

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE COMPARATIVA
DOS ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO
EM LINHA DE TRANSMISSÃO EM CIRCUITO DUPLO
ATRAVÉS DE UMA ESTRUTURA DE SIMULAÇÃO EM
TEMPO REAL BASEADA NA IEC 61850-90-1**

Tiago dos Santos Silvério Lino

Itajubá, setembro de 2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Tiago dos Santos Silvério Lino

**ANÁLISE COMPARATIVA
DOS ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO
EM LINHA DE TRANSMISSÃO EM CIRCUITO DUPLO
ATRAVÉS DE UMA ESTRUTURA DE SIMULAÇÃO EM
TEMPO REAL BASEADA NA IEC 61850-90-1**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientadores: Dr. Paulo Márcio da Silveira

Coorientador: Dr. Carlos Alberto Villegas Guerrero

Setembro de 2020
Itajubá

Ao meu Deus, família, professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me mostrou mais uma vez que o controle de tudo está em suas mãos, me direcionou, me abriu essa oportunidade, me deu forças em mais essa jornada e me conduziu vitoriosamente.

Aos meus pais, que sempre me amaram e ensinaram o Caminho da Verdade, me deram exemplos a serem seguidos, muito se esforçaram e lutaram para que eu tivesse melhores oportunidades.

Às minhas tias, que sempre me fizeram sentir amado e cuidado, me deram suporte e sempre fizeram de tudo para me verem feliz.

À minha esposa, que me alegra todos os dias, que me prestou auxílio durante mais esta etapa, me apoiou, me encorajou e me anima a continuar lutando para que todos os nossos sonhos sejam realizados.

Aos meus irmãos e cunhados, pelo companheirismo, amizade e ajuda de sempre, o que tornou essa jornada mais leve e mais fácil de ser enfrentada.

Aos meus orientadores do Mestrado. Ao Professor Dr. Paulo Márcio, referência nacional na área de Proteção de Sistemas Elétricos, pelas oportunidades incríveis me concedidas, pelo privilégio de ser seu orientado, pelo apoio, compreensão, carisma e disposição de sempre. Ao Professor Dr. Carlos Guerrero, que foi usado por Deus para me abrir grandes portas, que confiou em mim e me concedeu a oportunidade e privilégio de ser seu orientado e aprender com seu profissionalismo, disciplina, amor ao ensino e prazer em ver a satisfação do aluno.

Aos meus professores da Graduação e Mestrado de forma geral, por fazer do ensino uma arte, mostrar a importância e benefício do compartilhamento do conhecimento e favorecer o meu desenvolvimento técnico e profissional. Em especial, ao Professor Dr. Fernando Belchior, pelo companheirismo ao longo de todo o período de Graduação, pelas variadas oportunidades de crescimento e diversos ensinamentos.

À minha família de forma geral e amigos, pela amizade, apoio, ajuda sempre que necessária e momentos de descontração, que tornaram essa jornada mais prazerosa.

À CAPES, FUPAI, QMAP e UNIFEI, pelo apoio financeiro e estrutural fornecidos durante o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

Os Esquemas de Teleproteção surgiram visando a melhora do desempenho da proteção de linhas de transmissão, a qual é alcançada mediante escolhas adequadas dos mesmos. Através de simulação digital em tempo real, esta dissertação traz uma análise prática e uma visão abrangente dos principais aspectos dos Esquemas de Teleproteção comumente aplicados, destacando os requisitos mínimos mencionados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e fornecendo um auxílio na seleção do esquema a ser utilizado. Tendo em vista que uma grande parte dos circuitos de transmissão do Sistema Interligado Nacional correm paralelamente, a análise é proposta não apenas em um sistema composto por linha de circuito simples, mas também em um sistema de linha dupla real, sendo destacado o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero na medição de impedância da função de distância dos relés e, conseqüentemente, nos Esquemas de Teleproteção. Os testes são propostos com relés de proteção de dois conceituados fabricantes e levam em consideração duas estruturas de teleproteção, a convencional e a baseada nos mecanismos de comunicação expostos na IEC 61850-90-1, proporcionando o levantamento dos benefícios dessa substituição.

