2.33) representa o modelo.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

O objetivo então é encontrar quais as variáveis **A**, **B**, **C** e **D**; que equivalem ao sistema estudado matematicamente. Para isso, reescreve-se as soluções das equações gerais da LT, (Equações (2.25) e (2.26)), deduzidas previamente da forma dada nas Equações (2.34) e (2.35).

$$V_1 = V_2 \cdot \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \right) + I_2 \cdot Z_0 \cdot \left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \right) [V] \quad (2.34)$$

$$I_1 = I_2 \cdot \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \right) + \frac{V_2}{Z_0} \cdot \left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \right) [A] \quad (2.35)$$

Observa-se que há funções hiperbólicas nessas equações, então, simplifica-se ainda mais as equações gerais da LT, conforme Equações (2.36) e (2.37).

$$V_1 = V_2 \cdot \cosh(\sqrt{Z \cdot Y}) + I_2 \cdot Z_0 \cdot \sinh(\sqrt{Z \cdot Y}) [V] \quad (2.36)$$

$$I_1 = I_2 \cdot \cosh(\sqrt{Z \cdot Y}) + \frac{V_2}{Z_0} \cdot \sinh(\sqrt{Z \cdot Y}) [A] \quad (2.37)$$

Os parâmetros Z e Y representam, respectivamente, a impedância e a admitância para todo o comprimento de linha entre os terminais emissor e receptor, pontos 1 e 2, respectivamente.

Utiliza-se neste momento as Equações (2.36) e (2.37) frente a Equação (2.33), de forma a ser possível determinar os parâmetros A , B , C e D . A notação matricial de um sistema de transmissão é então dada pela Equação (2.38).

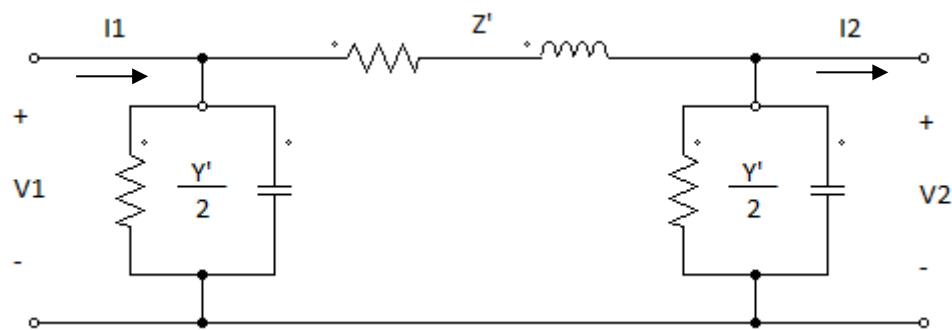
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\sqrt{Z \cdot Y}) & Z_0 \cdot \operatorname{senh}(\sqrt{Z \cdot Y}) \\ \operatorname{senh}(\sqrt{Z \cdot Y}) & \cosh(\sqrt{Z \cdot Y}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Com esse modelo, conhecendo os parâmetros da LT em um ponto 2 da linha, é possível, de forma prática, encontrar os fasores de tensão e corrente em um determinado ponto 1 da linha. Importante lembrar que é levado em consideração a atenuação e o desvio de fase.

Em aplicações que requerem ainda mais simplicidade no cálculo, é possível expandir em série de Taylor as funções hiperbólicas, de modo que sejam obtidos modelos de quadripolo que utilizem apenas os primeiros termos da série. Esses modelos simplificados são suficientes quando as LT são mais curtas e possuem mais baixa tensão. (FUCHS, 1977).

Outra forma de representar essas equações é através de um circuito equivalente, para isso utiliza-se como ponto de partida um circuito em formato π , conforme Figura 6.

Figura 6 – Circuito Equivalente (π) da LT.



Fonte: Autor (2021).

Constata-se que o modelo de quadripolo de um circuito nessa forma é dado pela Equação (2.39), conforme Anexo A.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Y}'}{2}\right) & \mathbf{Z}' \\ \left(1 + \frac{\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Y}'}{4}\right) & \left(1 + \frac{\mathbf{Z}' \cdot \mathbf{Y}'}{2}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Igualando-se as Equações (2.38) e (2.39), encontra-se os parâmetros \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' do circuito equivalente, conforme Equações (2.40) e (2.41).

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z} \frac{\operatorname{senh}(\gamma l)}{\gamma l} [\Omega] \quad (2.40)$$

$$\frac{\mathbf{Y}'}{2} = \frac{\mathbf{Y}}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} [\text{S}] \quad (2.41)$$

Com isso é possível através do circuito da Figura 6, encontrar a tensão e a corrente em um dado ponto da linha, desde que as impedâncias e admitâncias sejam devidamente corrigidas para levar em consideração a atenuação e o desvio de fase causados pelos fenômenos elétricos e magnéticos, representados pela constante de propagação. Esses cálculos podem então ser realizados por programas computacionais, com uso de quadripolo para programação numérica ou com uso de circuito equivalente para simuladores de circuitos.

Até então foi visto como modelar o sistema de transmissão matematicamente e representá-lo através de quadripolos e circuitos, a seguir será visto como é dada as relações de potência nos modelos estudados até agora.

2.4 RELAÇÕES DE POTÊNCIA NA LINHA DE TRANSMISSÃO

Para entender as relações de potência em LTs, aborda-se a seguir conceitos de potência complexa, como se distribui o fluxo de potência na linha e uma importante definição, a potência característica da linha.

2.4.1 Potência Complexa

Em sistemas de potência, utiliza-se como base a potência complexa, pois nessa forma ela contém todas as informações relevantes da potência absorvida por uma carga. (SADIKU, 2013), conforme Equação (2.42).

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^* [VA] \quad (2.42)$$

A potência complexa, é um fasor que possuí módulo e fase (Equação (2.43)). Pode também ser representada em sua forma retangular (Equação (2.44)), nesse caso apresentando as partes real e imaginária.

$$\mathbf{S} = S\angle\theta [VA] \quad (2.43)$$

$$\mathbf{S} = P + jQ [VA] \quad (2.44)$$

No caso apresentado em módulo e fase, o módulo representa o valor da potência aparente em determinada barra do sistema, já a fase é entendida como o fator de potência naquele ponto.

Quando essa potência complexa é separada em partes real e imaginária, a parte real P é a potência ativa do ponto analisado, cuja unidade de medida é dada em Watts, que representa a parcela de potência útil que pode ser liberada para uma carga. Já a parte imaginária Q é a potência reativa na barra, cuja unidade de medida é o var (volt-ampère reativo), que representa a troca de energia entre os campos elétricos e magnéticos do sistema, representados como efeitos capacitivos e indutivos, respectivamente. (SADIKU, 2013).

A parcela ativa de potência é então gerada nos geradores e consumida nas cargas resistivas. A potência reativa, por sua vez, não apresenta um fluxo definido, uma vez que seu sentido depende da natureza da carga, sendo que:

- a) $Q = 0$ em cargas resistivas;
- b) $Q < 0$ em cargas capacitivas;
- c) $Q > 0$ em cargas indutivas.

Teoricamente, é como se os capacitores gerassem a energia reativa, e os indutores consumissem, o que é apenas uma notação, pois na realidade ambos estão trocando energia entre si.

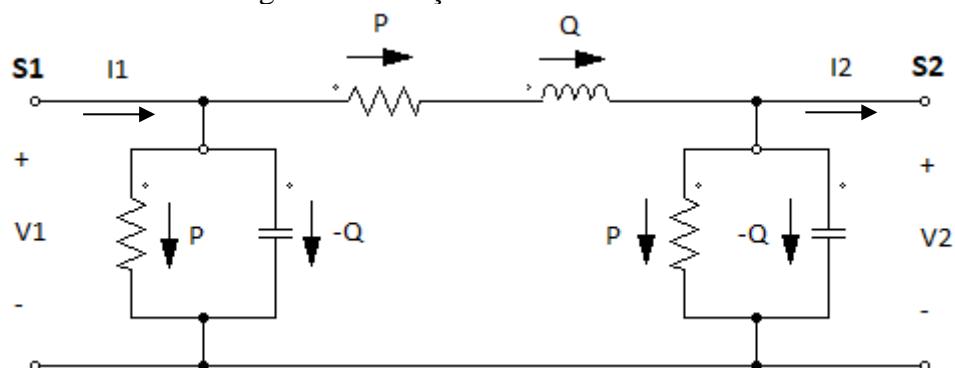
2.4.2 Fluxo de Potência na Linha

Conforme abordado em tópicos anteriores, ao longo da LT existe um efeito resistivo nos condutores e no dielétrico, elementos que geram perdas em termos de potência, na parcela referente à potência ativa.

Além disso, a potência injetada no terminal emissor da LT tem uma parte que reage com o campo elétrico formado no dielétrico entre os condutores e uma parte que reage com o campo magnético formado nos condutores. Essas parcelas são referentes à potência reativa.

Se utilizado o circuito equivalente da Figura 6, que representa o modelo de quadripolo obtido das equações características da LT, é possível observar como ocorrem essas relações de potência ao longo da LT (Figura 7). Vale ressaltar que esses parâmetros são simbólicos, pois como demonstrado, em cada elemento infinitesimal da linha ocorrem perdas ativas e troca reativa. O importante é que no modelo analisado as potências injetada e recebida têm valores equivalentes aos valores práticos.

Figura 7 – Relações de Potência na LT.



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 7 as flechas, em conformidade com o sentido da corrente, representam a dissipação ou absorção de potência nos respectivos elementos da linha, sendo possível observar que os resistores causam perda de potência ativa, o indutor absorve potência reativa e os capacitores fornecem potência reativa (por isso apresentam sinal negativo em Q).

Desse modo, a potência complexa total que entra na barra 1 (**S1**) é subtraída das respectivas potências apresentadas nos elementos e resulta na potência da barra 2 (**S2**).

2.4.3 Potência Característica da Linha

Existe uma definição para a potência natural da LT que é de fundamental importância para a técnica de transmissão de energia, a qual se dá o nome de *Surge Impedance Loading* (SIL) (GLOVER et al., 2017).

Essa medida de potência ativa, dada pela Equação (2.45), caracteriza a potência de uma linha, sendo dada pelo quociente do quadrado da tensão nominal pela impedância característica da linha, medida expressa na Equação (2.27).

$$SIL = \frac{V^2}{Z_0} [W] \quad (2.45)$$

A condição ideal para operação de uma LT ocorre quando a potência ativa transportada na linha é igual ao valor da SIL, com isso há máximo aproveitamento do sistema, evitando perdas (GLOVER et al., 2017).

Nessa condição de operação ideal, é como se não existisse energia reativa sendo gerada na linha e nem energia reativa sendo absorvida pela linha. Como sabemos que na prática há troca de energia reativa entre os elementos reativos, o valor gerado nos elementos capacitivos deve suprir a demanda dos elementos indutivos, de maneira que sob ponto de vista das barras a linha forneça apenas potência ativa.

Além disso, em situações práticas, a demanda conectada aos terminais da LT não corresponde à SIL da linha. Dependendo do equipamento, a carga pode variar durante períodos de carga leve até períodos de carga pesada, com isso a magnitude da tensão ao longo da LT é peculiar a cada tipo de carga. (GLOVER et al., 2017).

A Tabela 2 mostra alguns valores típicos de impedância característica e de potência característica, para valores de tensão nominal usados nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs).

Tabela 2 – Valores Típicos de Impedância e Potência Característica.

V (kV)	Zc (Ω)	SIL (MW)
69	366–400	12–13
138	366–405	47–52
230	365–395	134–145
345	280–366	325–425
500	233–294	850–1075
765	254–266	2200–2300

Fonte: EPRI (2005) - adaptado.

Constata-se pequena variação entre os valores de impedância característica apresentados na Tabela 2, isso ocorre pois existe semelhança entre as estruturas das LTs nas classes de tensão apresentadas. Já a potência característica varia consideravelmente, devido a variação da classe de tensão.

2.5 MODELAGEM TRIFÁSICA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

Para modelar as três fases de um sistema de transmissão de energia, é possível a utilização de quadripolos e circuitos trifásicos, entretanto a demonstração dessa teoria não foi escopo desse trabalho. Nesse modelo é possível observar efeitos de acoplamento eletromagnético entre as fases, semelhante ao retratado na abordagem monofásica supracitada.

Outro modelo interessante que utiliza uma modelagem trifásica é o modelo JMarti, foi objetivado sua utilização nas simulações. Nesse modelo, assim como na modelagem por quadripolos trifásicos, é considerado efeitos de acoplamento eletromagnético entre as fases em conjunto aos efeitos representados pelo equivalente monofásico.

Além disso, segundo Marti (1982), a correta modelagem de uma LT deve-se abranger toda a faixa de frequências dos sinais, visto que os parâmetros ligados a terra são consideravelmente dependentes da frequência. Essa característica de considerar ampla faixa de frequências é um diferencial nesse modelo.

Dada a representação considerando as três fases do sistema e toda a faixa de frequências, o modelo JMarti pode ser utilizado para cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de transmissão, como representação bastante equivalente de um sistema real.

Ressalta-se ainda que existem outros modelos trifásicos, porém não são de interesse direto desse trabalho, visto que o modelo JMarti se mostra suficiente.

3 COMPENSAÇÃO REATIVA

Na fundamentação teórica, verificou-se que em linhas de transmissão, além de perdas ativas, ocorre troca de energia reativa entre os campos elétricos formados nos dielétricos entre os condutores (no caso de LT aéreas o ar) e os campos magnéticos formados ao longo dos condutores (ao entorno da seção deles). Representados pela capacidade por comprimento de linha e pela indutância por comprimento de linha, respectivamente. Esses efeitos se intensificam em linhas longas.

Sabe-se que para maior rendimento e regulação da LT deve-se mitigar efeitos adversos que gerem perdas desnecessárias. Foi colocado anteriormente que transmitir a potência natural (SIL) é a forma de obter melhor aproveitamento do sistema.

Dado esses fatores e analisando as equações que regem o comportamento da LT para diferentes potências ativas transmitidas, observa-se que dependendo da quantidade de potência ativa entregue ao receptor, pode haver excesso de potência reativa sendo gerada ou absorvida pela linha.

Diante desse cenário, com objetivo de buscar uma operação adequada e com boa performance para o funcionamento do sistema, estuda-se como se compensar reativamente uma linha de transmissão longa.

3.1 COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

Em linhas de transmissão longas, dependendo da potência ativa recebida no terminal receptor, pode haver excesso de potência reativa gerada pela linha, ou excesso de potência reativa absorvida pela linha.

Analizando casos extremos, quando a LT opera a vazio, com um terminal sendo alimentado por um gerador e o outro com ausência de carga, não há corrente circulando pelos condutores, assim, não ocorre absorção reativa nos condutores e o sistema opera como um grande capacitor, fornecendo a potência reativa em excesso às barras. Contudo, avaliando o outro ponto de operação extremo, quando a LT opera com um de seus terminais curto circuitados, não existe mais tensão sobre os dielétricos, assim os condutores operam como um grande indutor, absorvendo mais potência reativa que necessário.

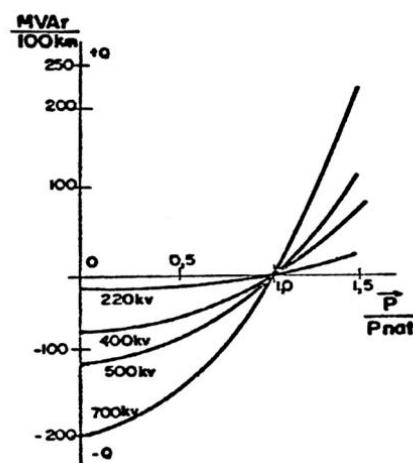
No cenário em que existe um excesso de potência reativa sendo gerada na LT, a potência complexa, medida em um terminal da linha, tem parcela imaginária negativa (-Q),

desse modo o fator de potência é capacitivo e tem valor menor que 1. Quanto maior for esse excesso de potência reativa gerada, menor será o valor do fator de potência.

Já no cenário em que existe uma escassez de potência reativa, visto que ocorre absorção nos reatores por parte do efeito indutivo da linha, o fator de potência também reduz, tanto quanto maior for essa parcela de potência reativa absorvida. Nesse caso a parcela imaginária da potência complexa medida em um dos terminais tem valor positivo (+Q).

Na Figura 8 verifica-se a geração e o consumo de potência reativa para cada 100 km de linha, em função da potência ativa em p.u (na base da potência natural (SIL)) que circula na linha. Cada uma das curvas representa uma tensão usual do sistema.

Figura 8 – Curvas de Potência Reativa em Função da Potência Ativa na LT.



Fonte: Fuchs (1977)

Observa-se que o único momento no qual a linha não necessita de fornecimento ou absorção de reativo adicional é quando ela está fornecendo a potência natural (SIL). Quando a linha opera com potência ativa menor que SIL, decorre que a linha está gerando reativo em excesso. Já quando a linha opera com potência ativa maior que a SIL, está absorvendo reativo em excesso. (RESENDE et al., 2013).

Existem então 2 situações:

a) $P < SIL$: LT com comportamento capacitivo, fornece reativo.

b) $P > SIL$: LT com comportamento indutivo, absorve reativo.

É interessante observar que, em alguns casos, durante o dia as linhas de transmissão suprem grandes quantidades de carga (elevada potência ativa), com isso, as linhas podem operar acima da SIL, absorvendo reativo em excesso do sistema. Já durante a noite a carga tende a diminuir, representando baixa potência ativa, podendo as linhas operarem abaixo da SIL, com fornecimento de reativo em excesso. Entretanto é possível que tal cenário seja diferente em caso de dias com pouca demanda ou até mesmo caso a LT esteja interligando regiões, em que mesmo com carga leve o carregamento da linha se mantém elevado.

Outro ponto interessante que se pode constatar a partir desse fenômeno é a variação de tensão na LT. Na situação (a), linha capacitiva, o fluxo de corrente para suprir os efeitos no dielétrico acarreta aumento de tensão na LT, fenômeno conhecido como efeito Ferranti. Na situação (b), linha indutiva, a corrente elevada que circula nos condutores resulta em queda de tensão na LT.

O fenômeno conhecido como efeito Ferranti é caracterizado pelo aumento de tensão no terminal receptor de uma linha sob influência de seus efeitos capacitivos. Isso ocorre devido ao aumento do fluxo de corrente capacitativa. (FURNAS, 1987).

A queda de tensão é causada pela grande quantidade de corrente que circula nos condutores para suprir quantidades elevadas de carga. Nessa situação há dois tipos perdas de potência bem documentadas: perda de potência ativa por efeitos térmicos nos condutores e perdas de potência reativa pela absorção nos reatores.

Dada essa possível variação de tensão e a possível não adequação do fator de potência, resultantes dos fenômenos explicados, verifica-se quais os critérios documentados para manter o sistema em limites permitidos.

Um desses critérios é a estabilidade de sistemas elétricos de potência, detalhada em (BARBOSA, 2013), basicamente, define-se a estabilidade como a capacidade do sistema de voltar para uma forma estável depois de ter sofrido uma perturbação, podendo ser classificada entre estabilidade angular, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. A referência (ONS, 2016) apresenta diretrizes e critérios para estabilidade de um SEP.

Em critérios internacionalmente aceitos, segundo (CIGRE, 2017), o limite máximo recomendado para a regulação da tensão da rede é em torno de 10% para as linhas de média tensão e em torno de 5% para as linhas de mais alta tensão (230 kV ou mais).

Além disso, segundo (ANEEL, 2010), o fator de potência recomendado para os consumidores conectados em um SEP é de no mínimo 0,92 indutivo ou capacitivo.

Desse modo, em alguns casos, existe a necessidade de compensação reativa em linhas de transmissão, em algumas situações para fornecimento de potência reativa adicional, através de elementos de efeito capacitivo, e em outras com necessidade de absorção de potência reativa adicional, através de elementos indutivos.

Será visto a seguir como elementos reativos podem ser acoplados em derivação ou em série para suprir essas necessidades.

3.1.1 Compensação Série

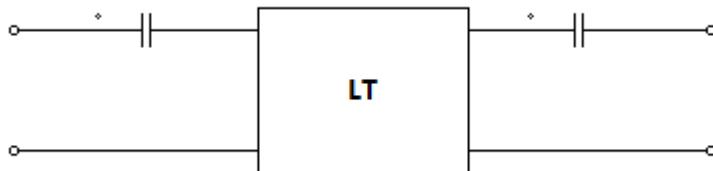
Quando objetiva-se equilibrar reativos em uma LT longa, uma possibilidade é conectar elementos em série. Nesse tipo de compensação a corrente fornecida à carga passa diretamente pelo dispositivo compensador, dessa forma deve-se atentar aos limites de corrente suportados pelo componente.

Nessa configuração faz mais sentido a compensação por dispositivos que atuem como capacitores, pois a compensação série indutiva não é benéfica para o desempenho da linha, não se mostra uma solução muito eficiente.

3.1.1.1 Compensação Série Capacitiva

Quando um elemento capacitivo é conectado em série a uma linha de transmissão longa, ele opera fornecendo potência reativa aos condutores, que atuam como reatores sob carga pesada. A Figura 9 ilustra o esquemático dessa conexão.