Palavras-Chave: Esquemas de Teleproteção, Linhas de Transmissão, Circuito Duplo, Acoplamento Mútuo de Sequência Zero, Função de Distância, IEC 61850-90-1.

ABSTRACT

Teleprotection Schemes were developed aiming to improve the performance of transmission line protection, which is achieved through an appropriate choice of them. Through real-time digital simulation, this dissertation brings a practical analysis and a comprehensive view of the main aspects related to the commonly applied Teleprotection Schemes, highlighting the minimum requirements established by the Brazilian National System Operator (ONS) and providing an aid in the selection of the scheme to be used. Due to the fact that most of transmission lines of the National Interconnected System are parallel circuits, this thesis considers not only an analysis of system with a single circuit line, but also a real double line circuit system. In addition, this work highlights the effect of zero sequence mutual coupling in the impedance measurement of the relays' distance function and, consequently, the effect in Teleprotection Schemes. The tests involve protection relays from two renowned manufacturers and takes into consideration two teleprotection structures: the conventional one and the structure based on communication mechanisms exposed in IEC 61850-90-1 Standard, providing a survey of benefits obtained from this replacement.

Keywords: Teleprotection Schemes, Transmission Lines, Double Circuit Line, Zero Sequence Mutual Coupling, Distance Function, IEC 61850-90-1.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução do SIN.....	13
Figura 2.1 - Estrutura Geral dos Esquemas de Teleproteção.	20
Figura 2.2 - Lógica Simplificada - Transferência Direta de Disparo por Subalcance.....	24
Figura 2.3 - Lógica Simplificada - Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance.	26
Figura 2.4 - Lógica Simplificada - Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance. ...	27
Figura 2.5 - Lógica Simplificada - Comparação Direcional por Bloqueio.	28
Figura 2.6 - Lógica Simplificada - Comparação Direcional por Desbloqueio.....	29
Figura 2.7 - Falta na Extremidade de uma LT de Circuito Simples.....	32
Figura 2.8 - Diagrama de Sequências para uma Falta Monofásica em uma LT Simples.....	32
Figura 2.9 - Acoplamento Mútuo de Sequência Zero.	34
Figura 2.10 - Influência do Acoplamento Mútuo de Sequência Zero.	35
Figura 2.11 - Diagrama de Sequências para uma Falta Monofásica em uma LT Dupla.....	36
Figura 2.12 - Erros na Medição de Impedância.....	38
Figura 2.13 - Configurações operacionais de uma LT dupla.	39
Figura 2.14 - Efeito da Compensação de Mútua.	41
Figura 3.1 - Sistema de Potência Modelado - Análise em LT de Circuito Simples.....	44
Figura 3.2 - Tela de Supervisão no RTDS – Análise em LT de Circuito Simples.....	45
Figura 3.3 - Sistema de Teleproteção modelado no RTDS - Estrutura Convencional	46
Figura 3.4 - Sistema de Teleproteção Modelado - Estrutura baseada na IEC 61850-90-1.....	47
Figura 3.5 - HIL implementado - Análise em LT de Circuito Simples.....	48
Figura 3.6 - Deslocamento de Impedância (falta fase-fase).	55
Figura 4.1 - Torre de Transmissão da LT Ilha Solteira - Bauru circuito 1 e 2.	67
Figura 4.2 - Sistema de Potência - Análise em LT de Circuito Duplo.....	67
Figura 4.3 - Fluxo de Potência do Sistema – Caso Real do ONS.	69
Figura 4.4 - Disposição Geométrica dos Condutores da LT.	71
Figura 4.5 - Disposição Geométrica dos Subcondutores da LT.....	72
Figura 4.6 - Flecha dos Cabos da LT.	72
Figura 4.7 - LT Ilha Solteira - Bauru (circuito 1 e 2) Modelada no Módulo Draft do RTDS..	74
Figura 4.8 - Sistema de Teleproteção Modelado - Análise em LT de Circuito Duplo.....	74
Figura 4.9 - Tela de Supervisão no RTDS – Análise em LT de Circuito Duplo.....	75
Figura 4.10 - Posição e Numeração dos Relés na LT de Circuito Duplo.....	76
Figura 4.11 - Característica Quadrilateral da Proteção de Distância de Terra – Relés 1 e 2....	81
Figura 4.12 - Característica Quadrilateral da Proteção de Distância de Terra – Relés 3 e 4....	86
Figura 4.13 - Erros na Medição de Impedância – Relé 1	90
Figura 4.14 - Erros na Medição de Impedância.....	90
Figura 4.13 - Erro na Medição de Impedância – Relé 1 – Cenário 2 (Falta em 99% C1).....	91
Figura 4.14 - Oscilografia (Falta em 99% C1) – Relé 1 –Zona 2 Reduzida.	93
Figura 4.15 - Erro na Medição– Relé 1 – Cenário 5 (Falta em 1% da LT Bauru-Assis)	99
Figura 4.16 - Análise <i>Transient Blocking</i>	102
Figura A.1 - Sistema de Potência no Draft do RTDS – LT de Circuito Simples.....	112
Figura B.1.1 - Circuito de Transmissão - DCB - Interface Convencional.	113
Figura B.2.1 - Circuito de Transmissão - POTT, PUTT e DUTT - Interface Convencional.	114
Figura B.3.1 - Circuito de Transmissão - DCUB - Interface Convencional.	115
Figura B.4.1 - Circuito de Transmissão – DCB - Interface via GOOSE.....	116