Figura 9 – Compensação Série Capacitiva.



Fonte: Autor (2021)

Como visto nas relações de potência da Figura 7, a parcela indutiva equivalente está disposta em elementos série na LT, absorvendo potência reativa, assim os elementos capacitivos, representados por capacitores no esquemático da Figura 9 fornecem potência reativa para a LT em situações de fornecimento de potência ativa acima da SIL.

As principais vantagens da compensação série capacitiva são a melhora do estado estacionário e da estabilidade transitória, a permissão de uma geração de potência reativa mais econômica e a redução da queda de tensão. Se for optado por um tipo de compensação variável, ele pode ser usado para melhorar a distribuição de carga entre os circuitos. Além disso, nesse tipo de compensação deve se atentar a procedimentos como à proteção do capacitor, à proteção de linha e aos efeitos de ressonância sub-síncrona. (CIGRE, 2017).

A melhoria do grau de estabilidade estático e transitório ocorre graças à redução do ângulo θ de potência, que se encontrava elevado antes da compensação.

De maneira geral, a compensação série através de elementos capacitivos é bastante econômica, visto que melhora a capacidade de carregamento da linha de transmissão, ou seja, permite que mais potência ativa seja entregue à carga, a um custo reduzido se comparado à construção de uma nova linha (GLOVER et al., 2017).

Por estar disposto na configuração série, o dispositivo corretor deve ser devidamente protegido contra possíveis aumentos de corrente, pois surtos desse tipo podem danificar o equipamento. Métodos de proteção de sistemas devem ser empregados nesse caso para desligar e religar o dispositivo. A referência (KINDERMANN, 2008) mostra métodos de proteção de bancos de capacitores e reatores em um SEP.

A ressonância sub-síncrona também pode ocorrer com a utilização dessa compensação, sendo esse fenômeno caracterizado por oscilações de baixa frequência que podem danificar o eixo das turbinas nos geradores. Segundo (PADIYAR, 1999) a ressonância sub-síncrona ocorre quando o sistema elétrico composto pela LT e capacitores série troca

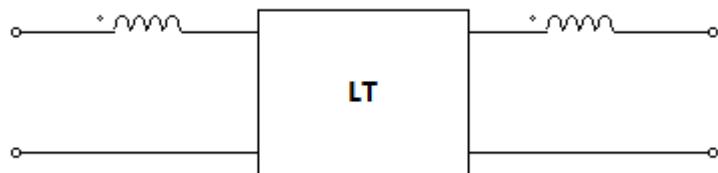
energia com o sistema mecânico do conjunto de geração, abaixo da frequência síncrona do sistema elétrico.

Deve-se lembrar, ainda, que os parâmetros do circuito representativo da LT (Figura 6), não estão dispostos como na representação, eles existem em cada elemento infinitesimal de linha. Com isso, quando a compensação série é realizada apenas nas extremidades da LT, a compensação não é totalmente eficiente, sendo que a eficiência aumenta tanto quanto mais se divide a linha em elementos menores, com inserção de compensação entre as divisões. Uma possibilidade é a instalação de elementos capacitivos no meio da linha em subestações, por exemplo.

3.1.1.2 Compensação Série Indutiva

Embora seja uma solução para compensar excessos de reativo em linhas longas sob efeito de carga leve, na prática esse tipo de conexão não é recomendado pois é pouco eficiente para compensação da linha. O esquemático desse sistema é dado na Figura 10.

Figura 10 – Compensação Série Indutiva.



Fonte: Autor (2021)

Em caráter teórico, o efeito que uma compensação desse tipo proporciona é a absorção dos reativos gerados pela LT em condição de carga leve (potência ativa abaixo da SIL). Porém, não se verifica atendimento suficiente para se compensar o sistema, visto que na situação de carga leve a corrente é baixa. Então, é mais vantajoso usar esse elemento em derivação. Ligar indutores em série faz sentido apenas para sistemas de distribuição ou instalações industriais, para limitar a corrente de curto-círcuito (CIGRE, 1989).

3.1.2 Compensação em Derivação

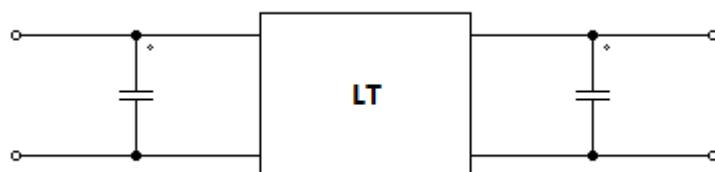
A compensação em derivação permite corrigir os excessos de reativo de uma LT sem a consequência de altas correntes circulando pelo elemento, como ocorre na compensação série. No caso em que o elemento compensador é ligado em derivação é possível realizar compensação com elementos indutivos ou capacitivos, sendo que ambos apresentam mais vantagens que desvantagens, se aplicados para a situação correta.

No caso do uso de reatores, a conexão é feita para compensar as potências capacitivas da linha em períodos de carga leve, dado o efeito Ferranti. Já no caso de compensação por elementos capacitivos, para controle de tensão e correção do fator de potência durante períodos com demanda elevada. (CIGRE, 2017).

3.1.2.1 Compensação em Derivação Capacitiva

Utilizar elementos capacitivos em derivação com a LT aumenta a tensão pontualmente no local de instalação. Como já abordado, em situações de carga pesada a LT opera absorvendo reativo das barras, ao conectar um banco capacitivo em derivação a energia reativa é absorvida naquele ponto de conexão, resultando em aumento de tensão localizado, além da correção do fator de potência. A Figura 11 exemplifica um esquemático desse modelo.

Figura 11 – Compensação em Derivação Capacitiva.



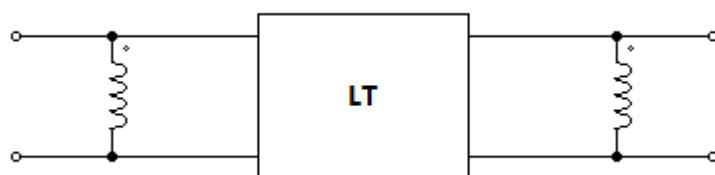
Fonte: Autor (2021)

Na maior parte das aplicações esse tipo de compensação é instalado de forma localizada para corrigir a tensão e o fator de potência junto ao terminal da carga. Nada impede que capacitores em derivação sejam instalados em diversos pontos da linha, mas a literatura estudada (FUCHS, 1977) (GLOVER et al., 2017) mostra que a compensação capacitiva em série é mais eficiente para a correção dos efeitos reativos em carga pesada.

3.1.2.2 Compensação em Derivação Indutiva

A literatura estudada (FUCHS, 1977) (GLOVER et al., 2017), mostra que a compensação reativa em derivação através de reatores é adequada para corrigir o efeito capacitivo da linha de transmissão em condição de carga leve (potência ativa menor que SIL da linha). A Figura 12 ilustra o esquemático dessa ligação.

Figura 12 – Compensação em Derivação Indutiva.



Fonte: Autor (2021)

Nessa compensação, os dispositivos de efeito indutivo absorvem o excesso de energia reativa produzida pela LT em carga leve, devido ao fato de o efeito ser localizado, a instalação de mais reatores ao longo da linha é possível, embora na maior parte das aplicações seja suficiente a conexão nas extremidades.

Então, a finalidade da conexão desses elementos é controlar a elevação de tensão (efeito Ferranti), além de corrigir o fator de potência, além disso permite a conexão de reatores de neutro cujo efeito será explicado no próximo capítulo.

3.2 MODELAGEM POR QUADRIPOLOS

Até então analisou-se que a compensação de reativos em LT pode ser feita através de elementos ligados em série ou em derivação, e será mostrado a seguir que esses elementos podem ser modelados por quadripolos e associados ao modelo de linha já definido.

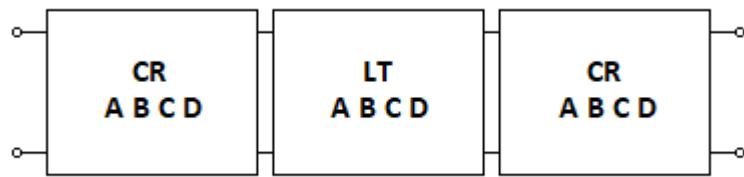
Conforme visto na fundamentação teórica um quadripolo é um modelo de circuito de quatro terminais, dois terminais de entrada e dois terminais se saída, cujos parâmetros, **A**, **B**, **C** e **D** caracterizam os elementos representados.

Como analisado previamente os elementos compensadores podem estar associados em série ou em derivação e esses elementos conectados podem ser vistos como uma associação em

cascata com a linha de transmissão. Verificamos essa associação na Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12.

Modela-se então esses elementos compensadores como quadripolos - Compensação Reativa (CR) -, da mesma forma que foi modelada a LT. Com isso, após obtido os parâmetros **A**, **B**, **C** e **D** desses elementos, basta associá-los em cascata com o modelo de quadripolo da linha, conforme Figura 13, associação detalhada em (SADIKU, 2013).

Figura 13 – Associação em Cascata de Quadripolos, CR e LT.



Fonte: Autor (2021)

Essa associação é matematicamente um produto de matrizes, o que torna o cálculo bastante simples, conforme Equação (3.1).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_L & B_L \\ C_L & D_L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A partir disso será visto quais são os parâmetros dos quadripolos que modelam os compensadores, sejam eles ligados em série, sejam eles ligados em derivação.

3.2.1.1 Modelo de Quadripolo de Compensação em Série

No caso de compensação série os parâmetros do quadripolo são definidos de acordo com a Equação (3.2), conforme Anexo A.

$$\begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde Z_c representa a impedância do elemento de compensação ligado em série.

3.2.1.2 Modelo de Quadripolo de Compensação em Derivação

De modo similar ao definido na compensação série, no caso de compensação em derivação os parâmetros do quadripolo estão dispostos de acordo com a Equação (3.3), conforme Anexo A.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_C & \mathbf{B}_C \\ \mathbf{C}_C & \mathbf{D}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_C & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Onde Y_C representa a admitância do elemento de compensação ligado em derivação.

3.3 PROCEDIMENTOS PARA COMPENSAÇÃO

Com o entendimento da teoria por trás da compensação de reativos em LT e sua respectiva modelagem por quadripolos, pode-se avaliar quais procedimentos devem ser tomados ao escolher a compensação. Esses procedimentos partem de critérios nacionalmente e internacionalmente aceitos, já mencionados neste trabalho, para garantir a qualidade do suprimento de energia aos consumidores finais e fornecer segurança aos geradores.

Para definir a compensação a ser utilizada em determinada LT, é possível seguir o procedimento da Figura 14. Esse procedimento é detalhado em (VALE et al., 2003).

Figura 14 – Procedimento Geral para Definir a Compensação Reativa



Fonte: VALE et al (2003)

Inicialmente devem ser realizados recortes no sistema, identificando possíveis áreas de atendimento, após esse passo deve ser realizado um diagnóstico de reativos, com o respectivo balanço de potência reativa na área sob análise. Então se deve selecionar barras candidatas com base nos critérios de fator de potência e controle de tensão (VALE et al., 2003).

Até esses procedimentos, identificou-se no sistema onde se encontra o problema a ser corrigido. Nesse estudo volta-se a atenção para a compensação reativa de sistemas de transmissão, desse modo partimos do pressuposto que já foi identificada a barra a ser corrigida. Com isso, os procedimentos que seguem são focados na compensação da linha.

O procedimento de definição da compensação reativa envolve 4 etapas: montante, localização, tipo e controle. O montante representa o mínimo requerido de compensação reativa no local, objetivando obter fator de potência unitário. A localização deve estar o mais próximo possível de onde é necessário, pois não é adequado transportar potência reativa. O tipo pode ser fixo ou manobrável. Compensadores fixos são ideais para cargas com pouca variação, já compensadores controláveis são mais adequados em regiões cuja carga tem grande variação. Caso se escolha o tipo manobrável, deve-se selecionar o tipo de controle, podendo ser manual ou automático, sendo também possível escolher o tipo de automatismo (VALE et al., 2003).

3.3.1 Esquema de Ligação

O primeiro passo é definir o montante de compensação a ser utilizado, todavia, para que se possa calcular o montante é necessário escolher o esquema de ligação da compensação, em série ou em derivação.

Nos tópicos anteriores foram detalhadas as características de cada esquema de ligação e foram abordadas as principais vantagens e desvantagens de cada compensação. Deve-se então verificar qual se aplica à LT estudada e fazer a escolha com base nas vantagens e desvantagens explicitadas.

3.3.2 Montante

Com a definição da escolha do esquema de ligação é possível fazer a modelagem dos elementos de compensação através de quadripolos. Serão utilizados esses modelos em conjunto ao modelo de linhas de transmissão longas para cálculo dos montantes a serem compensados.

Como a associação quadripolos em cascata é um produto matricial e como se conhece o quadripolo equivalente de uma LT longa, de um elemento ligado em série e de um elemento ligado em derivação, conforme Equações (2.38), (3.2) e (3.3), respectivamente, os valores da impedância \mathbf{Z}_c ou admitância \mathbf{Y}_c dos elementos compensadores podem ser verificados com a solução da equação matricial que associa os elementos e as tensões de entrada e saída do sistema.

3.3.2.1 Montante da Compensação Série

Para compensar o sistema através de elementos em série deve-se partir do valor da impedância série corrigida da LT (\mathbf{Z}'), dada pela equação (2.40), o qual deve ser utilizado no compensador na proporção desejada (K_p), conforme Equação (3.4). na qual (n) representa o número de elementos que será utilizado para compensar a LT (GLOVER et al., 2017).

$$\mathbf{Z}_c = \frac{K_p \cdot \mathbf{Z}'}{n} \quad (3.4)$$

Com a impedância do elemento compensador série calculada é possível verificar a eficácia da proporção usada para uma condição de carga específica, a partir de modelos de quadripolos, como o da Equação (3.5), que mostra um exemplo do caso em que $n = 2$ para compensação nas extremidades da LT.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Z}_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}) & \mathbf{Z}_0 \cdot \operatorname{senh}(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}) \\ \frac{\operatorname{senh}(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}})}{\mathbf{Z}_0} & \cosh(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Z}_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Desse modo averígu-se a eficácia da compensação utilizada para a carga estudada verificando a tensão e o fator de potência das extremidades da LT compensada.

3.3.2.2 Montante da Compensação em Derivação

Para compensar o sistema através de elementos em derivação deve-se partir do valor da admitância corrigida da LT (\mathbf{Y}'), dada pela equação (2.41), o qual deve ser utilizado no compensador na proporção desejada (K_p), conforme Equação (3.6), em que (n) representa o número de elementos que será utilizado para compensar a LT (GLOVER et al., 2017).

$$\mathbf{Y}_c = \frac{K_p \cdot \mathbf{Y}'}{n} \quad (3.6)$$

Com a admitância do elemento compensador em derivação calculada é possível verificar a eficácia da proporção usada para uma condição de carga específica, a partir de modelos de quadripolos, como o da Equação (3.7), que mostra um exemplo do caso $n = 2$ para compensação nas extremidades da LT.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_c & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}) & \mathbf{Z}_0 \cdot \operatorname{senh}(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}) \\ \frac{\operatorname{senh}(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}})}{\mathbf{Z}_0} & \cosh(\sqrt{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_c & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Novamente é possível averiguar a eficácia da compensação utilizada para a carga estudada verificando a tensão e o fator de potência das extremidades da LT compensada.

Tanto no caso série quanto no caso em derivação não é eficiente se utilizar $K_p = 1$, que representa 100% de compensação, a literatura mostra que uma proporção de compensação muito alta gera desvantagens se comparada a proporções um pouco menores. Valores próximos de 75% de compensação são mais comuns nos sistemas.

3.3.3 Localização

O próximo passo é determinar a localização ideal para a compensação. Escolhe-se qual o ponto da LT no qual será instalado o compensador e se é necessário compensar o montante em um só elemento, ou em mais de um.

De maneira geral quanto mais dividida for a compensação, com mais equidade os fenômenos reativos da linha serão anulados, pois para cada elemento infinitesimal de linha

existe atuação dos campos elétricos e magnéticos. Assim, uma linha com compensação mais distribuída terá perfil de tensão e fator de potência bem distribuídas ao longo do comprimento, já uma linha longa compensada apenas na extremidade terá maior dificuldade de manter os padrões.

Como fatores econômicos são importantes na hora da escolha da localização, é recomendado que se evite excesso de elementos conectados. Tendo os critérios de qualidade de energia como fundamento deve-se simular a compensação na localização desejada e verificar se esses critérios são atingidos, para diversas condições de carga e geração.

No procedimento de determinação de montantes mostrou-se as Equações (3.4) e (3.6), caso opte-se por mais elementos compensadores para atingir os limites estabelecidos, pode-se ajustar o fator (n) das equações, recalculando os montantes.

Nos casos em que os elementos são ligados em algum ponto intermediário da LT, para verificar a eficácia do compensador utilizado pode-se dividir a LT em trechos menores e utilizar quadripolos do trecho dividido para recalcular os montantes.

3.3.4 Tipo e Controle

Após definido o montante necessário para compensação e a localização ideal, deve-se escolher o tipo de compensação.

Em sistema de potência há dois tipos de elementos que podem ser usados para gerar ou absorver reativos: a máquina síncrona, que dependendo da excitação pode gerar ou absorver reativo, podendo ser controlada, e os bancos reativos, de capacitores ou indutores, podem ser estáticos ou controlados por diversas tecnologias.

3.3.4.1 Máquinas Síncronas

Em máquinas síncronas a potência ativa é determinada pela potência mecânica no eixo da máquina, além disso é possível variar a potência reativa variando excitação de campo da máquina. Com valores baixos de corrente de campo, a máquina síncrona absorve potência reativa do sistema e o ângulo de potência é grande. Valores altos de corrente de campo fazem com que a máquina forneça potência reativa para o sistema. Para algum valor específico

intermediário de corrente de campo, o fator de potência da máquina é unitário, gerando apenas potência ativa (FITZGERALD, 2006).

Como parte considerável dos grandes geradores conectados ao sistema são máquinas síncronas, é possível compensar reativamente uma linha de transmissão utilizando o gerador conectado em uma das extremidades como reator ou como capacitor, para isso basta variar a excitação de campo da máquina. Dessa forma esse tipo de compensação é controlável e permite ajustar o sistema para as condições de carga necessárias. Quando a máquina síncrona tem função exclusiva de compensar o sistema, é chamada de compensador síncrono.

Pode-se dizer que de maneira geral os geradores síncronos atuam sobreexcitados durante o dia (situação de carga pesada), fornecendo reativo para a LT e para a carga conectada no sistema. Já durante a noite a carga fica leve, e as LTs atuam como grandes capacitores, então os geradores síncronos atuam subexcitados, absorvendo esse reativo excedente do sistema.

A principal desvantagem desse tipo de compensação é que compensadores síncronos são grandes e necessitam de um circuito adicional para excitação. Por isso geralmente essa tecnologia é utilizada junto a usinas, onde já existe uma estrutura montada para instalação.

3.3.4.2 Bancos de Capacitores e Reatores Fixos

Bancos de capacitores ou indutores (reatores) são formados por capacitores ou indutores ligados em cada uma das três fases de um sistema de transmissão. Estes dispositivos têm vantagens em relação ao compensador síncrono, pois são menores e não necessitam de um circuito próprio para alimentá-los. A principal desvantagem é que eles são estáticos, não permitindo variação de compensação com a variação da carga.

Por serem mais simples esses elementos podem ser instalados ao longo da LT, sendo o compensador síncrono geralmente instalado apenas na extremidade geradora da LT.

3.3.4.3 Compensadores Controlados por Eletrônica de Potência

Em situações com grande variação de carga nas quais não se mostra viável a instalação de compensadores síncronos ou bancos de capacitores/reatores fixos, uma possibilidade é controlar os capacitores e indutores através do uso de eletrônica de potência. Tais dispositivos são conhecidos como FACTS (*Flexible AC Transmission System*) (IEEE, 1997).

Na ligação em série destaca-se o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) e o TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*), ambos bancos de capacitores em série, podendo ser controlados ou chaveados por tiristores.

Entre esses elementos ligados em derivação, destaca-se o TSC (*Thyristor Switched Capacitor*), banco de capacitores chaveado por tiristores, o TSR (*Thyristor Switched Reactor*), banco de reatores chaveado por tiristores, o TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*), banco de reatores controlados por tiristores. Tais elementos agrupados formam o SVC (*Static VAR Compensator*),

Esses elementos permitem o chaveamento dos dispositivos ou controle da parcela de compensação utilizada, desse modo são bastante úteis para estabilidade do sistema em condições de cargas variáveis.

3.3.5 Demais Procedimentos

Segundo VALE (2003) após definido o montante, a localização e o tipo/controle de compensação a ser utilizado, deve-se avaliar fatores como a margem de potência reativa, onde busca-se garantir os critérios estabelecidos de tensão e fator de potência, compatibilização da compensação, se o que foi instalado não prejudica demais sistemas próximos ao estudado e a avaliação técnica financeira onde se revisa custos e benefícios do projeto a ser instalado.