Figura B.4.2 - Circuito de Transmissão – POTT, PUTT e DCUB - Interface via GOOSE ...	116
Figura B.4.3 - Circuito de Transmissão - DCUB - Interface via GOOSE	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos do Tempo de Propagação.	21
Tabela 2.2 - Requisitos do Tempo de Operação da Teleproteção (TA).	22
Tabela 3.1 - Impedâncias de Sequência Positiva e Sequência Zero das LTs.	44
Tabela 3.2 - Impedâncias das Fontes Equivalentes.	44
Tabela 3.3 - Condição Operativa das Fontes Equivalentes.	44
Tabela 3.4 - Funções de Proteção utilizadas - Análise em LT de Circuito Simples.	51
Tabela 3.5 - Faltas Internas (50%).....	53
Tabela 3.6 - Faltas Internas Próximas ao Terminal S.....	55
Tabela 3.7 - Lista de Eventos dos Relés M1 durante a Falta AG.....	56
Tabela 3.8 - Faltas Internas Próximas ao Terminal S com Disjuntor Aberto.....	59
Tabela 3.9 - Lista de Eventos dos Relés M2 – Lógica <i>Echo</i>	60
Tabela 3.10 - Faltas Interna e Externa Próximas ao Terminal S com Perda de Canal.	61
Tabela 3.11 - Lista de Eventos dos Relés M2 - DCUB - Falta Interna e Perda de Canal.	62
Tabela 3.12 - Resultados com a Estrutura Baseada na IEC61850-90-1.....	64
Tabela 3.13 - Tempo Médio de Transferência.....	65
Tabela 3.14 - Tempo de Propagação de Sistemas de Telecomunicação.....	65
Tabela 4.1 - Equivalentes das Barras de Fronteira.	68
Tabela 4.2 - Tensões obtidas nas Barras.	68
Tabela 4.3 - Balanço de Potências nas Barras de Fronteiras.	69
Tabela 4.4 - Tensões Internas das Fontes Equivalentes.	70
Tabela 4.5 - Comparação entre Resultados do ANAREDE e RTDS.	73
Tabela 4.6 - Dados do Sistema – Memória de Cálculo – Relés 1 e 2.....	77
Tabela 4.7 - Ajustes de Proteção dos Relés.....	85
Tabela 4.8 - Resultados – LT em Operação Normal - Sem Mútua.	88
Tabela 4.9 - Resultados – LT em Operação Normal Com Mútua – Sem KOM.....	89
Tabela 4.10 - Teste POTT – Cenário 2.....	92
Tabela 4.11 - Resultados – LT em Operação Normal Com Mútua – Com KOM.....	95
Tabela 4.12 - Resultados – LT com Circuito Paralelo Aterrado - Sem Mútua.....	97
Tabela 4.13 - Resultados – LT com Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Sem KOM...	98
Tabela 4.14 - Resultados – LT com Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Com KOM	100
Tabela 4.15 - Lista de eventos dos relés M1 – Lógica Transient Blocking.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
ANAREDE	Análise de Redes
DCB	<i>Directional Comparison Blocking</i>
DCUB	<i>Directional Comparison Unblocking</i>
DNP	<i>Distributed Network Protocol</i>
DUTT	<i>Direct Underreach Transfer Tripping</i>
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
HIL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
K0	Fator de Compensação de Terra
K0M	Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero
LAN	<i>Local Area Networks</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
PLC	<i>Power Line Carrier</i>
POTT	<i>Permissive Overreach Transfer Tripping</i>
PUTT	<i>Permissive Underreach Transfer Tripping</i>
RTDS	<i>Real-Time Digital Simulator</i>
RTU	<i>Remote Terminal Units</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. As Linhas de Transmissão e os Desafios na área de Proteção	13
1.2. Motivação	14
1.3. Objetivos	16
1.4. Estrutura da Dissertação	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Proteção de Distância	18
2.2. O Uso de Telecomunicação na Proteção de LTs	18
2.3. Estrutura e Lógicas dos Esquemas de Teleproteção	20
2.3.1. Estrutura Convencional de Esquemas de Teleproteção	22
2.3.2. Estrutura baseada na IEC 61850-90-1	22
2.3.3. Lógicas dos Esquemas de Teleproteção	24
2.4. LTs de Circuitos Paralelos	30
2.4.1. Fator de Compensação de Terra	31
2.4.2. Erros na Medição de Impedância devido à Mútua de Sequência Zero	34
2.5. Uso do RTDS em Testes de Proteção	42
2.6. Considerações Finais	43
3. ANÁLISE EM LT DE CIRCUITO SIMPLES	43
3.1. Sistema de Potência Modelado	43
3.2. Circuitos de Controle Modelados	45
3.2.1. Sistemas de Teleproteção Modelados	45
3.3. Funções de Proteção	49
3.4. Resultados dos Testes baseados na Estrutura Convencional	51
3.4.1. Cenário 1 - Faltas na Zona de Superposição	52
3.4.2. Cenário 2 - Faltas Internas próximas ao Terminal S	53
3.4.3. Cenário 3 - Faltas Externas próximas ao Terminal S	58
3.4.4. Cenário 4 - Faltas Internas - Disjuntor do Terminal S Aberto	58
3.4.5. Cenário 5 - Faltas Internas - Canal Inoperante	60
3.4.6. Cenário 6 - Faltas Externas - Canal Inoperante	60
3.4.7. Cenário 7 - Falha de Canal durante Faltas Internas e Externas	61
3.4.8. Consideração sobre Sinais Espúrios	62
3.5. Resultados dos Testes Baseados na IEC 61850-90-1	63
3.6. Considerações Finais	65
4. ANÁLISE EM LT DE CIRCUITO DUPLO	66
4.1. Sistema de Potência Modelado	66
4.1.1. Equivalentes do Sistema	67