4 MANOBRAS DE RELIGAMENTO

Na fundamentação teórica estudou-se a LT representada por seu equivalente monofásico, sendo que em cada fase existem fenômenos eletromagnéticos e esses fenômenos são função das características dos condutores e do comprimento da linha. O estudo foi abordado dessa forma, pois quando o sistema se encontra equilibrado, as fases têm mesmo módulo e estão defasadas de 120° em tensão ou corrente. Para aplicações em regime permanente essa modelagem é suficiente, visto que de maneira geral as fases se encontram equilibradas no SIN.

Todavia, é comum a ocorrência de surtos em uma LT, ou por descargas atmosféricas, ou por curtos-circuitos transitórios ou permanentes, ou ainda por outros fatores. Esses curtos-circuitos podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos. Nesse cenário, dependendo do tipo de falta, pode ocorrer um desbalanço entre as fases e com isso surge a necessidade de estudar modelos matemáticos que considerem cada fase da LT separadamente.

Este trabalho não aborda modelos matemáticos para o sistema desbalanceado, mas a literatura apresenta modelagens da interação entre as fases assim como foi realizado na modelagem monofásica, através de modelos de quadripolos trifásicos.

Um exemplo típico de procedimento operacional pode ser descrito quando ocorre um curto-circuito na LT, e se faz necessário isolar o local da falta, para que não haja corrente de curto-circuito fluindo ao local atingido. Esse isolamento pode ser feito por meio da abertura de disjuntores em uma única fase ou nas três fases simultaneamente. Após corrigido o defeito os disjuntores fecham novamente, voltando para a configuração anterior da rede.

Esse procedimento de abertura e fechamento dos disjuntores é chamado de manobra de religamento, e dependendo do número de disjuntores envolvidos no processo podem ser denominadas manobras de religamento trifásicas ou manobras de religamento monofásicas.

Este capítulo tratará, além de conceitos de perturbações nas LTs, sobre as vantagens e desvantagens da manobra monofásica em comparação à trifásica, como está relacionada a teoria de compensação vista anteriormente e o conceito de reator de neutro, um componente que pode atuar como viabilizador para realização da manobra em determinadas linhas.

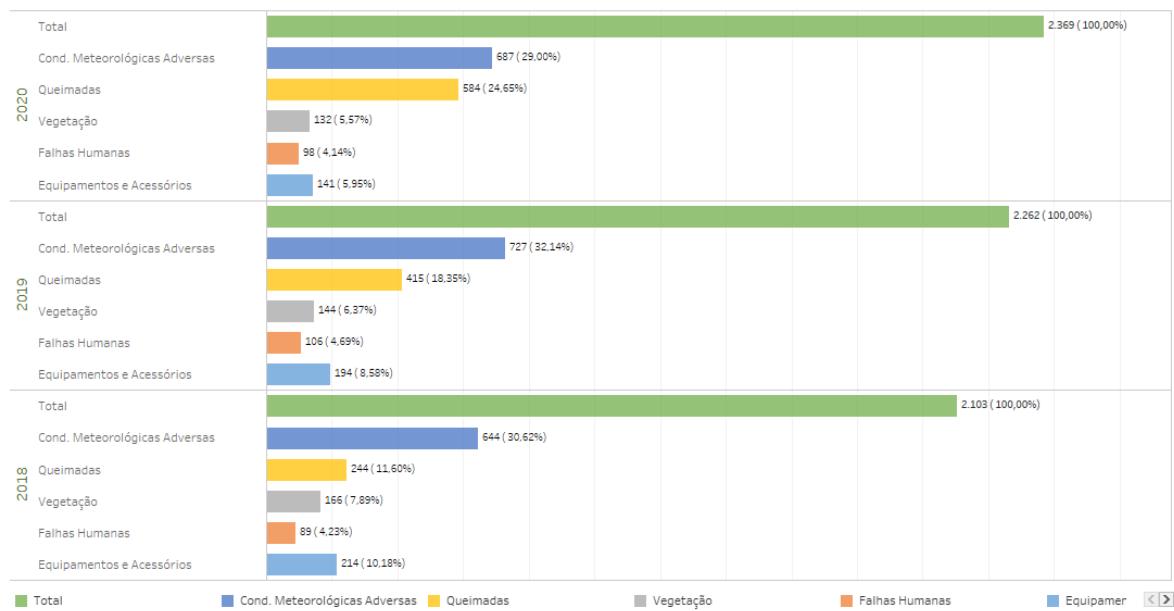
4.1 FALTAS NA LINHA DE TRANSMISSÃO

Conforme (ONS, 2021), os sistemas elétricos estão sujeitos a interrupções do suprimento na operação, é afirmado que a construção de um sistema totalmente imune a falhas

exigiria equipamentos e circuitos com custo tão elevado que não possibilitaria aos consumidores pagar a tarifa correspondente. Por isso, no Brasil, os sistemas são projetados baseados em critérios de confiabilidade “n-1” que buscam garantir uma boa performance e limites de estabilidade no sistema para os diversos tipos de surtos que possam surgir.

As perturbações em um sistema de transmissão são originadas por diversos tipos de fenômenos. Alguns desses fenômenos são de natureza térmica e de isolamento, quando há sobrecarga do sistema e desgaste do isolamento. Outros são a partir de fatores climáticos como descargas atmosféricas, ventos e chuvas fortes ou acúmulo de neve. Além disso, podem ser resultado de erros humanos, como problemas elétricos relacionados a operações de chaveamento e manobra ou manutenção inadequada. (KINDERMANN, 1997). Na Figura 15, é possível ver as principais causas de perturbações em LTs brasileiras nos últimos 3 anos.

Figura 15 – Levantamento do ONS para Causas de Perturbações em LTs.



Fonte: ONS (2021).

Essas faltas podem também ser balanceadas ou desbalanceadas. No caso balanceado a falta é trifásica, afetando as três fases do sistema de transmissão igualmente. Já em casos desbalanceados as faltas podem ser monofásicas-terra, bifásicas ou bifásicas-terra. (GRAINGER; STEVENSON, 1994). A ocorrência desses tipos de falta não ocorre em igual

proporção, é pressuposto que atingir uma única fase é mais provável que atingir mais de uma. A Tabela 3 mostra a ocorrência desses tipos de falta para algumas classes de tensão.

Tabela 3 – Estatísticas de Faltas em LTs.

	500kV	400kV	200kV
Faltas Monofásicas para Terra	93%	70%	56%
Faltas Bifásicas	4%	23%	27%
Faltas Bifásicas para Terra	2%	23%	27%
Faltas Trifásicas	1%	7%	17%

Fonte: Zevallos (2013) - adaptado.

Observa-se que na maior parte das vezes ocorrem faltas monofásicas para terra, estatística que se acentua com o aumento da classe de tensão da LT (devido ao espaçamento entre fases). Com isso a probabilidade de ocorrência de faltas monofásicas em linhas de extra alta tensão é consideravelmente alta se comparada às demais faltas.

Quando ocorre algum surto na LT a corrente que circula antes da atuação dos disjuntores é chamada de corrente de arco primário, enquanto a corrente que circula após abertura dos disjuntores é chamada corrente de arco secundário.

4.1.1 Arco Primário

O arco primário é aquele que transcorre durante a ocorrência de uma falta na LT, podendo ser de natureza aleatória ou associado a aplicações específicas. Os arcos de caráter aleatório são relacionados a fenômenos naturais, como descargas atmosféricas, por exemplo. Os arcos de caráter específico são provenientes de manobras ou atuação de dispositivos. (CAMARA, 2010).

Quando ocorre um arco primário na fase em falta, uma corrente denominada de corrente de arco primário percorre a fase. Essa corrente é da ordem de kA, visto que as fontes de tensão no gerador continuam alimentando normalmente a LT, mesmo com uma ou mais fases em falta. Essa corrente elevada é mitigada quando se abre os disjuntores das fases em falta, pois após a abertura dos disjuntores essa corrente vai a zero, depois de um período transitório. Caso essa corrente posterior a abertura dos disjuntores seja diferente de zero, essa corrente é denominada de corrente de arco secundário.

4.1.2 Arco Secundário

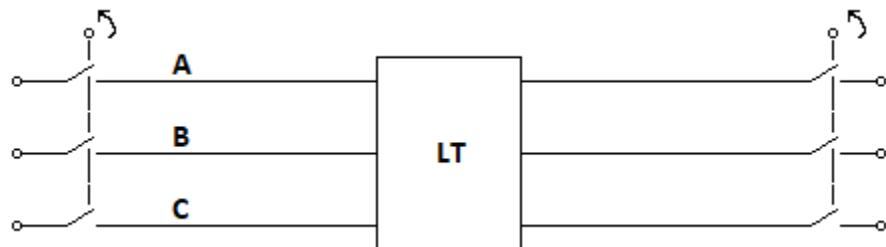
Como visto na fundamentação teórica, existe acoplamento eletromagnético entre a fase e o neutro de um modelo monofásico de uma LT. Da mesma forma, existe acoplamento entre as fases da LT e quando ocorre algum desbalanceamento entre as fases tal efeito é acentuado. Para modelar matematicamente o acoplamento eletromagnético entre fases uma possibilidade é o uso de modelos de quadripolos trifásicos.

A formação do arco secundário é proveniente de um arco primário originado de uma falta fase-terra em qualquer ponto da LT. Quando os disjuntores se abrem na fase sob falta a corrente primária na ordem de kA é reduzida à de arco secundário, na ordem de dezenas de Ampères. Esse valor não vai a zero, pois as demais fases o sustentam através de acoplamento eletromagnético após abertura dos disjuntores. (CAMARA, 2010). Ou seja, quando apenas uma das fases é desligada e as outras continuam em normal funcionamento, os fenômenos eletromagnéticos se propagam através de acoplamento para a fase desligada e este acoplamento sustenta o arco primário da falta, resultando no arco secundário.

4.2 MANOBRAS DE RELIGAMENTO TRIPOLAR

Este tipo de manobra abre e fecha os disjuntores das três fases da LT na ocorrência de falta, pode ser realizada em faltas monofásicas, bifásicas ou trifásicas. A Figura 16 ilustra esse procedimento.

Figura 16 – Esquemático de Religamento Trifásico de Disjuntores da LT.



Fonte: Autor (2021)

Essa manobra é bastante utilizada no SIN brasileiro e apresenta vantagens e desvantagens. A Tabela 4 relata alguns pontos característicos desse procedimento.

Tabela 4 – Características da Manobra de Religamento Trifásica.

Existe transmissão de energia	Não existe
Acontecem sobretensões severas no religamento	Mais severas que outras manobras
Propagação do defeito em cascata	Alta probabilidade
Acontece defasagem nos extremos	Alta probabilidade
Limite no tempo morto	Pode ter um tempo maior que outras manobras
Perda de sincronismo	Alta probabilidade
Arco Secundário	Não existe
Arco sustentado em 60 Hz	Existe
Carga residual nas fases	Depende da sequência de abertura

Fonte: Zevallos (2013) - adaptado.

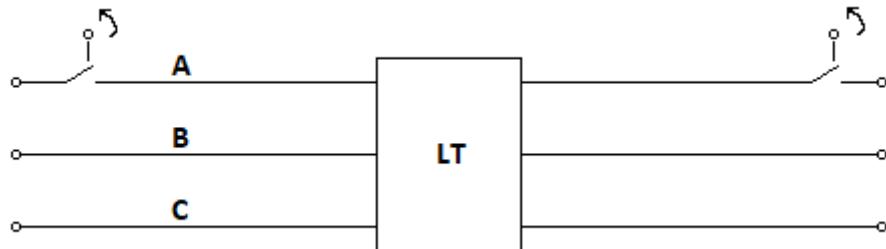
Observa-se que não existe transmissão de energia nesse tipo de manobra, pois todas as fases são interrompidas, mesmo que a falta ocorra em uma única fase. As sobretensões são severas e podem resultar em efeito cascata no sistema ou perda de sincronismo. O tempo morto (tempo entre abertura e fechamento dos disjuntores) pode ser maior que em outras manobras, sem que ocorra danos no sistema. A principal vantagem é que não existe arco secundário nessa manobra.

Ressalta-se que mesmo com tempo morto máximo maior que outras manobras, para que esse procedimento tenha sucesso a linha deve ser mantida aberta durante um curto período, de modo a evitar o efeito cascata, um fenômeno de propagação do distúrbio para outras linhas. Um religamento tripolar rápido, por exemplo, deve possuir um tempo morto entre 0,5 s e 1 s para não prejudicar o sistema. (ZEVALLOS, 2013).

4.3 MANOBRAS DE RELIGAMENTO MONOPOLAR

Outra opção de manobra é a manobra de religamento monofásica. Nessa manobra apenas o disjuntor da fase em falta se abre, tal que as demais fases continuam fornecendo potência normalmente ao sistema. A Figura 17 ilustra tal procedimento. A Tabela 5 mostra algumas características da manobra.

Figura 17 – Esquemático de Religamento Monofásico de Disjuntores na LT.



Fonte: Autor (2021)

Tabela 5 – Características da Manobra de Religamento Monofásica.

Existe transmissão de energia	Mantém até 54 % da transmissão
Acontecem sobre tensões severas no religamento	Menos severas que outras manobras
Propagação do defeito em cascata	Não existe
Acontece defasagem nos extremos	Baixa probabilidade
Limite no tempo morto	Critério 1: Até 500 ms Critério 2: $t > 500$ ms
Perda de sincronismo	Baixa probabilidade
Arco Secundário	Existe
Arco sustentado em 60 Hz	Existe
Carga residual nas fases	Não existe

Fonte: Zevallos (2013) - adaptado.

Observa-se que tal manobra é vantajosa, pois mantém mais da metade da potência entregue à carga, mesmo com uma das fases desligada, além disso, apresenta menores chances de defeitos em cascata, problemas de estabilidade ou perda de sincronismo. Ocorre também a necessidade de tempo morto de menor duração, mas principal desvantagem é a dependência da mitigação do arco secundário.

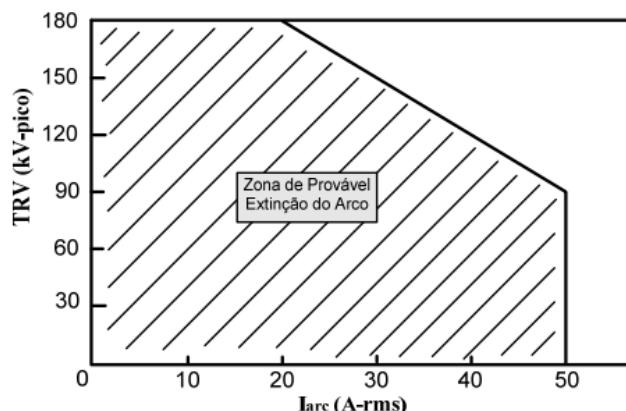
Para que a manobra monofásica tenha sucesso é necessária a extinção do arco secundário antes do fechamento do disjuntor da fase em falta. A probabilidade de sucesso na extinção está relacionada com o tempo morto, que deve ser ajustado pela proteção (ZEVALLOS, 2013).

4.4 EXTINÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO

Nos tópicos anteriores foi mostrado que a manobra monopolar é mais vantajosa se comparada à manobra tripolar, mas que para isso é necessária a extinção do arco secundário na manobra monofásica, o que depende de diversos fatores.

Para se aumentar a probabilidade de auto extinção do arco secundário é necessário reduzir o valor da corrente sustentada do arco. A referência (ZEVALLOS, 2013) mostra que valores de corrente de arco secundário abaixo de 50 A eficazes são suficientes para auto extinção, porém em linhas de extra alta tensão (EAT) esses valores podem ficar acima de 50 A, para valores entre 50 A e 100 A tem-se a indicação de que linha precisa de algum outro método para mitigação do arco secundário e para correntes de arco secundário acima de 100 A eficazes a probabilidade de extinção é bastante baixa. A Figura 18 mostra zona de provável extinção de arco em função da tensão de restabelecimento transitória (TRV).

Figura 18 – Zona de Provável Extinção do Arco Secundário.



Fonte: Zevallos (2013).

Como estudado na teoria de compensação, a linha sob carga leve apresenta um efeito denominado efeito Ferranti, no qual o máximo carregamento ocorre quando a LT está alimentando carga nula, sendo o ponto de máxima tensão próximo do terminal receptor, o mais distante possível do gerador, onde o efeito é mais intensificado.

Desse modo, como na verificação da extinção do arco secundário, deve se verificar se a corrente de arco secundário no local da falta não excede 50 A eficazes e, dado a natureza o efeito Ferranti, deve-se verificar se uma falta próxima do terminal receptor e sob condição de carga nula não excede 50 A eficazes de corrente de falta.

Caso a LT não compensada sob falta fase-terra no ponto de máxima tensão tenha corrente abaixo de 50 A eficazes o arco secundário probabilisticamente se extinguirá e será possível realizar o religamento dos disjuntores da fase aberta. Caso essa condição não seja atingida, deve-se buscar a mitigação do efeito Ferranti.

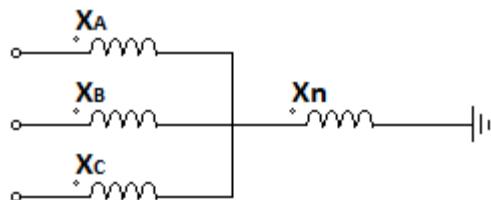
Como explicado também no tópico de compensação de LTs a compensação de linhas capacitivas é realizada através de bancos de reatores ligados em derivação. Quando reatores são ligados eles mitigam o efeito capacitivo das LT's e com isso diminuem o efeito Ferranti. Dessa forma é possível que tal compensação seja suficiente para extinção do arco secundário, pois a tensão acoplada no ponto da falta será menor dada a diminuição do efeito Ferranti.

Caso verifique-se que mesmo com a LT compensada ainda existe a necessidade de redução da corrente de arco secundário para auto extinção do arco, deve-se procurar uma forma de diminuir o acoplamento eletromagnético entre as fases. Entre outras soluções, ressalta-se a ligação de um reator de neutro na compensação em derivação.

4.4.1 Reator de Neutro

O reator de neutro é um elemento indutivo, ligado no ponto de neutro entre os 3 reatores em derivação de uma LT compensada. O conjunto banco de reatores + reator de neutro é também conhecido como reator de quatro pernas. A Figura 19 ilustra esse esquema de ligação.

Figura 19 – Reator de Quatro Pernas



Fonte: Autor (2021)

O principal objetivo desse elemento é permitir que a corrente flua quando ocorre um desbalanceamento entre as fases (no sistema balanceado o reator não tem efeito). Com isso, se corretamente dimensionado, o reator de neutro permite diminuir consideravelmente a corrente de arco secundário. As referências (ZEVALLOS, 2007) e (CAMARA, 2003) mostram procedimentos para se obter o valor da impedância do reator de neutro. Basicamente, esse valor depende da resistência de falta, da classe de tensão, do comprimento total e da parcela de compensação utilizada na LT.

5 SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as simulações desenvolvidas neste trabalho, cujo objetivo é mostrar na prática parte do que foi estudado teoricamente. Serão apresentados resultados em regime transitório e permanente de uma LT através do *software* ATP Draw, além dos resultados dos cálculos no *software* Scilab.

O ATP (ATP, 1992) foi escolhido para realizar estas simulações visto que apresenta módulos específicos para modelar linhas de transmissão e é capaz de realizar simulações tanto em regime permanente quanto em regime transitório. O módulo utilizado nessas simulações é o módulo LCC sob a configuração de modelo JMarti, o qual permite inserir as características físicas dos condutores e obter os parâmetros da LT por unidade de comprimento. Com esses parâmetros é possível comprovar os resultados obtidos através dos modelos de quadripolos estudados.

Os cálculos de compensação da linha de transmissão estudada serão realizados no Scilab, que possibilita trabalhar com as matrizes que representam os modelos de quadripolos, além de cálculos de ajustes de tensão e corrente.

É simulada uma LT longa, cujos efeitos eletromagnéticos são acentuados, sob condições de carga leve e sob condições de carga pesada. Em ambas as condições será visto o efeito da compensação reativa devidamente dimensionada para a situação estudada. Além disso é simulada a linha sob manobra para a compensação dimensionada e sob condição de carga nula, com linha em aberto no terminal receptor.

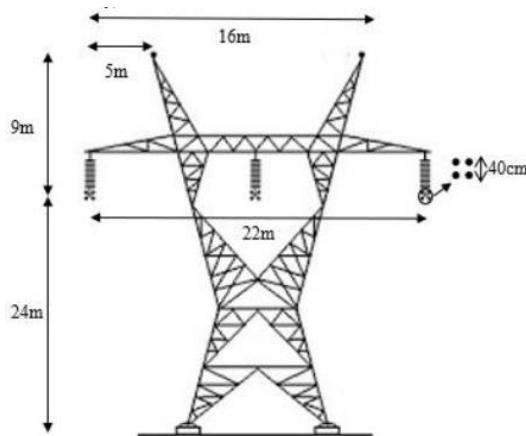
Após realizada tal simulação serão interpretados os resultados obtidos tanto no Scilab quanto no ATP, comparando os resultados dos cálculos através de modelos de quadripolo com os valores obtidos através de simulações. Para a situação de manobra de religamento monopolar será interpretada a necessidade do uso de compensação e de reator de neutro na LT estudada.

5.1 SIMULAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A linha de transmissão escolhida para a condição de LT longa é uma linha de 300 km e classe de tensão de 500 kV, cujos elementos foram dimensionados conforme a LT de 500 kV da referência (MARQUES, 2018). A LT real utilizada na referência é uma linha de 205 km. Optou-se por ampliá-la para 300 km com o objetivo de evidenciar os fenômenos eletromagnéticos, todavia as características dos condutores e distância entre eles permanecem

as mesmas citadas na referência. A Figura 20 ilustra uma das torres da linha supracitada. A Tabela 6 explicita as características dos condutores da LT.

Figura 20 – Torre da LT.



Fonte: Marques (2018)

Tabela 6 – Características dos Condutores da LT.

Condutores	Fase	Para-raios
Tipo	Grosbeak	HS 3/8"
Raio externo (cm)	1,257	0,4572
Raio interno (cm)	0,4635	0
Número de condutores por fase	4	0
Flecha a meio vão (m)	12	7
Resistência DC (ohm/km)	0,08998	4,188

Fonte: Marques (2018) - adaptado.

Com base nesses dados e utilizando o módulo LCC do ATP Draw, é possível obter os parâmetros da LT. Para isso insere-se os dados coletados no módulo LCC conforme Figura 21. Configura-se adequadamente o módulo, alterando para configuração Pi, e solicita-se os dados do módulo (*Run ATP*). A Tabela 7 mostra os dados de sequência obtidos através do modelo.

Após obtidos os parâmetros da LT configura-se o módulo LCC para configuração que será usada nas simulações o mesmo modelo JMarti, mesmo utilizado na referência (MARQUES, 2018), conforme Figura 22.

Figura 21 – Configuração de Dados do Módulo LCC da LT.

Line/Cable Data: LT1										
		Model		Data		Nodes				
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.4635	1.257	0.08998	0	24	12	40	45	4
2	2	0.4635	1.257	0.08998	11	24	12	40	45	4
3	3	0.4635	1.257	0.08998	22	24	12	40	45	4

Fonte: ATP (2021).

Tabela 7 – Parâmetros Obtidos Através do Módulo LCC da LT.

Sequência	Impedância Característica	Atenuação	Resistência	Reatância	Susceptância
	magnitude(ohm)	ângulo (°)	db/km	ohm/km	ohm/km
Zero:	6,74E+02	-7,36E+00	2,46E-03	3,79E-01	1,44E+00
Positiva:	2,56E+02	-1,98E+00	3,87E-04	2,28E-02	3,30E-01

Fonte: Autor (2021).

Figura 22 – Configuração do Módulo LCC da LT.

Line/Cable Data: LT1

Model		Data		Nodes	
System type Name: LT1 <input checked="" type="checkbox"/> Template Overhead Line #Ph: 3 <input checked="" type="checkbox"/> Transposed <input checked="" type="checkbox"/> individual circuits <input checked="" type="checkbox"/> Auto bundling <input checked="" type="checkbox"/> Skin effect <input type="checkbox"/> Segmented ground <input checked="" type="checkbox"/> Real transf. matrix Units: Metric		Standard data Rho [ohm·m] 1500 Freq. init [Hz] 0.1 Length [km] 1 <input type="checkbox"/> Set length in icon			
Type	Data				
<input type="radio"/> Bergeron <input type="radio"/> PI <input checked="" type="radio"/> JMarti <input type="radio"/> Semlyen <input type="radio"/> Noda	Decades 10 Points/Dec 20 Freq. matrix [Hz] 10000 Freq. SS [Hz] 60 <input checked="" type="checkbox"/> Use default fitting				

Fonte: ATP (2021).

O Modelo JMarti é interessante, pois para a simulação correta de transitórios eletromagnéticos, a modelagem da LT deve abranger todo o intervalo de frequências dos sinais e esse modelo permite tal funcionalidade. Para simular essa LT assinalou-se as opções *Auto-Bundling*, *Skin Effect* e *Real Transf. Matrix* para adequar a simulação. Além disso considerou-se a transposição da LT, visto que essa linha é considerada longa. O ONS e a ANEEL estabelecem que LTs de comprimento maior que 100 km devem ser transpostas. (MARQUES, 2018).

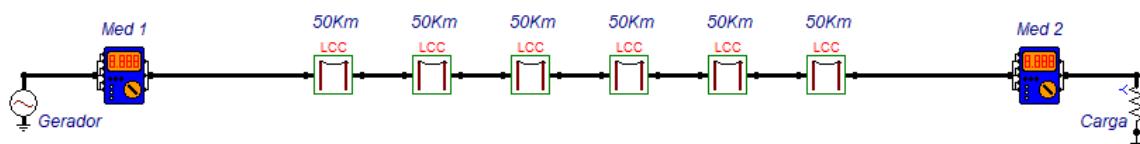
O gerador é caracterizado por uma fonte de tensão alternada trifásica, podendo representar tanto um gerador síncrono, quanto uma fonte de geração CC, eólicas ou fotovoltaicas, após inversão.

A carga é representada por um banco de resistores ligados em Y, que sob tensão nominal permite ajustar a potência ativa desejada nas simulações.

Os medidores utilizados são medidores trifásicos RMS, cujos módulos são explicados no Apêndice A e podem ser obtidos na referência (PARRA, 2021). Além de consolidar os dados de tensão, corrente e potência em valores RMS trifásicos ou monofásicos, esses medidores permitem apresentar os dados de tensão e corrente padrão do ATP, no domínio do tempo.

O circuito da LT longa de 300 km, 500 kV, suprida por um gerador e alimentando uma carga é dado na Figura 23.

Figura 23 – Modelagem da LT.



Fonte: ATP (2021).

Com essa linha modelada, parte-se para as simulações, primeiramente com a linha em carga pesada, então sob carga leve e por fim nas condições de manobra, seguindo a ordem:

- carga pesada e sem compensação;
- carga pesada e com compensação;
- carga leve e sem compensação;

- d) carga leve e com compensação;
- e) manobra sob carga nula e sem compensação;
- f) manobra sob carga nula e com compensação;
- f) manobra sob carga nula, com compensação e com reator de neutro.

5.1.1 Carga Pesada

Para simular a condição de carga pesada na linha de transmissão modelada, utilizou-se como base o parâmetro da impedância característica de sequência positiva da linha, obtida do modelo LCC, com valor de 256Ω por fase. Como a carga pesada é caracterizada por potência ativa entregue maior que a SIL, e dadas as relações de potência explicadas na fundamentação teórica, optou-se por uma carga com impedância fixa de 150Ω por fase, simulada através de um banco de resistores trifásicos.

5.1.1.1 Carga Pesada sem Compensação

Nesta condição, para observar na simulação o regime permanente da carga sob tensão nominal, calcula-se qual tensão deve ser entregue pelo gerador, utilizando o programa desenvolvido no Scilab, conforme Apêndice B. Tal programa modela a LT através de quadripolos e encontra a tensão e corrente no terminal gerador, além das demais variáveis envolvidas no cálculo. Os resultados encontrados através do programa são dados na Tabela 8, o termo 3f representa valores trifásicos.

Tabela 8 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Pesada.

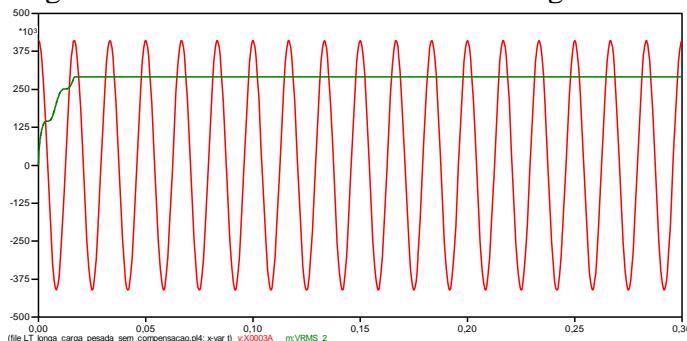
Variável	Valor Calculado	Unidade
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	kV
Fase da tensão no terminal receptor	0	°
Potência ativa 3f no terminal receptor	1666,67	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	p.u.
Tensão de pico de fase no terminal emissor	478,22	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	338,15	kV
Fase da tensão no terminal emissor	33,67	°
Potência ativa 3f no terminal emissor	1753,03	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	635,5	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	0,94	p.u.

Fonte: Autor (2021).

Observa-se que para atender a condição de tensão nominal na carga a tensão no gerador deve-se ter módulo e fase conforme Tabela 8. Com isso ajusta-se o módulo da fonte de tensão trifásica do ATP para tal condição e executa-se a simulação. O circuito simulado no ATP já foi mostrado na Figura 23. O tempo de simulação foi de 0,3 s.

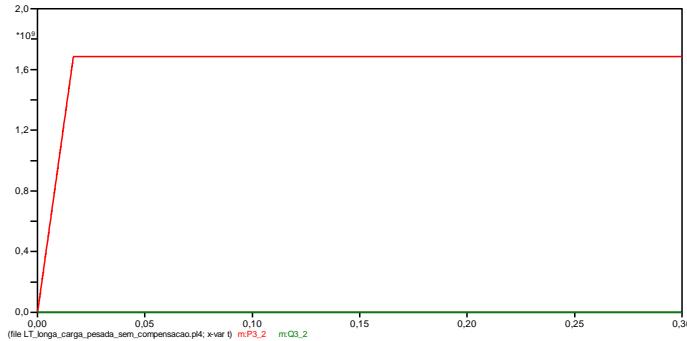
A partir da simulação obtiveram-se no terminal receptor (TR) as tensões de pico e RMS, conforme Figura 24, a potência trifásica, conforme Figura 25, e o fator de potência, na Figura 26.

Figura 24 – Tensão no TR da LT sob Carga Pesada.



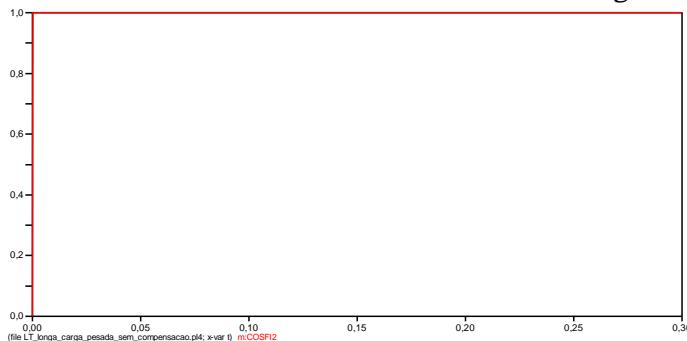
Fonte: ATP (2021).

Figura 25 – Potência 3f no TR da LT sob Carga Pesada.



Fonte: ATP (2021).

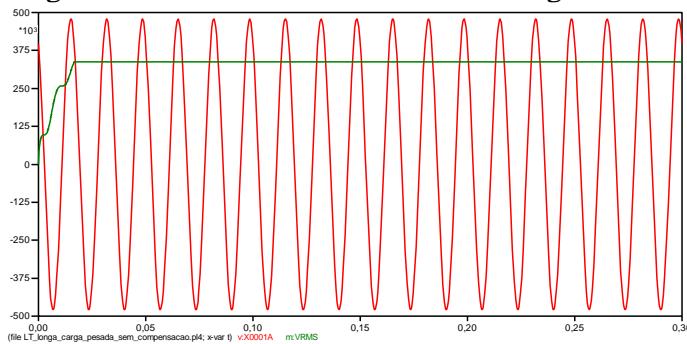
Figura 26 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Pesada.



Fonte: ATP (2021).

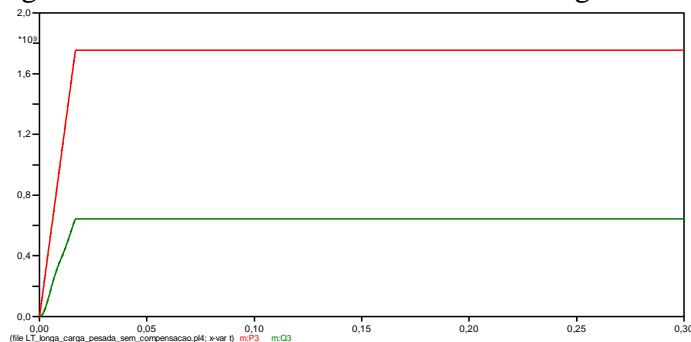
Da mesma forma obteve-se a tensão, a potência trifásica e o fator de potência no terminal emissor (TE), representados na Figura 27, Figura 28 e Figura 29 respectivamente.

Figura 27 – Tensão no TE da LT sob Carga Pesada.



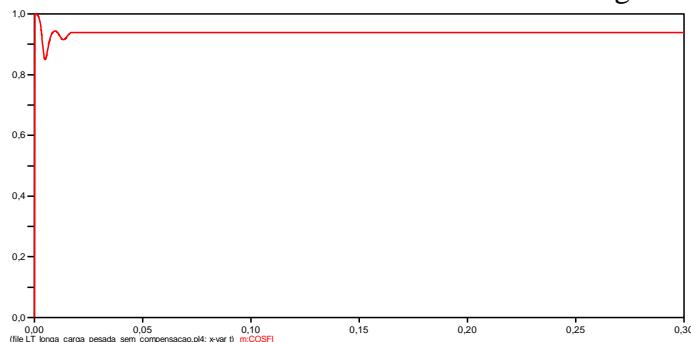
Fonte: ATP (2021).

Figura 28 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Pesada.



Fonte: ATP (2021).

Figura 29 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Pesada.



Fonte: ATP (2021).

De modo comparativo os valores medidos e os valores calculados da Tabela 8, foram compilados, são dados na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparaçāo de Variáveis na LT sob Carga Pesada.

Variável	Valor	Valor Medido	Unidade
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	410,44	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	290,23	kV
Potência ativa 3f no terminal receptor	1666,67	1684,6	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	1	p.u.
<hr/>			
Tensão de pico de fase no terminal emissor	478,22	478,22	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	338,15	338,15	kV
Potência ativa 3f no terminal emissor	1753,03	1753,2	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	635,5	643,97	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	0,94	0,939	p.u.

Fonte: Autor (2021).

5.1.1.2 Carga Pesada com Compensação

Da mesma forma que no caso sem compensação, primeiramente realizou-se a simulação no Scilab, de modo a se obter a tensão e a corrente na entrada da LT. Neste caso para o cálculo da compensação utilizou-se a metodologia fundamentada neste trabalho.

Como evidenciado no caso sem compensação, a LT sob condição de carga pesada atua absorvendo reativo do sistema, tal que a geração de reativos através de elementos capacitivos é necessária. Optou-se pela compensação série através de bancos de capacitores ligados em série para realizar a compensação, em ambos os terminais da LT e com fator de compensação de 75%. O programa de cálculo se encontra no Apêndice B. Tal programa realiza a compensação da LT através de quadripolos e encontra as variáveis em ambos os terminais da linha no sistema compensado. Esses valores são listados na Tabela 10.

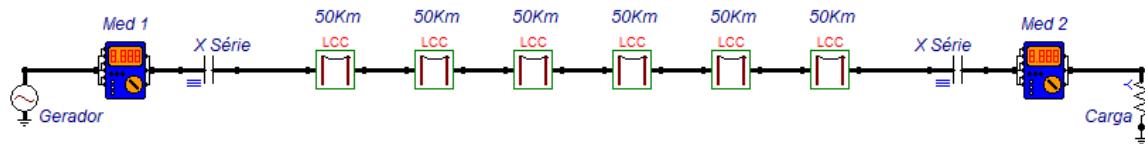
Tabela 10 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Pesada Compensada.

Variável	Valor	Unidade
Reatância do compensador	36,17	Ω
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	kV
Fase da tensão no terminal receptor	0	°
Potência ativa 3f no terminal receptor	1666,67	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	p.u.
Tensão de pico de fase no terminal emissor	427,97	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	302,62	kV
Fase da tensão no terminal emissor	10,41	°
Potência ativa 3f no terminal emissor	1757,24	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	-79,66	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	1	p.u.

Fonte: Autor (2021).

Então com o valor da reatância dos compensadores utilizados e os valores de magnitude e fase da tensão no gerador, ajustou-se o circuito simulado para tal condição conforme Figura 30. O tempo de simulação foi de 0,3 s.

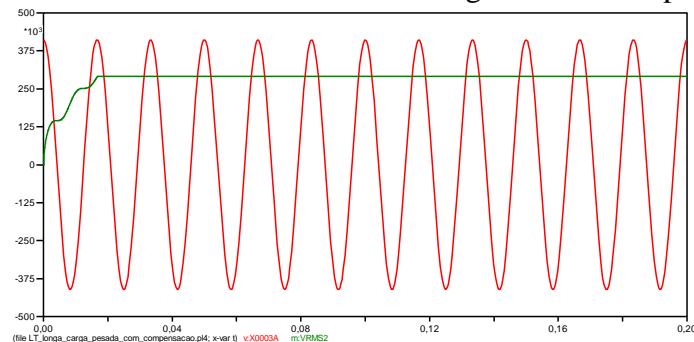
Figura 30 – Modelagem da LT com Compensação Série Capacitativa.



Fonte: ATP (2021).

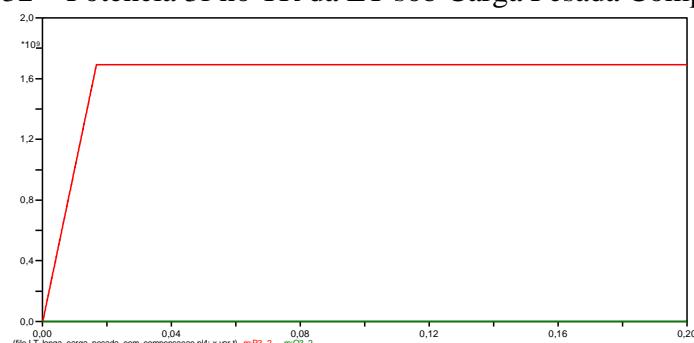
A partir da simulação obtiveram-se no terminal receptor (TR) as tensões de pico e RMS conforme Figura 31, a potência trifásica conforme Figura 32 e o fator de potência conforme Figura 33.

Figura 31 – Tensão no TR da LT sob Carga Pesada Compensada.



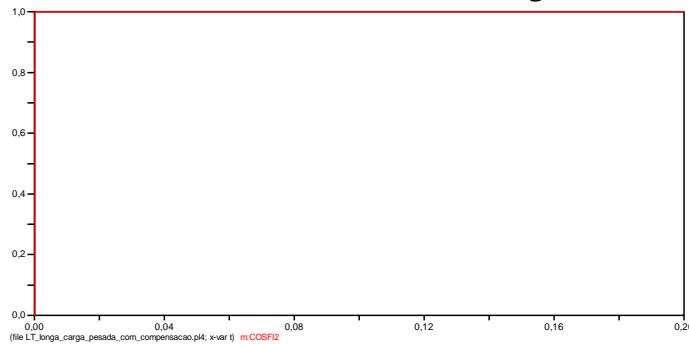
Fonte: ATP (2021).

Figura 32 – Potência 3f no TR da LT sob Carga Pesada Compensada.



Fonte: ATP (2021).

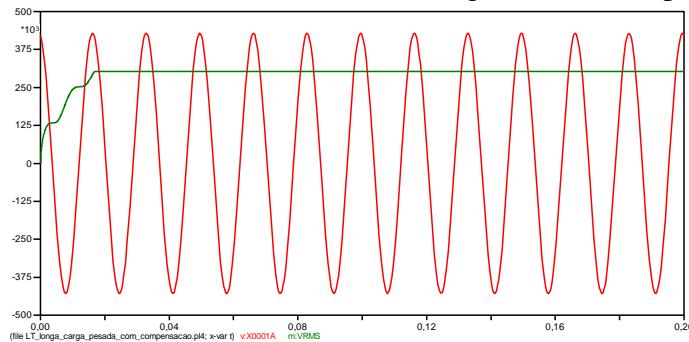
Figura 33 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Pesada Compensada.



Fonte: ATP (2021).

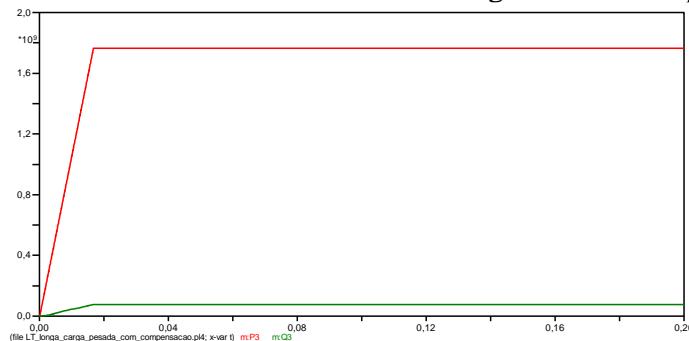
Da mesma forma foi obtida a tensão, a potência trifásica e o fator de potência no terminal emissor (TE), na situação de linha compensada. Apresentados na Figura 34, na Figura 35 e na Figura 36, respectivamente.