4.1.2.	Fluxo de Potência Real e Tensões Internas das Fontes Equivalentes -----	68
4.1.3.	Modelagem das LTs -----	70
4.1.4.	Fluxo de Potência no RTDS -----	72
4.2.	Circuitos de Controle -----	73
4.2.1.	Sistema de Teleproteção Modelado -----	74
4.3.	Funções de Proteção -----	76
4.3.1.	Memória de Cálculo – Relés 1 e 2 -----	77
4.3.2.	Ajustes dos Relés 3 e 4 -----	85
4.4.	Resultados dos Testes -----	86
4.4.1.	Cenário 1 - LT em Operação Normal Sem Mútua -----	87
4.4.2.	Cenário 2 - LT em Operação Normal Com Mútua – Sem KOM -----	88
4.4.3.	Cenário 3 - LT em Operação Normal Com Mútua – Com KOM -----	94
4.4.4.	Cenário 4 - Circuito Paralelo Aterrado - Sem Mútua -----	96
4.4.5.	Cenário 5 - Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Sem KOM -----	97
4.4.6.	Cenário 6 - Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Com KOM -----	99
4.4.7.	Análise do <i>Transient Blocking</i> -----	101
4.5.	Considerações Finais -----	104
5.	Conclusões e Recomendações -----	105
5.1.	Publicação associada -----	107
5.2.	Recomendações de Trabalhos Futuros -----	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	109
	APÊNDICE A -----	112
	APÊNDICE B -----	113