Figura 34 – Tensão no TE da LT sob Carga Pesada Compensada



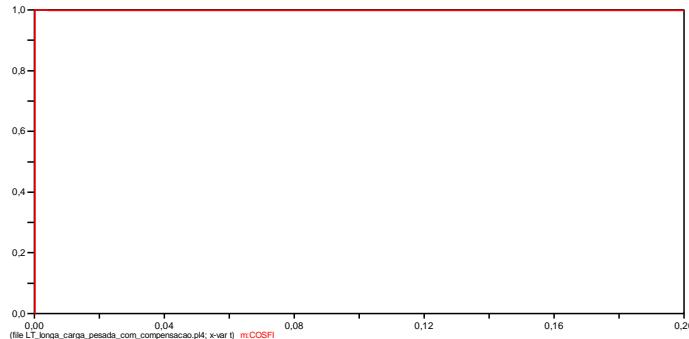
Fonte: ATP (2021).

Figura 35 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Pesada Compensada.



Fonte: ATP (2021).

Figura 36 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Pesada Compensada.



Fonte: ATP (2021).

De modo comparativo os valores medidos e os valores calculados da Tabela 10 foram compilados, são dados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparaçāo de Variáveis na LT sob Carga Pesada Compensada.

Variável	Valor	Valor Medido	Unidade
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	411,26	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	290,81	kV
Potência ativa 3f no terminal receptor	1666,67	1691,4	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	1	p.u.
<hr/>			
Tensão de pico de fase no terminal emissor	427,97	427,97	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	302,62	302,62	kV
Potência ativa 3f no terminal emissor	1757,24	1764,3	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	-79,66	76,262	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	1	0,999	p.u.

Fonte: Autor (2021).

5.1.2 Carga Leve

Assim com realizado na condição de carga pesada, para simular a condição de carga leve na linha de transmissão utilizou-se como base o parâmetro da impedância característica de sequência positiva da linha obtido do modelo LCC, com valor de 256Ω por fase. Como a carga leve é caracterizada por potência ativa entregue menor que a SIL, e dadas as relações de potência explicadas na fundamentação teórica, optou-se por uma carga com impedância fixa de 500Ω por fase, simulada através de um banco de resistores trifásicos.

5.1.2.1 Carga Leve sem Compensação

Como na condição de carga anterior calcula-se qual tensão deve ser entregue pelo gerador, utilizando o programa desenvolvido no Scilab, conforme Apêndice B. Os resultados encontrados são dados na Tabela 12.

Tabela 12 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Leve.

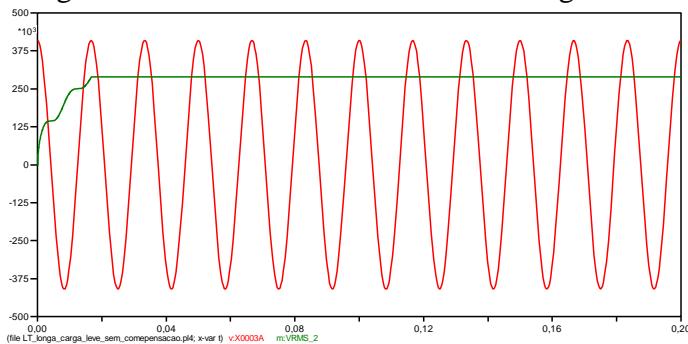
Variável	Valor	Unidade
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	kV
Fase da tensão no terminal receptor	0	°
Potência ativa 3f no terminal receptor	500	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	p.u.
<hr/>		
Tensão de pico de fase no terminal emissor	392,66	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	277,65	kV
Fase da tensão no terminal emissor	11,95	°
Potência ativa 3f no terminal emissor	511,85	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	-256,19	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	0,89	p.u.

Fonte: Autor (2021).

Novamente, para atender a condição de tensão nominal na carga, a tensão no gerador deve ter módulo e fase conforme valores obtidos, dados na Tabela 12. Com isso ajusta-se o módulo da fonte de tensão trifásica do ATP para tal condição e executa-se a simulação. O circuito simulado no ATP já foi mostrado na Figura 23. O tempo de simulação foi de 0,3 s.

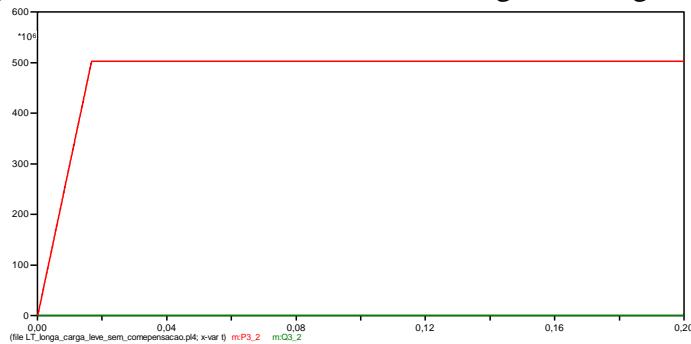
As simulações da Figura 37, da Figura 38 e da Figura 39 representam, respectivamente, a tensão, a potência trifásica e o fator de potência do terminal receptor (TR).

Figura 37 – Tensão no TR da LT sob Carga Leve.



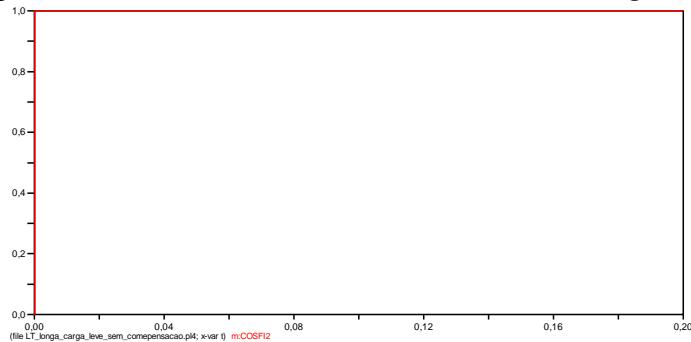
Fonte: ATP (2021).

Figura 38 – Potência 3f no TR da LT Longa sob Carga Leve.



Fonte: ATP (2021).

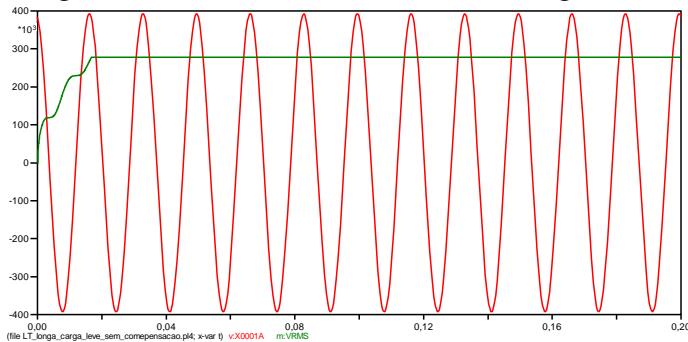
Figura 39 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Leve.



Fonte: ATP (2021).

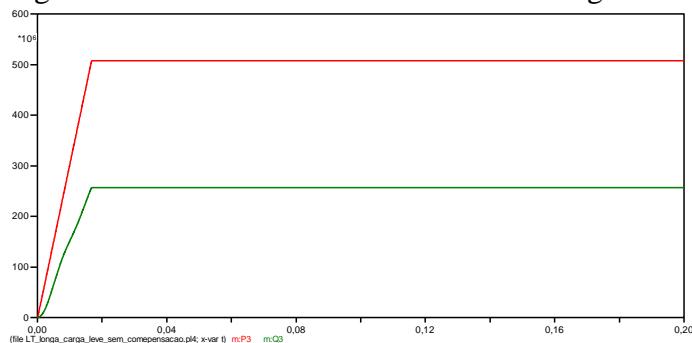
Da mesma forma obteve-se a tensão, a potência trifásica e o fator de potência no terminal emissor (TE). Representados na Figura 40, na Figura 41 e na Figura 42, respectivamente.

Figura 40 – Tensão no TE da LT sob Carga Leve.



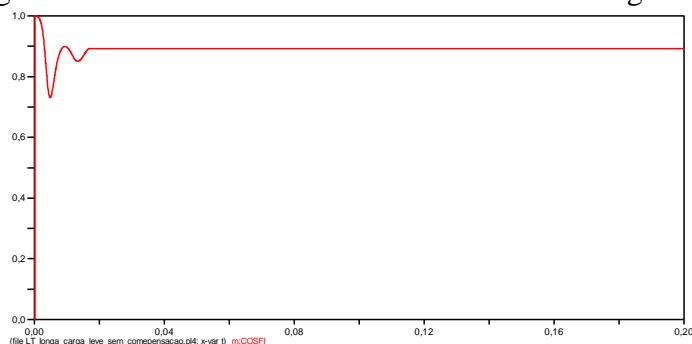
Fonte: ATP (2021).

Figura 41 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Leve.



Fonte: ATP (2021).

Figura 42 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Leve.



Fonte: ATP (2021).

De modo comparativo os valores medidos e os valores calculados da Tabela 12 foram compilados, são dados na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação de Variáveis na LT sob Carga Leve.

Variável	Valor	Valor Medido	Unidade
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	409,28	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	289,41	kV
Potência ativa 3f no terminal receptor	500	502,28	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	1	p.u.
Tensão de pico de fase no terminal emissor	392,66	392,66	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	277,65	277,65	kV
Potência ativa 3f no terminal emissor	511,85	507,83	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	-256,19	-257,1	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	0,89	0,89	p.u.

Fonte: Autor (2021).

5.1.2.2 Carga Leve com Compensação

Como evidenciado no caso sem compensação a LT sob condição de carga leve atua gerando reativo ao sistema, com isso a absorção de reativos através de elementos indutivos é necessária. Optou-se por bancos de reatores em derivação para realizar a compensação, em ambos os terminais da LT e com fator de compensação de 75%. O programa de cálculo se encontra no Apêndice B, cujos valores calculados são listados na Tabela 14.

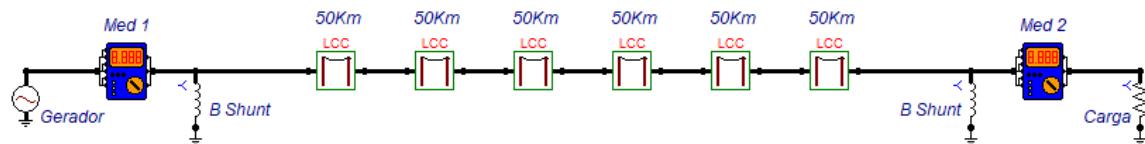
Tabela 14 – Variáveis do Scilab na LT sob Carga Leve Compensada.

Variável	Valor	Unidade
Reatância do compensador	1747,61	Ω
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	kV
Fase da tensão no terminal receptor	0	°
Potência ativa 3f no terminal receptor	500	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	p.u.
Tensão de pico de fase no terminal emissor	414,4	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	293,03	kV
Fase da tensão no terminal emissor	11,08	°
Potência ativa 3f no terminal emissor	511,05	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	0,99	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	1	p.u.

Fonte: Autor (2021).

Então, com o valor da reatância dos compensadores utilizados e os valores de magnitude e fase da tensão no gerador, ajustou-se o circuito simulado para tal condição conforme Figura 43. O tempo de simulação foi de 0,3 s.

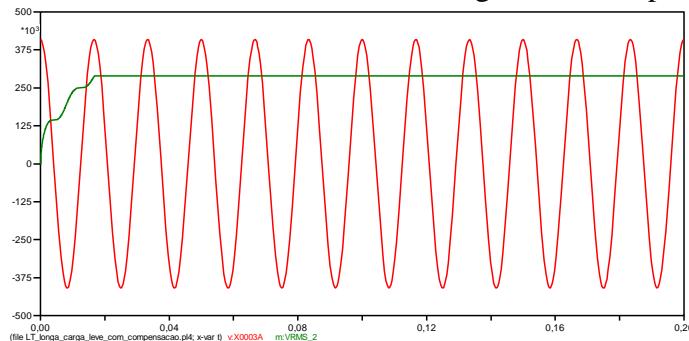
Figura 43 – Modelagem da LT Longa com Compensação Shunt Indutiva.



Fonte: ATP (2021).

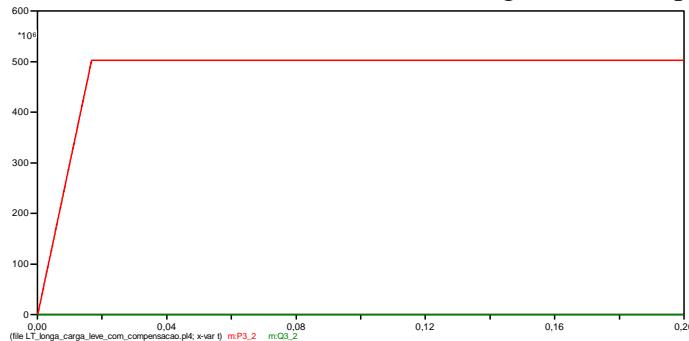
A partir da simulação obtiveram-se no terminal receptor (TR) a tensão conforme Figura 44, a potência trifásica conforme Figura 45 e o fator de potência conforme Figura 46.

Figura 44 – Tensão no TR da LT sob Carga Leve Compensada.



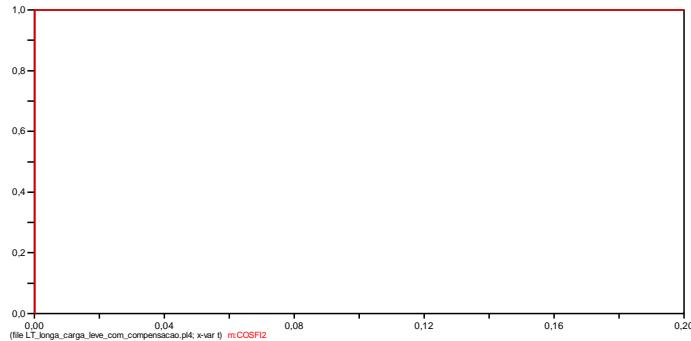
Fonte: ATP (2021).

Figura 45 – Potência 3f no TR da LT sob Carga Leve Compensada.



Fonte: ATP (2021).

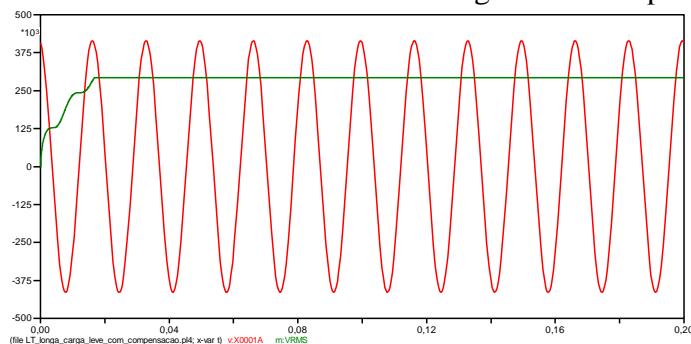
Figura 46 – Fator de Potência no TR da LT sob Carga Leve Compensada.



Fonte: ATP (2021).

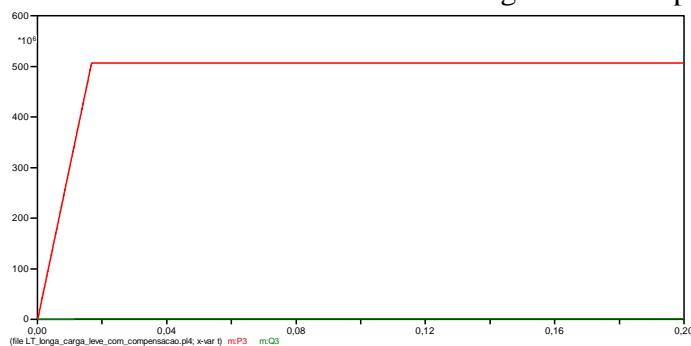
Da mesma forma obteve-se a tensão, a potência trifásica e o fator de potência no terminal emissor (TE), na situação de linha compensada. Apresentados na Figura 47, na Figura 48 e na Figura 49, respectivamente.

Figura 47 – Tensão no TE da LT sob Carga Leve Compensada.



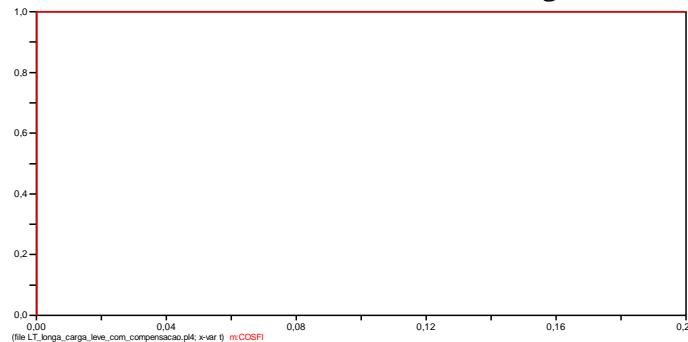
Fonte: ATP (2021).

Figura 48 – Potência 3f no TE da LT sob Carga Leve Compensada.



Fonte: ATP (2021).

Figura 49 – Fator de Potência no TE da LT sob Carga Leve Compensada.



Fonte: ATP (2021).

De modo comparativo os valores medidos e os valores calculados da Tabela 14 foram compilados, são dados na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparaçāo de Variáveis na LT sob Carga Leve Compensada.

Variável	Valor	Valor Medido	Unidade
Tensão de pico de fase no terminal receptor	408,25	409,15	kV
Tensão RMS de fase no terminal receptor	288,68	289,31	kV
Potência ativa 3f no terminal receptor	500	502,21	MW
Potência reativa 3f no terminal receptor	0	0	MVAR
Fator de potência no terminal receptor	1	1	p.u.
<hr/>			
Tensão de pico de fase no terminal emissor	414,4	414,4	kV
Tensão RMS de fase no terminal emissor	293,03	293,03	kV
Potência ativa 3f no terminal emissor	511,05	506,51	MW
Potência reativa 3f no terminal emissor	0,99	0,74	MVAR
Fator de potência no terminal emissor	1	1	p.u.

Fonte: Autor (2021).

5.1.3 Manobra

Para simular a manobra de religamento monofásico, optou-se pela LT a vazio, terminal receptor aberto. O terminal aberto caracteriza resistência infinita, com isso a LT opera sob condição de carga mínima, muito abaixo da SIL. Nessa condição ocorre o maior aumento de tensão devido ao efeito Ferranti, logo, quanto mais próximo do terminal receptor, maior o efeito, pela distância da fonte. Nesse ponto e sob essa carga ocorre maior corrente de arco secundário, devida a alta tensão e com isso é mais provável a não extinção natural do arco.

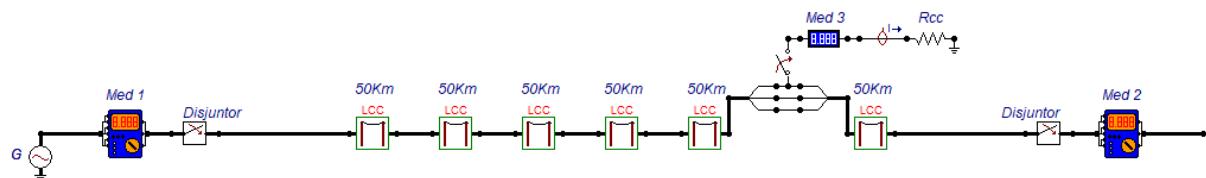
Para atender tal condição na simulação, optou-se por falta monofásica na fase A antes do último trecho de 50 km, em um tempo de simulação de 0,05 s, utilizando chaveamento do

ATP e resistência de falta de 50Ω (valor utilizado na literatura para curto-círcuito). Os disjuntores trifásicos do ATP foram então alocados nas extremidades da LT e programados para realizar a abertura da fase A em um tempo de simulação de 0,2 s. Além disso colocou-se medidores de corrente sob a resistência de falta para medição do arco secundário, o medidor RMS monofásico é também explicado no Apêndice A. O tempo total de simulação foi de 1 s. A tensão do gerador foi estabelecida como tensão nominal. Ressalta-se que, desse modo, o tempo entre a falta e a atuação do disjuntor foi de 0,15 s.

5.1.3.1 Manobra sem Compensação

A linha sem compensação simulada para as condições de manobra supracitadas é dada na Figura 50.

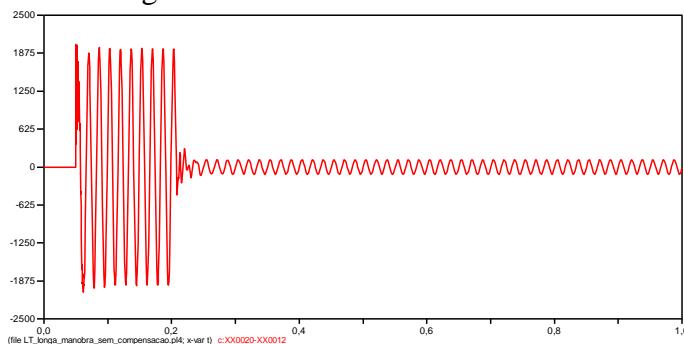
Figura 50 – Circuito da LT Para Manobra Monofásica.



Fonte: ATP (2021).

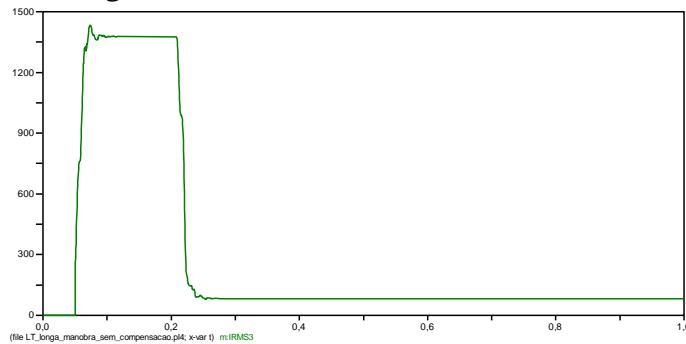
Após simular para o tempo estabelecido, obteve-se os resultados de corrente no ponto de falta, de corrente dado pela Figura 51 e de corrente RMS dado pela Figura 52.

Figura 51 – Corrente de Falta da LT.



Fonte: ATP (2021).

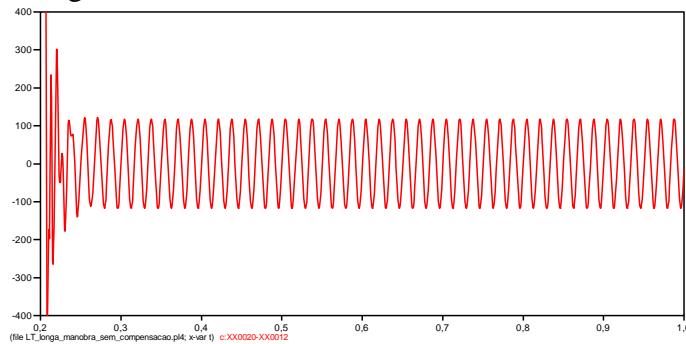
Figura 52 – Corrente RMS de Falta da LT.



Fonte: ATP (2021).

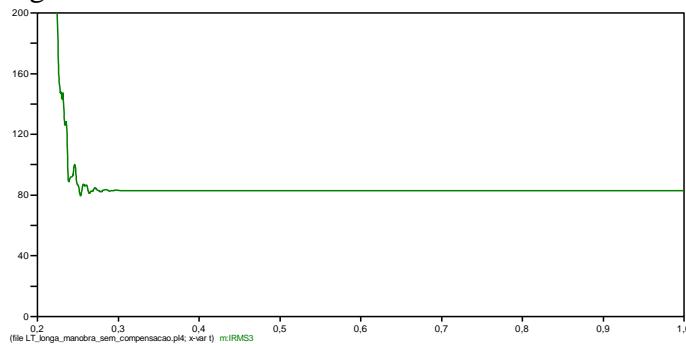
Conforme já explicado a corrente de arco secundário é resultado da influência eletromagnética das fases B e C que continuam em operação após abertura da fase A. Como foi programada a abertura da fase A em um tempo de simulação de 0,2 s, a Figura 53 e a Figura 54 representam apenas as correntes de arco secundário, sem a parcela de arco primário, ou seja, após um tempo de simulação de 0,2 s.

Figura 53 – Corrente de Arco Secundário da LT.



Fonte: ATP (2021).

Figura 54 – Corrente de Arco Secundário RMS da LT.



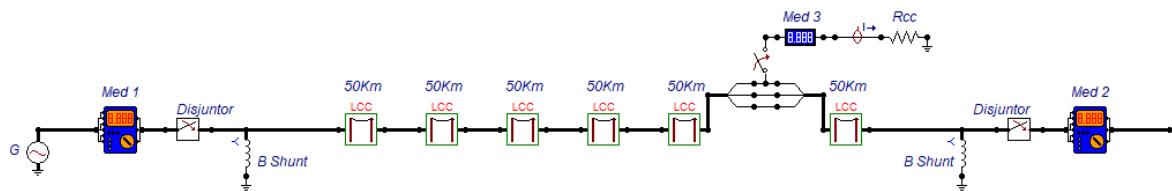
Fonte: ATP (2021).

Mediu-se 83,02 A de corrente de arco secundário, medição em 0,9 s, tempo suficiente para estabilização do transitório.

5.1.3.2 Manobra com Compensação

A teoria explicitou que a compensação ajuda a diminuir a corrente de arco secundário, então, para verificar tal influência utilizou-se os mesmos reatores dimensionados com 75% de compensação para a condição de carga leve estudada. A Figura 55 mostra o circuito da LT longa sob falta monofásica na fase A, religamento e com compensação em derivação indutiva.

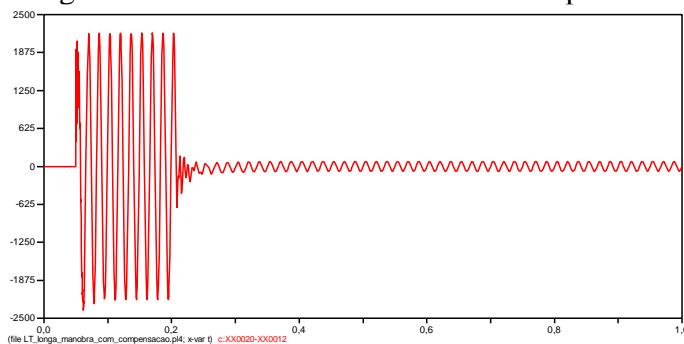
Figura 55 – Circuito de Manobra da LT Compensada.



Fonte: ATP (2021).

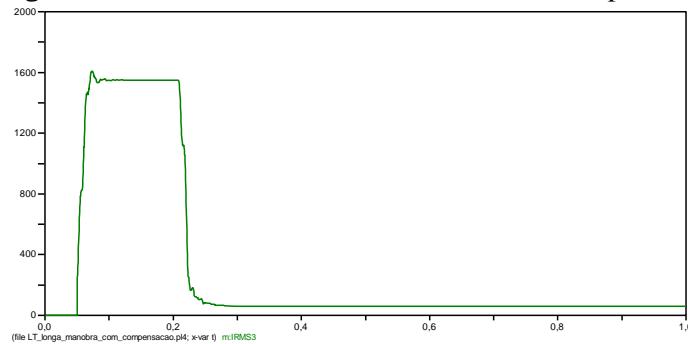
Com a simulação obteve-se os resultados de corrente no ponto de falta para o caso da LT compensada, que são apresentados na Figura 56 e na Figura 57.

Figura 56 – Corrente de Falta da LT Compensada



Fonte: ATP (2021).

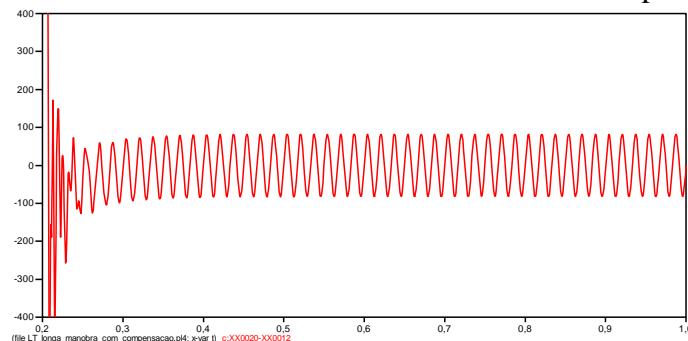
Figura 57 – Corrente RMS de Falta da LT Compensada



Fonte: ATP (2021).

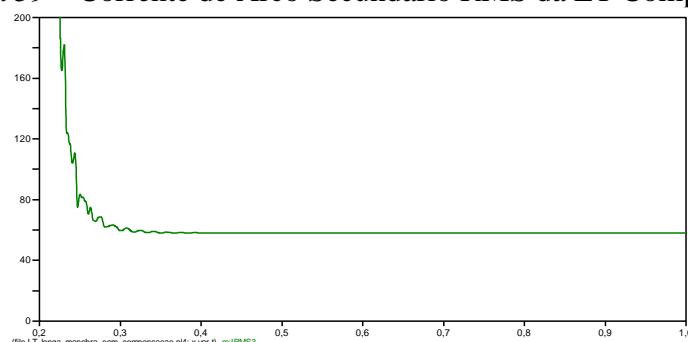
Para ilustrar a parcela referente ao arco secundário, assim como no caso sem compensação, mostra-se os resultados apenas após 0,2 s de simulação na Figura 58 e na Figura 59.

Figura 58 – Corrente de Arco Secundário da LT Compensada.



Fonte: ATP (2021).

Figura 59 – Corrente de Arco Secundário RMS da LT Compensada



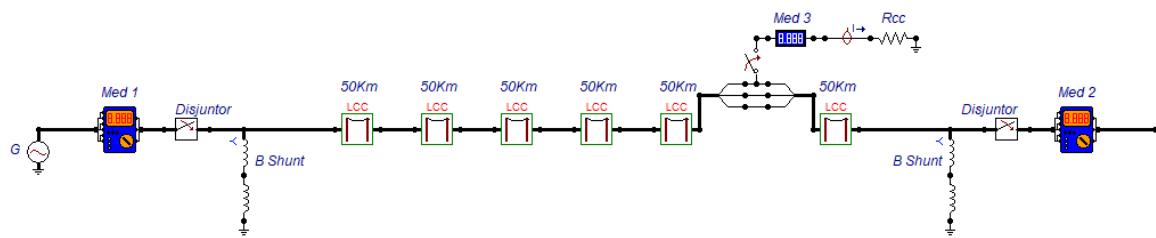
Fonte: ATP (2021).

Com isso mediu-se 58,11 A de corrente de arco secundário, medição em 0,9 s, tempo suficiente para estabilização do transitório.

5.1.3.3 Manobra com Compensação e com Reator de Neutro

A teoria mostra que o reator de neutro (RN) possibilita diminuir ainda mais a corrente de arco secundário. Como não foi escopo deste trabalho a otimização do reator de neutro, optou-se por valores aceitáveis na literatura. Após experimentar alguns valores na simulação (variou-se o reator de neutro e verificou-se o resultado da corrente de arco secundário) foi escolhido o valor de reatância de 680Ω para cada um dos reatores de neutro das extremidades da LT. A Figura 60 representa o circuito simulado.

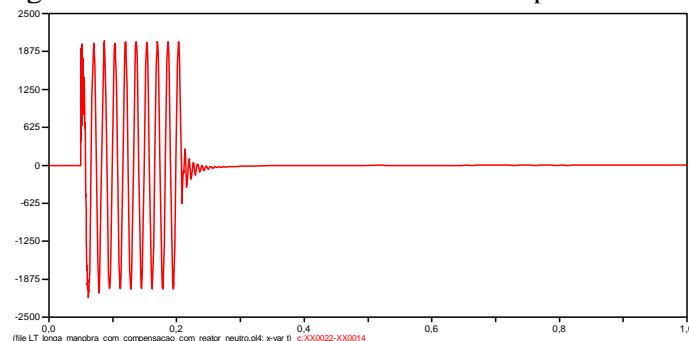
Figura 60 – Circuito de Manobra da LT Compensada e Com RN.



Fonte: ATP (2021).

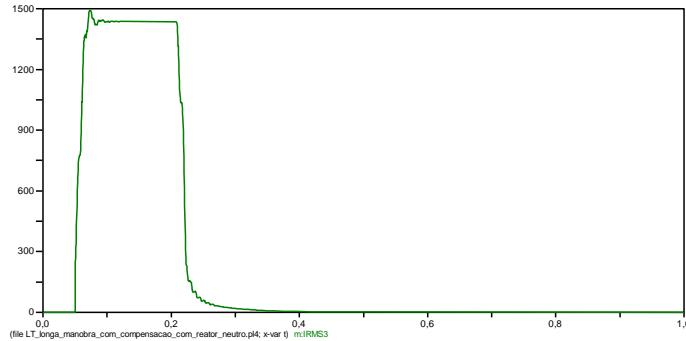
Com a simulação obteve-se os resultados da corrente no ponto de falta para o caso da LT compensada e com reator de neutro. Os resultados são dados na Figura 61 e na Figura 62.

Figura 61 – Corrente de Falta da LT Compensada e RN



Fonte: ATP (2021).

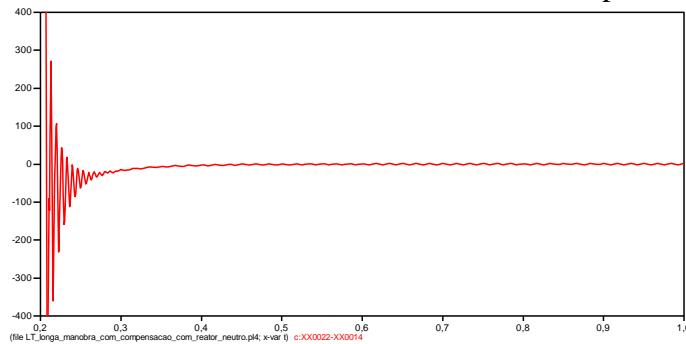
Figura 62 – Corrente RMS de Falta da LT Compensada e RN



Fonte: ATP (2021).

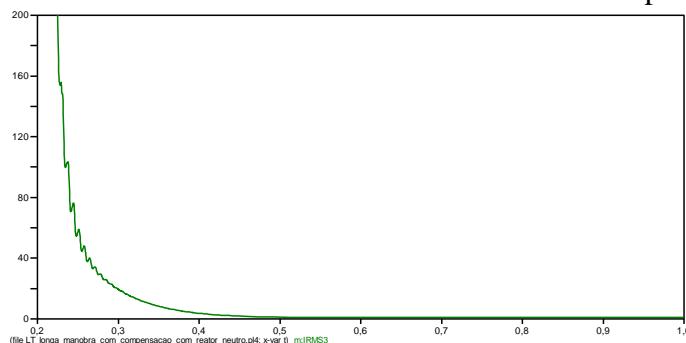
Para ilustrar a parcela referente ao arco secundário, assim como nos casos anteriores mostra-se os resultados apenas após 0,2s de simulação, conforme a Figura 63 e a Figura 64.

Figura 63 – Corrente de Arco Secundário da LT Compensada e RN.



Fonte: Autor (2021).

Figura 64 – Corrente de Arco Secundário RMS da LT Compensada e RN



Fonte: Autor (2021).

Verificou-se que com a inserção do reator de neutro a corrente de arco secundário se estabilizou em 1,02 A, medida em 0,9 s.

Esse valor foi encontrado para 680Ω de reatância de neutro. Conforme explicado anteriormente esse valor não foi otimizado através de métodos matemáticos, testou-se alguns valores na simulação e escolheu-se um valor aceitável. A Tabela 16 mostra a corrente RMS medida para outros valores de reatância de neutro.

Tabela 16 – Corrente de Arco Secundário RMS na LT com RN

Reatância (Ω)	Corrente Arco Secundário RMS (A)
100	42,66
200	31,00
300	21,90
400	14,60
500	8,62
600	3,69
700	1,24
800	4,48
900	7,60
1000	10,36
1100	12,80
1200	14,97
1300	16,93
1400	18,70

Fonte: Autor (2021).

5.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico será interpretado os resultados obtidos a partir das simulações desenvolvidas no tópico anterior, para tal finalidade será averiguada a eficiência da modelagem no ATP se comparada ao cálculo de quadripolos, será explanado sobre a influência da compensação em cada um dos casos de carga estudados, será também verificada a diferença percentual entre os valores calculados e os valores medidos na simulação e, além disso, será comparado os resultados de cada uma das situações de manobra simuladas.

5.2.1 Resultados da Modelagem da Linha de Transmissão

O primeiro passo realizado nas simulações foi a modelagem LT através do módulo LCC do ATP. Observou-se que após realizar a inserção de dados dos condutores no modelo foi possível obter os parâmetros da LT estudada, como mostrado na Tabela 7.

Esses resultados se mostraram satisfatórios, pois ao inserir os valores no programa de cálculo do Apêndice B, obtiveram-se as mesmas variáveis de entrada e saída da linha que aquelas medidas nas simulações desenvolvidas, além disso, os valores dos parâmetros estão de acordo com valores de LTs de mesmo porte vistas na literatura.

5.2.2 Resultados com Carga Pesada

Para a condição de carga pesada foi escolhido um valor de 150Ω de carga no terminal receptor da LT, atendido sob condição de tensão nominal. Como o módulo da impedância característica da LT estudada é de 256Ω , verifica-se, a partir dos resultados dos cálculos do programa do Apêndice B, que a carga é atendida por uma potência de 1,71 p.u. da SIL. Tal resultado caracteriza uma situação de carga pesada.

A partir dos valores das simulações criou-se a Tabela 17 que mostra a variação de tensão do terminal emissor em comparação à tensão nominal.

Tabela 17 – Tensão de Linha no TE na Situação de Carga Pesada

Sistema	Valor Nominal	Valor Simulado	Variação
Padrão	500 kV	585,69 kV	17,14%
Compensado	500 kV	524,15 kV	4,83%

Fonte: Autor (2021).

Observa-se a partir desses resultados que a LT não compensada necessita de uma tensão muito elevada para fornecer alta potência à carga sob tensão nominal, isso pois a LT absorve muita potência reativa em tal situação, com grande queda de tensão. Já quando se compensa o sistema aumenta-se o carregamento da LT, ou seja, é possível transmitir mais potência sem ultrapassar limites aceitáveis de tensão no sistema.

Da mesma forma que para a tensão, é resgatado das simulações o fator de potência para a LT com e sem compensação, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Fator de Potência no TE na Situação de Carga Pesada

Sistema	Valor Simulado
Padrão	0,94
Compensado	1

Fonte: Autor (2021).

Observa-se que na ausência de compensação o fator de potência no terminal emissor é baixo, mas quando se compensa o sistema o fator de potência é aproximado para o valor unitário. Isso ocorre pois na LT não compensada o terminal receptor está recebendo apenas potência ativa e como a carga é pesada, a LT opera absorvendo reativos do sistema, mas quando colocada a compensação os capacitores em série geram a demanda de reativo da LT e desse modo entrega-se majoritariamente potência ativa à linha.

Nas simulações foram obtidas mais algumas variáveis para comparação com os valores calculados. O erro relativo entre as variáveis calculadas e as medidas são dados na Tabela 19.

Tabela 19 – Erros Relativos na Situação de Carga Pesada.

Variável	Erro Relativo			
	TR	TR Compensado	TE	TE Compensado
Tensão de pico	0,54%	0,74%	0,00%	0,00%
Tensão RMS	0,54%	0,74%	0,00%	0,00%
Potência ativa 3f	1,08%	1,48%	0,01%	0,40%
Potência reativa 3f	0,00%	0,00%	1,33%	4,27%
Fator de potência	0,00%	0,00%	0,11%	0,10%

Fonte: Autor (2021).

Observa-se que os valores calculados e medidos contêm erros aceitáveis. Tais valores não são exatos, visto que os modelos de quadripolos do programa de cálculo não consideram os acoplamentos eletromagnéticos entre as fases, enquanto o simulador considera. Observa-se maior influência de erro na potência reativa trifásica do emissor do sistema compensado, pois após a compensação existe pouca potência reativa no terminal emissor e com isso os efeitos do acoplamento entre fases são mais acentuados.

5.2.3 Resultados com Carga Leve

Para a condição de carga leve foi escolhido um valor de 500Ω de carga no terminal receptor da LT, atendido sob condição de tensão nominal. Como o módulo da impedância característica da LT estudada é de 256Ω , verifica-se, a partir dos resultados dos cálculos do programa do Apêndice B, que a carga é atendida por uma potência de 0,513 p.u. da SIL. Tal resultado caracteriza a situação de carga leve.

A partir dos valores das simulações criou-se Tabela 20 que mostra a variação de tensão do terminal emissor em comparação à tensão nominal.

Tabela 20 – Tensão de Linha no TE na Situação de Carga Leve

Sistema	Valor Nominal	Valor Simulado	Variação
Padrão	500 kV	480,91 kV	3,82%
Compensado	500 kV	507,54 kV	1,51%

Fonte: Autor (2021).

A partir desses valores observa-se que a tensão no terminal emissor foi inferior à tensão nominal para condição sem compensação, visto que ocorre feito Ferranti, ou seja, existe uma elevação de tensão em função do comprimento da LT, e pelo fato de a carga estar em tensão nominal. Já quando colocada a compensação tal efeito não é mais observado, observa-se apenas a elevação de tensão para que a carga seja atendida sob tensão nominal.

Da mesma forma que para a tensão, é resgatado das simulações o fator de potência para a LT com e sem compensação, conforme Tabela 21.

Tabela 21 – Fator de Potência no TE na Situação de Carga Leve

Sistema	Valor Simulado
Padrão	0,89
Compensado	1

Fonte: Autor (2021).

Observa-se que na ausência de compensação o fator de potência no terminal emissor é bastante baixo, mas quando se compensa o sistema o fator de potência é aproximado para o valor unitário. Isso ocorre pois na LT não compensada o terminal receptor está recebendo apenas potência ativa e a carga é leve, assim, nessa situação a LT opera gerando reativos ao sistema, já quando colocada a compensação em derivação os reatores absorvem o excesso de reativo gerado elevando o fator de potência.