1. INTRODUÇÃO

1.1. As Linhas de Transmissão e os Desafios na área de Proteção

O sistema elétrico de potência (SEP) do Brasil tem, em sua matriz energética, a geração hidráulica como a maior fonte de energia. Desta forma, as grandes distâncias entre as usinas hidrelétricas e os centros consumidores justificam a existência de extensas linhas de transmissão (LTs).

O Sistema Interligado Nacional (SIN), que surgiu devido ao contínuo aumento e modernização dos centros urbanos e parques industriais, cresce progressivamente, visando suprir a necessidade de um sistema com maior redundância de fontes de energia. A Figura 1.1 mostra essa evolução do SIN em termos de expansão das LTs, abrangendo também uma previsão para os próximos anos.

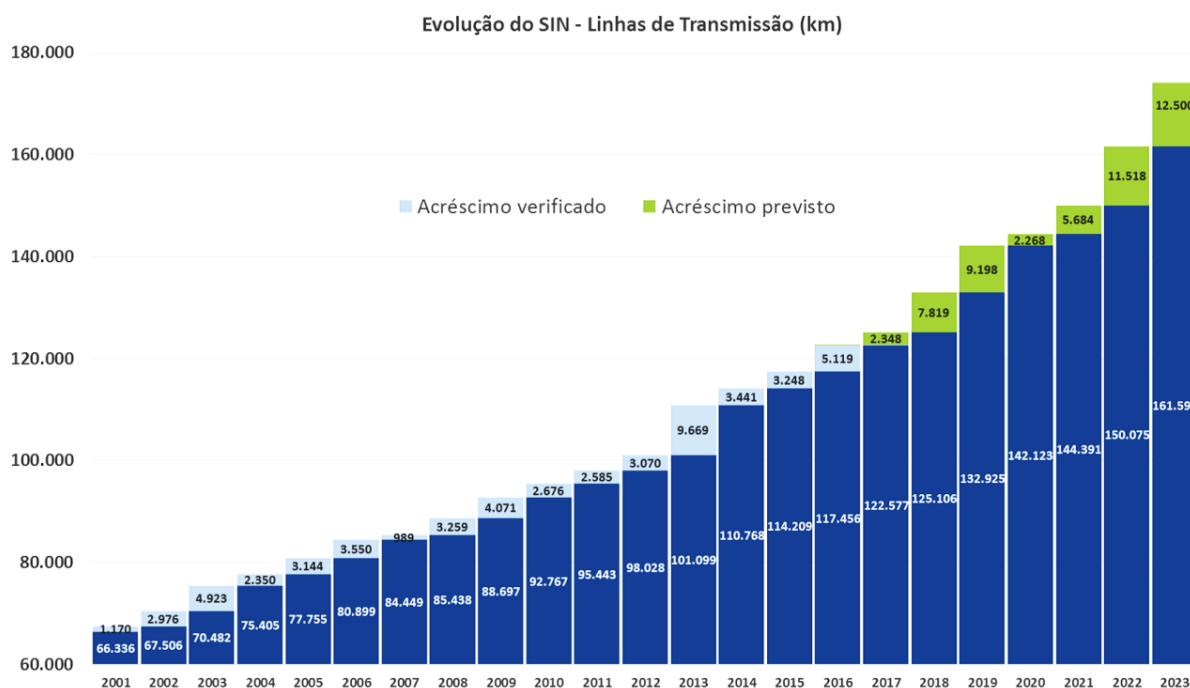


Figura 1.1 - Evolução do SIN.
Fonte: ONS (2017)