Nas simulações foram obtidas mais algumas variáveis e comparadas com os valores calculados. O erro relativo entre as variáveis calculadas e as medidas são dados na Tabela 22.

Tabela 22 – Erros Relativos na Situação de Carga Leve.

Variável	Erro Relativo			
	TR	TR Compensado	TE	TE Compensado
Tensão de pico	0,25%	0,22%	0,00%	0,00%
Tensão RMS	0,25%	0,22%	0,00%	0,00%
Potência ativa 3f	0,46%	0,44%	0,79%	0,89%
Potência reativa 3f	0,00%	0,00%	0,36%	24,24%
Fator de potência	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor (2021).

Observa-se novamente que os valores calculados e medidos estão com erros aceitáveis e mais uma vez constata-se maior influência de erro na potência reativa trifásica do sistema já compensado (pelas mesmas razões descritas no tópico anterior).

5.2.4 Resultados com Manobra

Para as simulações de manobra de religamento monopolar não se considerou os cálculos matemáticos através de programas de cálculo, apenas simulou-se o sistema no ATP para observar os transitórios e medir a corrente de arco secundário após estabilização. O levantamento de resultados obtidos dessas simulações é dado na Tabela 23.

Tabela 23 – Corrente de Arco Secundário na Manobra Monopolar

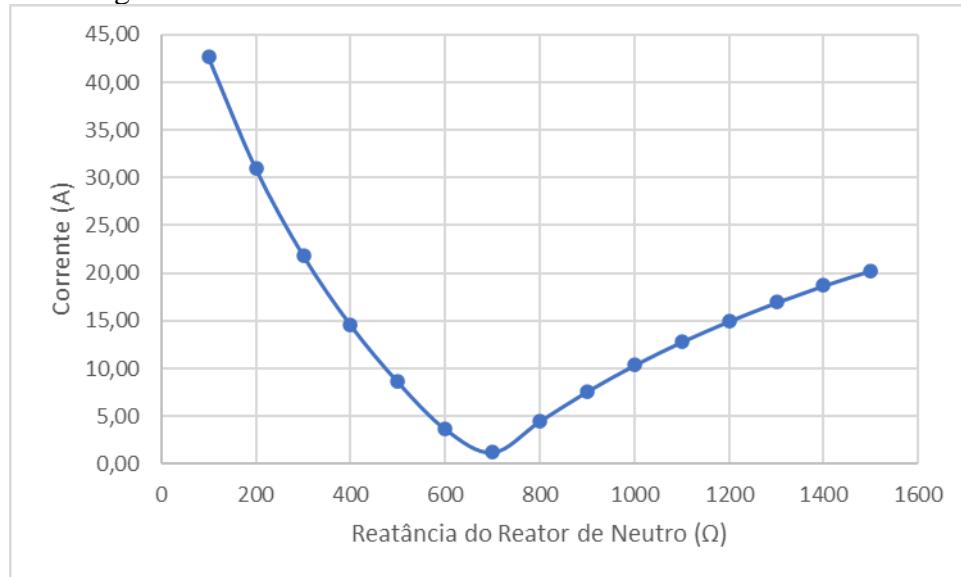
Sistema	Corrente de Arco Secundário Eficaz
Padrão	83,02 A
Compensado	58,11 A
Compensado com RN	1,02 A

Fonte: Autor (2021).

Constata-se que o sistema não compensado tem corrente de arco secundário de 83,02 A eficazes (tal valor é superior a 50 A eficazes, valor máximo estabelecido na teoria para provável extinção natural do arco). Para a LT compensada o valor de corrente é de 58,11 A eficazes (superior àquele estabelecido para extinção), entretanto observa-se melhora se comparado a linha não compensada. Ao adicionar o reator de neutro de 680Ω , valor próximo do otimizado, observa-se grande melhora na corrente de arco secundário que é reduzida para 1,02 A eficaz, ou seja, esse valor mostra que nesse sistema o arco secundário se extinguirá naturalmente.

Além desses resultados, observou-se nas simulações de manobra que a variação do reator de neutro resulta em variação da corrente de arco secundário, sendo tais valores apresentados na Tabela 16. Para interpretar esses resultados traçou-se uma curva que representa a corrente de arco secundário em função da reatância de neutro para o sistema estudado, exibida de forma gráfica na Figura 65.

Figura 65 – Corrente de Arco Secundário RMS na LT com RN



Fonte: Autor (2021).

O gráfico mostra que existe um valor ótimo para a reatância de neutro a ser instalada no sistema. Observa-se que para valores pequenos de reatância o valor da corrente de arco secundário se aproxima do valor obtido na simulação sem compensação, pois o sistema com reatância igual a zero equivale a não conectar o reator. Para valores muito elevados, ocorre algo semelhante, pois essa conexão é equivalente a um circuito aberto no ponto comum dos reatores em derivação, verifica-se para essa condição os valores retornando a níveis probabilisticamente não extingüíveis, acima de 50 A eficazes.

Com isso verifica-se que na LT estudada pode ser realizada a manobra monopolar, desde que esteja com a compensação e o reator de neutro devidamente dimensionados. Nos experimentos observou-se que existe uma faixa de valores de reator de neutro que permitem a manobra, mas a otimização é uma boa prática.

6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi estudada a teoria de transmissão de energia elétrica com ênfase em dois pontos: compensação reativa e manobras de religamento em LTs. Para verificar na prática a teoria, optou-se por calcular os parâmetros de uma LT longa de 500 kV e 300 km, modelá-la através de quadripolos e simular seu funcionamento em regime permanente e transitório.

Quanto à teoria de transmissão de energia elétrica, observou-se que linhas de transmissão podem ser modeladas por quadripolos que representam as equações de propagação das ondas eletromagnéticas de tensão e corrente. Tais modelos podem ser implementados de modo prático em modelos computacionais, o que permite a obtenção de tensão e corrente em qualquer ponto da LT, além das potências ativa e reativa no ponto estudado.

Após implementação da teoria de transmissão nas simulações, a semelhança dos resultados entre os valores calculados através de quadripolos e os valores medidos no simulador foi notória. Tal resultado permitiu a demonstração da teoria estudada.

Quanto à teoria de compensação reativa de linhas de transmissão, observou-se que acoplar elementos reativos em LTs longas permite manter as tensões e correntes dentro de limites aceitáveis, o que resulta em melhoria da estabilidade do sistema. Constatou-se que para cada situação existe um esquema de ligação mais adequado, mas que elementos capacitivos ligados em série e elementos indutivos ligados em derivação são mais eficientes na correção dos efeitos reativos da linha.

Após implementação da teoria de compensação reativa nas simulações, percebeu-se na prática alguns dos efeitos estudados na teoria. Foi possível perceber que quando a LT estudada operava com potência ativa acima da SIL, a queda de tensão era acentuada e o fator de potência baixo (o que não permitia transportar a potência requerida pela carga), após ligado um banco de capacitores em série a capacidade de transmissão foi ampliada, as variáveis ficaram em limites aceitáveis para operação. Notou-se também que quando a LT operava com potência ativa abaixo da SIL, o efeito Ferranti era acentuado e o fator de potência baixo, após compensada com reatores em derivação, tais efeitos foram mitigados e a linha foi capaz de entregar baixa potência a carga sem ultrapassar os limites permitidos.

Quanto à teoria de manobras de religamento de linhas de transmissão, reparou-se vantagens da manobra monopolar em relação a tripolar, desde que haja a devida extinção do arco secundário. Entre outros métodos possíveis, a ligação do reator de quatro pernas foi mostrada como uma possibilidade para a extinção natural do arco secundário em linhas longas.

Após implementação da teoria de manobras de religamento nas simulações, contatou-se a eficiência do reator de neutro acoplado ao banco de reatores em derivação para extinção do arco secundário na LT estudada, o que garante a estabilidade durante o procedimento de manobra. Observou-se ainda que a otimização do reator de neutro influencia fortemente a redução do arco secundário na manobra monopolar.

De modo geral todos os objetivos traçados para o trabalho foram concluídos, foi possível revisitá-las e aplicá-las a uma situação prática, como era esperado.

Como sugestões para trabalhos futuros ficam: a comparação da compensação de LTs de diferentes comprimentos e classes de tensão através de simulações; a variação do local a ser instalada a compensação, simulando LTs com mais de dois bancos de compensadores, em diferentes pontos ao longo do comprimento; a compensação para cargas variáveis, modelos de curvas de carga podem ser implementados, necessitando um sistema de controle para adequar o gerador; compensação através de FACTS, comparando tecnologias existentes; mais estudos comparativos entre manobras monopolares e tripolares, quanto a estabilidade, fornecimento e tempo de religamento; comparativo dos efeitos da manobra monopolar entre LTs de diversos comprimentos e classes de tensão; a extinção natural do arco secundário nas manobras monopolares, através de modelagem em ambiente de simulação.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Resolução Normativa Nº 418, 2010.

ATP, Alternative Transients Program. **Rule Book**, EMTP, 1992.

BARBOSA, F. Maciel. Estabilidade De Sistemas Elétricos De Energia. Porto, Portugal: FEUP - Faculdade Engenharia Universidade do Porto, 2013.

CÂMARA, ALESSANDRA S.B., Extinção de Arco Secundário com Manobras Monofásicas. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003

CÂMARA, ALESSANDRA S.B., Modelagem De Arco Elétrico No Ar. Aplicações Em Sistemas De Potência., Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

CIGRE, Brochura Técnica nº 30. Reactive power compensation analyses and planning procedure. (CIGRE), 1989.

CIGRE, International Council On Large Electric Systems. Overhead Lines. Paris, França: Cigre, 2017.

ENGIE, et al. Energy Systems of The Future: integrating variable renewable energy sources in brazil's energy matrix. Brasil, 2019.

EPE. Plano Decenal De Expansão de Energia 2026: Capítulo 4 - Transmissão de Energia Elétrica. Brasil, 2016.

EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above. Terceira Edição, Palo Alto, Califórnia, USA, 2005.

FITZGERALD, A. E.; KINSLEY JR, Charles; UMANS, Sthephen D. Máquinas Elétricas. São Paulo, SP, Editora Bookman, 2006.

FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; Teoria das Linhas em Regime Permanente. Rio de Janeiro, RJ-Brasil. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,1977.

FURNAS. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, EDUFF, 1987.

GLOVER, J. Duncan; OVERBYE, Thomas J.; SARMA, Mulukutla S. Power System Analysis & Design. 6. ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2017.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. Power System Analysis. 1. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1994.

IEEE, Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS), Transactions on Power Delivery, Volume 12, Issue 4, Oct 1997, pp. 1848–1853

ITER. International Thermonuclear Experimental Reactor. Disponível em: <https://www.iter.org/>. Acesso em: 1 maio 2021

KINDERMANN, Geraldo. **Curto Circuito.** 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, vol. 3. Florianópolis, 1^a Edição, 2008.

MARQUES, Laura Eduarda Vieira Pereira. **Aplicação Da Teoria Das Ondas Viajantes Para Detecção, Classificação E Localização De Faltas Em Linhas De Transmissão Utilizando O Software ATP.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2018.

MARTI, J. R. **Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-101, n. 1, p. 147–157, 1982.

ONS. **Diretrizes e critérios para estudos elétricos.** Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2016

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico.** website. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acesso em: 1 maio 2021.

PADIYAR, K. R. **Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems.** Bangalore: LLC, 1999.

PARRA, Fabrício. **Medidores RMS.** Disponível em: <https://sites.google.com/site/engfabricioqee/download/>. Acesso em: 1 maio 2021.

RESENDE, P.H.O. et al, **Compensação Reativa em Linhas de Transmissão Utilizando Compensadores Estáticos Fixos.** UFU, Uberlândia, MG, 2013.

SADIKU, Matthew N. O.; ALEXANDRE, Charles K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

VALE, M.H.M.; CHAVES, F.S.; SILVA, B.A.C. MARIANO L.; VALARDES J.R. **Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão.** UFMG; CEMIG. Belo Horizonte, MG, 2003.

ZEVALLOS, M. E. **Análise de Sensibilidade da Corrente de Arco Secundário para Diferentes Linhas de Transmissão.** 2007. 154 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

ZEVALLOS, M. E. **Otimização de linhas de transmissão para manobra de abertura monopolar:** análise da influência dos parâmetros transversais do sistema de compensação reativa. 2013. 131 f. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2013.

APÊNDICE A – Módulos dos Medidores do ATP

Este apêndice detalhará os módulos dos medidores utilizados no ATP Draw. Estes módulos foram obtidos na referência (PARRA, 2021). Tem como objetivo estimar os valores RMS das grandezas monofásicas e trifásicas, para isso utilizam dos *Probes* de tensão e corrente padrões do ATP e através da linguagem *Models* estimam os valores RMS diretamente no ambiente do programa, sem a necessidade de exportar os dados para um ambiente de programação externo para estimação dos valores. Ressalta-se que tais módulos foram adicionados ao ATP e pouco modificados.

```

MODEL med

INPUT
V_A    -- sinal de tensão da fase A, [V];
V_B    -- sinal de tensão da fase B, [V];
V_C    -- sinal de tensão da fase C, [V];
I_A    -- sinal de corrente da fase A, [A];
I_B    -- sinal de corrente da fase B, [A];
I_C    -- sinal de corrente da fase C, [A];
DATA
freq {dflt:60} -- frequência, [Hz];
VAR
    period   -- Período, [s];
S_3    -- Potência aparente trifásica, [VA];
P_3    -- Potência ativa trifásica, [W];
Q_3    -- Potência reativa trifásica, [VAr];

-----
----- FASE A -----
-----

--%%%%%%%%%%%%% # potências
S_A    -- potência aparente da fase A, [VA];
    P_A    -- potência ativa da fase A, [W];
Q_A    -- potência reativa da fase A, [VAr];
--%%%%%%%%%%%%# tensão
    vrms_A  -- tensão rms, [V];
--%%%%%%%%%%%%# corrente
    irms_A  -- corrente rms, [A];
--%%%%%%%%%%%%# fator de potência
cosfi_A  -- fator de potência
fi_A    -- ângulo do fator de potência, [°].
--%%%%%%%%%%%% variáveis auxiliares
    v2_A
    i2_A
    vi_A
    iv2_A
    ii2_A
    ivi_A
Pmed_A
    vrms_AB   -- tensão rms, [V];
    v2_AB    -- tensão ao quadrado;
    iv2_AB   -- integral tensão ao quadrado;

```

```

----- FASE B -----
--%%%%%%%%%%%%% # potências
S_B -- potência aparente, [VA];
P_B -- potência ativa, [W];
Q_B -- potência reativa, [VAr];
--%%%%%%%%%%%%% # tensão
vrms_B -- tensão rms, [V];
--%%%%%%%%%%%%% # corrente
irms_B -- corrente rms, [A];
--%%%%%%%%%%%%% # fator de potência
cosfi_B -- fator de potência
fi_B -- ângulo do fator de potência, [°].
--%%%%%%%%%%%%% # variáveis auxiliares
v2_B
i2_B
vi_B
iv2_B
ii2_B
ivi_B
Pmed_B
    vrms_BC -- tensão rms, [V];
    v2_BC -- tensão ao quadrado;
    iv2_BC -- integral tensão ao quadrado;
----- FASE C -----
--%%%%%%%%%%%%% # potências
S_C -- potência aparente, [VA];
P_C -- potência ativa, [W];
Q_C -- potência reativa, [VAr];
--%%%%%%%%%%%%% # tensão
vrms_C -- tensão rms, [V];
--%%%%%%%%%%%%% # corrente
irms_C -- corrente rms, [A];
--%%%%%%%%%%%%% # fator de potência
cosfi_C -- fator de potência
fi_C -- ângulo do fator de potência, [°].
--%%%%%%%%%%%%% variáveis auxiliares
v2_C
i2_C
vi_C
iv2_C
ii2_C
ivi_C
Pmed_C
    vrms_CA -- tensão rms, [V];
    v2_CA -- tensão ao quadrado;
    iv2_CA -- integral tensão ao quadrado;

TIMESTEP MAX: 0.001
MIN: 0.0001
DELAY CELLS(iv2_A):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(ii2_A):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv_i_A):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv2_B):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(ii2_B):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv_i_B):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv2_C):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(ii2_C):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv_i_C):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv2_AB):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv2_BC):1/freq/timestep+ 1
    CELLS(iv2_CA):1/freq/timestep+ 1

```

```

INIT
  S_A:=0
  S_B:=0
  S_C:=0
  P_A:=0
  P_B:=0
  P_C:=0
  Q_A:=0
  Q_B:=0
  Q_C:=0
  fi_A:=0
  fi_B:=0
  fi_C:=0
  cosfi_A:=0
  cosfi_B:=0
  cosfi_C:=0
    integral(v2_A):=0
  integral(v2_B):=0
  integral(v2_C):=0
    integral(i2_A):=0
  integral(i2_B):=0
  integral(i2_C):=0
    integral(vi_A):=0
    integral(vi_B):=0
    integral(vi_C):=0
  histdef(iv2_A):=0
  histdef(iv2_B):=0
  histdef(iv2_C):=0
  histdef(ii2_A):=0
  histdef(ii2_B):=0
  histdef(ii2_C):=0
  histdef(ivi_A):=0
  histdef(ivi_B):=0
  histdef(ivi_C):=0
  integral(v2_AB):=0
  integral(v2_BC):=0
  integral(v2_CA):=0
  histdef(iv2_AB):=0
  histdef(iv2_BC):=0
  histdef(iv2_CA):=0
  histdef(iv2_CA):=0

```

Medidor 3f - Parte 3

```

histdef(integral(v2_A)):=0
histdef(integral(v2_B)):=0
histdef(integral(v2_C)):=0
histdef(integral(i2_A)):=0
histdef(integral(i2_B)):=0
histdef(integral(i2_C)):=0
histdef(integral(vi_A)):=0
histdef(integral(vi_B)):=0
histdef(integral(vi_C)):=0
  histdef(integral(v2_AB)):=0
histdef(integral(v2_BC)):=0
histdef(integral(v2_CA)):=0
period:=recip(freq)
ENDINIT
EXEC
v2_AB:=(V_A-V_B)*(V_A-V_B)
V2_BC:=(V_B-V_C)*(V_B-V_C)
V2_CA:=(V_C-V_A)*(V_C-V_A)
  v2_A:=V_A*V_A
v2_B:=V_B*V_B
v2_C:=V_C*V_C
  i2_A:=I_A*I_A
  i2_B:=I_B*I_B
  i2_C:=I_C*I_C
    iv2_AB:=integral(v2_AB)
    iv2_BC:=integral(v2_BC)
    iv2_CA:=integral(v2_CA)
vi_A:=V_A*I_A
vi_B:=V_B*I_B
vi_C:=V_C*I_C
  iv2_A:=integral(v2_A)
  iv2_B:=integral(v2_B)
  iv2_C:=integral(v2_C)
  ii2_A:=integral(i2_A)
  ii2_B:=integral(i2_B)
  ii2_C:=integral(i2_C)
  ivi_A:=integral(vi_A)
  ivi_B:=integral(vi_B)
  ivi_C:=integral(vi_C)

```

Medidor 3f - Parte 4

```

-----
----- tensão e corrente eficaz verdadeira -----
vrms_A:=sqrt((iv2_A-delay(iv2_A,period))/period)
vrms_B:=sqrt((iv2_B-delay(iv2_B,period))/period)
vrms_C:=sqrt((iv2_C-delay(iv2_C,period))/period)
irms_A:=sqrt((ii2_A-delay(ii2_A,period))/period)
irms_B:=sqrt((ii2_B-delay(ii2_B,period))/period)
irms_C:=sqrt((ii2_C-delay(ii2_C,period))/period)
-----
----- potências aparentes - monofásicas -----
S_A:=vrms_A*irms_A
S_B:=vrms_B*irms_B
S_C:=vrms_C*irms_C
-----
----- potências ativas - monofásicas -----
Pmed_A:=((ivi_A-delay(ivi_A,period))/period)
IF Pmed_A <= 1E-1 THEN
  Pmed_A:=0
ELSE

```

Medidor 3f - Parte 5

```

P_A:=Pmed_A
ENDIF
IF P_A >= S_A THEN
    P_A:=S_A
ENDIF
Pmed_B:=((ivi_B-delay(ivi_B,period))/period)
IF Pmed_B <= 1E-1 THEN
    Pmed_B:=0
ELSE
    P_B:=Pmed_B
ENDIF
IF P_B >= S_B THEN
    P_B:=S_B
ENDIF
Pmed_C:=((ivi_C-delay(ivi_C,period))/period)
IF Pmed_C <= 1E-1 THEN
    Pmed_C:=0
ELSE
    P_C:=Pmed_C
ENDIF
IF P_C >= S_C THEN
    P_C:=S_C
ENDIF
-----
----- potências reativas - monofásicas -----
-----
Q_A:=sqrt((S_A**2)-(P_A**2))
Q_B:=sqrt((S_B**2)-(P_B**2))
Q_C:=sqrt((S_C**2)-(P_C**2))
-----
----- fator de potência -----
-----
cosfi_A:=P_A/S_A
cosfi_B:=P_B/S_B
cosfi_C:=P_C/S_C
fi_A:=acos(cosfi_A)*180/pi
fi_B:=acos(cosfi_B)*180/pi
fi_C:=acos(cosfi_C)*180/pi
-----
----- potências - trifásicas -----
-----
S_3:=S_A+S_B+S_C
P_3:=P_A+P_B+P_C
Q_3:=Q_A+Q_B+Q_C
-----
----- tensão e corrente eficazes fase-fase verdadeira -----
-----
vrms_AB:=sqrt((iv2_AB-delay(iv2_AB,period))/period)
vrms_BC:=sqrt((iv2_BC-delay(iv2_BC,period))/period)
vrms_CA:=sqrt((iv2_CA-delay(iv2_CA,period))/period)
irms_A:=sqrt((ii2_A-delay(ii2_A,period))/period)
irms_B:=sqrt((ii2_B-delay(ii2_B,period))/period)
irms_C:=sqrt((ii2_C-delay(ii2_C,period))/period)

ENDEXEC
ENDMODEL

```

```

MODEL poten
INPUT v      -- sinal de tensão [V]
      i      -- sinal de corrente [A]
DATA freq   -- frequência [Hz]
VAR S      -- potência aparente [VA]
      P      -- potência ativa [W]
      Q      -- potência reativa [VAr]
v2      -- v*v
i2      -- i*i
vi      -- v*i
iv2     -- integral(v*v)
ii2     -- integral (i*i)
ivi     -- integral(v*i)
vrms   -- tensão rms [V]
vrms_t  -- tensão fase fase [V], considerando um circuito 3f equilibrado
irms   -- corrente rms [A]
period  -- 1/freq
taux   -- tempo para geração de uma função dente de serra
cosfi  -- fator de potência
fi     -- ângulo do fator de potência [°]
Pmed
St
Pt
Qt

```

Medidor 1f Parte 1

```

DELAY CELLS(iv2):1/freq/timestep+ 1
      CELLS(ii2):1/freq/timestep+ 1
      CELLS(ivi):1/freq/timestep+ 1
TIMESTEP MAX: 0.0001
      MIN: 0.00001
INIT
      S:=0
      P:=0
      Q:=0
      cosfi:=0
      fi:=0
      integral(v2):=0
      integral(i2):=0
      integral(vi):=0
      period:=recip(freq)
      taux:=0
      histdef(iv2):=0
      histdef(ii2):=0
      histdef(ivi):=0
      histdef(irms):=0
      histdef(vrms):=0
      histdef(cosfi):=0
      histdef(fi):=0
      histdef(Pmed):=0
      histdef(S):=0
      histdef(P):=0
      histdef(Q):=0
ENDINIT
EXEC
      vi:=v*i
      taux:= taux + timestep
      ivi:=integral(vi)
      v2:=v*v
      i2:=i*i
      iv2:=integral(v2)
      ii2:=integral(i2)
      ivi:=integral(vi)

```

```

IF T < period THEN
      vrms:=0
      vrms_t:=0
      irms:=0
ENDIF
IF t >= period THEN
      vrms:=sqrt((iv2-
delay(iv2,period))/period)
      vrms_t:=sqrt((iv2-
delay(iv2,period))/period)*sqrt(3)
      irms:=sqrt((i2-
delay(ii2,period))/period)
      S:=vrms*irms
      St:=3*S
      IF taux>=period THEN
          Pmed:=(abs(ivi)/period)
          IF Pmed <= 1E-1 THEN
              Pmed:=0
          ENDIF
          taux:=0
          integral(vi):=0
          P:=(Pmed)
          Pt:=3*P
          IF P > S THEN
              P:=S
          ENDIF
          cosfi:=(P/S)
          fi:=(acos(cosfi)*180/pi)
          IF fi<=0.1 THEN
              fi:=0
          ENDIF
          Q:=(S*sin(fi*pi/180))
          Qt:=3*Q
          ENDIF
      ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Medidor 1f Parte 2

Medidor 1f Parte 3

APÊNDICE B – Programas de Cálculo

Este apêndice detalhará os cálculos realizados no *software* Scilab. Para tal finalidade é mostrado o código utilizado e é mostrada todas as variáveis obtidas através desses programas. O programa foi de autoria própria em 2021.

```

//#####
//Cálculo de Compensação Reativa de LT Através de Quadripolos
//#####

clear
clc

//variáveis de entrada da LT-----
r = 2.835*10^-2           //resistência da LT (Ohm/Km)
x = 3.2962*10^-1          //reatância da LT(Ohm/Km)
b = 5.023*10^-6            //susceptânci da LT (S/Km)
Zc_M = 256.473             //magnitude da impedância característica da LT
Zc_F = -1.98                //fase da impedância característica da LT (°)
L = 300                      //distância da LT(Km)
//-----

//variáveis de entrada da carga-----
VL = 500*10^3               //tensão de linha no terminal da carga (V)
Zf = complex(150, 0)         //impedância por fase da carga (Ohm)
//-----

//variáveis de entrada de compensação-----
Kp = 0.75                  //fator de compensação
n = 2                         //números de elementos compensadores
//-----

//ajustes na variáveis de entrada da LT-----
R = r*L                     //resistência total (Ohm)
X = x*L                     //reatância total (Ohm)
B = b*L                     //susceptânci total (S)
Zc_r = Zc_M*cos(Zc_F*pi/180) //parte real impedância caracteristica (Ohm)
Zc_i = Zc_M*sin(Zc_F*pi/180) //parte imag. impedância caracteristica (S)
Zc = complex(Zc_r, Zc_i)     //impedância característica (Ohm)
Z = complex(R, X)            //impedância da LT (Ohm)
Y = complex(0, B)             //admitânci da LT (S)
//-----

//cálculos dos parâmetros da LT-----
Zeq = (Z*sinh(sqrt(Z*Y)))/sqrt(Z*Y)      //((Z'))-impedânci corrigida (Ohm)
Yeq = (Y*tanh(sqrt(Z*Y)/2))/(sqrt(Z*Y)/2) //((Y'))-admitânci corrigida (S)
A = cosh(sqrt(Z*Y))                      //parâmetro A do quadripolo ()
B = Zc*sinh(sqrt(Z*Y))                   //parâmetro B do quadripolo (Ohm)
C = sinh(sqrt(Z*Y))/Zc                    //parâmetro C do quadripolo (S)
D = A                                      //parâmetro D do quadripolo ()
LT = [A B; C D]                          //matriz que representa a LT
SIL = VL^2/abs(Zc)                       //potênci característica (VA)
//-----

```

```

//ajustes nas variáveis de entrada da carga-----
Vf = VL/sqrt(3)                                //tensão de fase na carga (V)
Vf_F = 0                                         //fase da tensão na carga (V)
Vf_p = Vf*sqrt(2)                                //valor de pico da tensão de fase na carga (V)
IL = Vf/Zf                                       //corrente de linha na carga (A)
terminal_1 = [Vf; IL]                            //matriz do terminal 1 (terminal da carga)
S3 = 3*Vf*conj(IL)                             //potência trifásica no terminal 1 (VA)
Razao = abs(S3)/SIL                            //potência da carga em relação a SIL (p.u.)
Fi = atan(imag(S3),real(S3))                  //angulo de potência no terminal 1 (rad)
FP = cos(Fi)                                    //fator de potência no terminal 1
Fi = Fi*180/%pi                                 //angulo de potência no terminal 1 (°)
//-----

//cálculo das variáveis no terminal 2 da LT-----
terminal_2 = LT*terminal_1                      //matriz do terminal 2 (terminal do gerador)
Vf_2 = terminal_2(1)                            //tensão de fase no terminal 2 (V)
Vf_2_M = abs(Vf_2)                             //magnitude da tensão no terminal 2 (V)
Vf_2_p = Vf_2_M*sqrt(2)                         //valor de pico da tensão no terminal 2 (V)
Vf_2_F = atan(imag(Vf_2),real(Vf_2))          //fase da tensão terminal 2 (rad)
Vf_2_F = Vf_2_F*180/%pi                        //angulo de potência no terminal 2 (°)
IL_2 = terminal_2(2)                            //corrente de linha no terminal 2 (A)
S3_2 = 3*Vf_2*conj(IL_2)                       //potência trifásica no terminal 2 (VA)
S3_2_M = abs(S3_2)                            //magnitude da potência 3f terminal 2 (VA)
Fi_2 = atan(imag(S3_2),real(S3_2))            //angulo de potência no terminal 2 (rad)
FP_2 = cos(Fi_2)                               //fator de potência no terminal 2
Fi_2 = Fi_2*180/%pi                           //angulo de potência no terminal 2 (°)
//-----

//cálculo da compensação-----
Q3_2 = imag(S3_2)                             //potência reativa trifásica terminal 2 (VAR)
Q_2 = Q3_2/3                                  //potência reativa monofásica terminal 2 (VAR)
if Q_2 < 0 then                                //verifica se a potência reativa é maior que 0
    linha = "capacitiva"                         //caso afirmativo linha capacitiva
    compensador = "indutivo"                   //caso afirmativo compensador indutivo
    Yc=complex(0,-Kp*imag(Yeq))              //admitância para compensação shunt (S)
    Yc = Yc/n                                   //divisão da admitância para compensação shunt
    Comp = [1 0; Yc 1]                          //matriz do quadripolo do compensador
    Xc = 1/abs(Yc)                            //reatânciia de compensação
else                                           //segue para o caso negativo
    linha = "indutiva"                         //caso negativo linha indutiva
    compensador = "capacitivo"                 //caso negativo compensador capacitivo
    Zc=complex(0,-Kp*imag(Zeq))              //impedância para compensação série (S)
    Zc = Zc/n                                   //divisão da impedância para compensação série
    Comp = [1 Zc; 0 1]                          //matriz do quadripolo do compensador
    Xc = abs(Zc)                             //reatânciia de compensação
end                                            //fim da condicional
//-----

//verificação da LT após compensação-----
terminal_2_c = Comp*LT*Comp*terminal_1        //matriz do terminal 2 compensada
Vf_2_c = terminal_2_c(1)                        //tensão de fase no terminal 2 (V)
Vf_2_M_c = abs(Vf_2_c)                         //magnitude da tensão terminal 2 (V)
Vf_2_p_c = Vf_2_M_c*sqrt(2)                    //valor pico da tensão terminal 2 (V)
Vf_2_F_c = atan(imag(Vf_2_c),real(Vf_2_c))   //fase da tensão terminal 2 (rad)
Vf_2_F_c = Vf_2_F_c*180/%pi                   //angulo de potência terminal 2 (°)
IL_2_c = terminal_2_c(2)                        //corrente de linha terminal 2 (A)
S3_2_c = 3*Vf_2_c*conj(IL_2_c)                //potência trifásica terminal 2 (VA)
S3_2_M_c = abs(S3_2_c)                         //magnitude potência 3f terminal 2 (VA)
Fi_c = atan(imag(S3_2_c),real(S3_2_c))       //angulo de potência terminal 2 (rad)
FP_c = cos(Fi_c)                             //fator de potência terminal 2
Fi_c = Fi_c*180/%pi                           //angulo de potência terminal 2 (°)
//-----

```

```
//variáveis de entrada da carga-----
VL = 500*10^3 //tensão de linha no terminal da carga (V)
Zf = complex(500, 0) //impedância por fase da carga (Ohm)
//-----
```

Ajuste no Código

```
//impressão de resultados-----
printf("\nNão Compensado:\n")
printf("\n")
printf("Tensão de pico no terminal receptor %.2f\n",Vf_p/1000)
printf("Tensão RMS no terminal receptor %.2f\n",Vf/1000)
printf("Fase da tensão no terminal receptor %.2f\n",Vf_F)
printf("Potência ativa 3f no terminal receptor %.2f\n",real(S3)/10^6)
printf("Potência reativa 3f no terminal receptor %.2f\n",imag(S3)/10^6)
printf("Fator de potência no terminal receptor %.2f\n",FP)
printf("\n")
printf("Tensão de pico no terminal emissor %.2f\n",Vf_2_p/1000)
printf("Tensão RMS no terminal emissor %.2f\n",Vf_2/1000)
printf("Fase da tensão no terminal emissor %.2f\n",Vf_2_F)
printf("Potência ativa 3f no terminal emissor %.2f\n",real(S3_2)/10^6)
printf("Potência reativa 3f no terminal emissor %.2f\n",imag(S3_2)/10^6)
printf("Fator de potência no terminal emissor %.2f\n",FP_2)
printf("\n")
printf("Compensado:\n")
printf("\n")
printf("Reatância do compensador %.2f\n",Xc)
printf("\n")
printf("Tensão de pico no terminal receptor comp. %.2f\n",Vf_p/1000)
printf("Tensão RMS no terminal receptor comp. %.2f\n",Vf/1000)
printf("Fase da tensão no terminal receptor comp. %.2f\n",Vf_F)
printf("Potência ativa 3f no terminal recep. comp. %.2f\n",real(S3)/10^6)
printf("Potência reativa 3f no terminal recep. comp. %.2f\n",imag(S3)/10^6)
printf("Fator de potência no terminal receptor comp. %.2f\n",FP)
printf("\n")
printf("Tensão de pico no terminal emissor comp. %.2f\n",Vf_2_p_c/1000)
printf("Tensão RMS no terminal emissor comp. %.2f\n",Vf_2_c/1000)
printf("Fase da tensão no terminal emissor comp. %.2f\n",Vf_2_F_c)
printf("Potência ativa 3f no terminal emis. comp. %.2f\n",real(S3_2_c)/10^6)
printf("Potência reativa 3f no terminal emis. comp. %.2f\n",imag(S3_2_c)/10^6)
printf("Fator de potência no terminal emis. comp. %.2f\n",FP_c)
//-----
```

Código - Parte 3

Resultados de carga pesada do programa de cálculo.

Nome	Value
A	0.926 + 0.00625i
B	7.28 + 96.5i
C	9.09e-06 + 0.00147i
Comp	[1 - 0i, 0 - 36.2i; 0 - 0i, 1 - 0i]
D	0.926 + 0.00625i
FP	1
FP_2	0.94
FP_c	0.999
Fl	-0
Fl_2	19.9
Fl_c	-2.6
IL	1.92e+03 - 0i
IL_2	1.79e+03 + 437i
IL_2_c	1.89e+03 + 436i
Kp	0.75
L	300
LT	[0.926 + 0.00625i, 7.28 + 96.5i; 9.09e-06 + 0.00147i, 0.926 + 0.00625i]
Q3_2	6.35e+08
Q_2	2.12e+08
R	8.51
Razao	1.71
S3	1.67e+09 - 0i
S3_2	1.75e+09 + 6.35e+08i
S3_2_M	1.86e+09
S3_2_M_c	1.76e+09
S3_2_c	1.76e+09 - 7.97e+07i
SIL	9.75e+08
VL	5e+05
Vf	2.89e+05
Vf_2	2.81e+05 + 1.87e+05i
Vf_2_F	33.7
Vf_2_F_c	10.4
Vf_2_M	3.38e+05
Vf_2_M_c	3.03e+05
Vf_2_c	2.98e+05 + 5.47e+04i
Vf_2_p	4.78e+05
Vf_2_p_c	4.28e+05
Vf_F	0
Vf_p	4.08e+05
X	98.9
Xc	36.2
Y	0 + 0.00151i
Yeq	1.66e-06 + 0.00153i
Z	8.51 + 98.9i
Zc	0 - 36.2i
Zc_F	-1.98
Zc_M	256
Zc_i	-8.86
Zc_r	256
Zeq	8.09 + 96.5i
Zf	150 - 0i
b	5.02e-06
compensador	1x1
linha	1x1
n	2
r	0.0284
terminal_1	[2.89e+05 - 0i; 1.92e+03 - 0i]
terminal_2	[2.81e+05 + 1.87e+05i; 1.79e+03 + 437i]
terminal_2_c	[2.98e+05 + 5.47e+04i; 1.89e+03 + 436i]
x	0.33

Fonte: Scilab (2021)

Resultados de carga leve do programa de cálculo.

Nome	Value
A	0.926 + 0.00625i
B	7.28 + 96.5i
C	9.09e-06 + 0.00147i
Comp	[1 - 0i, 0 - 0i; 0 - 0.000572i, 1 - 0i]
D	0.926 + 0.00625i
FP	1
FP_2	0.894
FP_c	1
Fi	-0
Fi_2	-26.6
Fi_c	0.111
IL	577 - 0i
IL_2	537 + 428i
IL_2_c	571 + 111i
Kp	0.75
L	300
LT	[0.926 + 0.00625i, 7.28 + 96.5i; 9.09e-06 + 0.00147i, 0.926 + 0.00625i]
Q3_2	-2.56e+08
Q_2	-8.54e+07
R	8.51
Razao	0.513
S3	5e+08 - 0i
S3_2	5.12e+08 - 2.56e+08i
S3_2_M	5.72e+08
S3_2_M_c	5.11e+08
S3_2_c	5.11e+08 + 9.92e+05i
SIL	9.75e+08
VL	5e+05
Vf	2.89e+05
Vf_2	2.72e+05 + 5.75e+04i
Vf_2_F	12
Vf_2_F_c	11.1
Vf_2_M	2.78e+05
Vf_2_M_c	2.93e+05
Vf_2_c	2.88e+05 + 5.63e+04i
Vf_2_p	3.93e+05
Vf_2_p_c	4.14e+05
Vf_F	0
Vf_p	4.08e+05
X	98.9
Xc	1.75e+03
Y	0 + 0.00151i
Yc	0 - 0.000572i
Yeq	1.66e-06 + 0.00153i
Z	8.51 + 98.9i
Zc	256 - 8.86i
Zc_F	-1.98
Zc_M	256
Zc_i	-8.86
Zc_r	256
Zeq	8.09 + 96.5i
Zf	500 - 0i
b	5.02e-06
compensador	1x1
linha	1x1
n	2
r	0.0284
terminal_1	[2.89e+05 - 0i; 577 - 0i]
terminal_2	[2.72e+05 + 5.75e+04i; 537 + 428i]
terminal_2_c	[2.88e+05 + 5.63e+04i; 571 + 111i]
x	0.33

Fonte: Scilab (2021)

ANEXO A – Modelos de Quadripolos

Esse anexo mostra um quadro que relaciona alguns modelos de circuitos tradicionais com seus respectivos parâmetros de quadripolos ajustados.

Nº	TIPO DE REDE	CIRCUITOS	EQUAÇÕES GERAIS DAS CONSTANTES GENERALIZADAS			
			A	B	C	D
1	IMPEDÂNCIA EM SÉRIE		1	z	0	1
2	ADMITÂNCIA EM DERIVAÇÃO		1	0	y	1
3	TRANSFORMADOR - CIRCUITO		$1 + \frac{Z_T Y_T}{2}$	$Z_T (1 + \frac{Z_T Y_T}{4})$	y_T	$1 + \frac{Z_T Y_T}{2}$
3a	TRANSFORMADOR - CIRCUITO (a)		1	z_T	y_T	$1 + z_T y_T$
3b	TRANSFORMADOR - CIRCUITO (b)		$1 + Z_T Y_T$	z_T	y_T	1
3c	RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO		$\frac{1}{N}$	0	0	N
4	LINHA DE TRANSMISSÃO HOMOGENEA		$1 + \frac{ZY}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} + \dots$	$\sqrt{\frac{Z}{Y}} \operatorname{senh} ZY =$ $= Y(1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \dots)$	$\sqrt{\frac{Y}{Z}} \operatorname{senh} ZY =$ $= f(1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \dots)$	COMO "A"
5	CASO GERAL (NETWORK)		A	B	C	D
6	REDE EM SÉRIE COM IMPEDÂNCIA		A_1	$B_1 + A_1 Z_2$	C_1	$D_1 + C_1 Z_2$
7	IMPEDÂNCIA EM SÉRIE COM REDE		$A_1 + C_1 Z_1$	$B_1 + D_1 Z_1$	C_1	D_1
8	REDE EM SÉRIE COM TRANSFORMADORES EM AMBAS AS EXTREMIDADES - IMPEDÂNCIAS REFERIDAS AO LADO DA A.T.		$A_1 + C_1 Z_{T1}$	$B_1 + A_1 Z_{T2} + D_1 Z_{T1} + C_1 Z_{T2} Z_{T1}$	C_1	$D_1 + C_1 Z_{T2}$
9	REDE EM SÉRIE COM TRANSFORMADORES EM AMBAS AS EXTREMIDADES - TRANSFORMADORES TENDO RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO T2 E T1 REFERIDAS AO LADO DA B.T.		$\frac{T_2}{T_1} (A_1 + C_1 Z_{T1})$	$\frac{1}{T_2 T_1} (B_1 + A_1 Z_{T2} + D_1 Z_{T1} + C_1 Z_{T2} Z_{T1})$	$C_1 T_2 T_1$	$\frac{T_1}{T_2} (D_1 + C_1 Z_{T2})$

Fonte: Fuchs (1977)