Esse contínuo crescimento conduz a configurações cada vez mais complexas no SEP, exigindo grandes desafios na área da Proteção em termos de estabilidade e continuidade do serviço. As LTs, por percorrerem uma extensa área geográfica e por serem submetidas às

mais adversas condições climáticas e fatores externos, são os componentes mais vulneráveis e estão sujeitas à maior probabilidade de ocorrência de eventos prejudiciais ao sistema (Guerrero, 2011). Portanto, uma unidade de proteção de alta velocidade, seletiva, confiável e segura em uma LT é essencial para um bom desempenho do SEP.

Devido às grandes dimensões das LTs, na maioria das vezes, a função mais utilizada como proteção principal para tal elemento do sistema elétrico é a proteção de distância – ANSI 21 – (Guimarães, 2016), a qual utiliza medição de corrente e tensão para determinação da impedância “vista” pelo relé e distinção se a falta é interna ou externa. Entretanto, essa função não tem capacidade de garantir simultaneamente eliminação de faltas em toda a extensão da LT, em alta velocidade e seletividade absoluta por si só. Nesse sentido, o Grupo de Trabalho 34/35.11 do CIGRÉ (2000) apresenta os benefícios da Teleproteção, que contribui para a solução desse problema através do uso de telecomunicações.

Além disso, a IEC 61850 Parte 90-1 (2010) forneceu uma visão abrangente dos principais aspectos a serem considerados na comunicação entre subestações e trouxe a possibilidade da substituição de estruturas convencionais de Teleproteção por estruturas baseadas na troca de mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), viabilizando ainda mais ganhos aos sistemas de proteção.

1.2. Motivação

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), atualmente existem no SIN 4405 circuitos de LTs, sendo que 1874 são de LTs de circuito simples e o restante (2531) são de LTs com mais de um circuito. Por razões técnico-econômicas, limitações administrativas e controle do impacto ambiental, muitos desses circuitos correm paralelamente em uma mesma torre ou com grande proximidade quando em torres diferentes. A obtenção de faixas de servidão para passagem das LTs envolve custos elevados, como a compra e manutenção de terras. Em se optando por linhas com circuito duplo há uma redução destes gastos (Santos, 2007).

Tendo em vista tal paralelismo e a proximidade entre os circuitos, o efeito causado por acoplamentos magnéticos deve ser considerado, pois as medições de tensão e corrente dos relés podem ser afetadas e, conseqüentemente, erros de cálculos na sua proteção de distância (e localizadores de faltas) podem aparecer, principalmente quando da ocorrência de faltas a terra, causados pelo acoplamento mútuo de sequência zero que aparece entre os circuitos devido ao fluxo magnético comum que os enlaça.

Nesse caso, é possível ocorrer casos de subalcance (impedância “vista” pelo relé é maior que a impedância efetiva de falta) ou sobrealcance (impedância “vista” pelo relé é menor que a impedância efetiva de falta).

Também em circuitos paralelos, a abertura “sequencial” dos disjuntores da linha em falta pode ocasionar, por um rápido instante, inversão da direção da corrente de falta na linha sem defeito e, conseqüentemente, provocar ativação ou desativação dos elementos das funções de distância e direcional nos relés das suas respectivas extremidades.

Todas essas situações mostram que um sistema composto por uma LT de dois circuitos geometricamente paralelos pode ter sua proteção afetada, principalmente se a proteção de distância esteja sendo utilizada. Isso sugere que os Esquemas de Teleproteção também podem ser afetados, já que utilizam elementos da função de distância nas suas lógicas.

Atualmente, alguns trabalhos publicados na literatura técnica têm seu foco na análise da influência do acoplamento mútuo de sequência zero sobre a função de distância, sendo que a maioria abrange tal tema de forma qualitativa e de forma teórica. Esta dissertação propõe não apenas a análise prática da problemática e influência sobre a proteção de distância de relés reais, mas também sobre os Esquemas de Teleproteção, fazendo uma avaliação em um sistema composto por uma LT de circuito duplo real modelado no Simulador Digital em Tempo Real (RTDS – *Real-Time Digital Simulator*), sendo esse o destaque e a principal diferença diante dos trabalhos encontrados.

A melhora do desempenho da proteção não está apenas associada à utilização de Esquemas de Teleproteção, mas sim à escolha apropriada dos mesmos, a qual deve levar em consideração a particularidade de cada esquema, os fatores relacionados ao sistema de telecomunicações utilizado, as características do sistema elétrico e da própria LT, conforme destacado pelo ONS em (ONS, 2016). Daí a importância de estudos e simulações que levam em conta a comparação de tais esquemas, o que possibilita a obtenção das vantagens e desvantagens de cada um.

Também é importante ressaltar que cada fabricante de relé de proteção implementa lógicas de Teleproteção com pequenas variações (Ordacgi, 2010). Portanto, quando se trata do mesmo esquema, é possível que particularidades nas lógicas façam com que a proposta de determinado fabricante tenha um desempenho melhor, seja mais confiável e seguro.

1.3. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é analisar os Esquemas de Teleproteção, através de uma estrutura de simulação em tempo real baseada na IEC 61850-90-1, para verificação e comparação de seus desempenhos tanto em sistemas de LTs de circuito simples como em sistemas de LTs de circuito duplo.

Para isso, têm-se como objetivos específicos os tópicos indicados a seguir:

- Implementar uma estrutura de teste em malha fechada ou *hardware-in-the-loop* (HIL) composta pelo RTDS e relés de proteção reais, baseando-se na composição geral dos Esquemas de Teleproteção, conforme padrão IEC 60834-1;
- Analisar comparativamente os Esquemas de Teleproteção em um sistema composto por LT de circuito simples, verificando as vantagens e desvantagens de cada um;
- Utilizar técnicas de interface distintas (uma baseada em fiação convencional, e outra baseada na IEC 61850-90-1, que propõe interligações através de mensagens GOOSE) nos testes para identificação dos ganhos trazidos pela IEC 61850-90-1;
- Utilizar nas análises relés de dois conceituados fabricantes, para comparação de resultados e verificação de particularidades nas lógicas que podem gerar melhores desempenhos nos Esquemas de Teleproteção;
- Identificar os efeitos do acoplamento magnético entre os circuitos de uma LT dupla sobre os elementos da função de distância de um relé real, e a possível influência no desempenho dos Esquemas de Teleproteção;
- Identificar as consequências de se utilizar ou não o Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero nos relés de proteção;
- Análisar o funcionamento dos Esquemas de Teleproteção frente à reversão de corrente oriunda da abertura sequencial dos disjuntores de uma das linhas do circuito paralelo;
- Contribuir para melhores escolhas por parte dos projetistas de sistemas de proteção;
- Avaliar o uso do RTDS para esse tipo de estudo.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está organizada em 5 capítulos, conforme descritos a seguir:

No presente Capítulo, **Introdução**, foi apresentada uma contextualização dos assuntos que englobam o enfoque desta dissertação, a motivação para seu desenvolvimento, os objetivos e a estrutura do texto de dissertação.

No Capítulo 2, **Fundamentação Teórica**, um levantamento bibliográfico é desenvolvido, o qual reúne o que há na literatura técnica sobre o tema e que foi utilizado como base da dissertação desenvolvida. Primeiramente, são apresentados conceitos básicos da função de distância, mostrando como a utilização de telecomunicações pode melhorar o desempenho dos sistemas de proteção e, nesse mesmo contexto, são destacadas as estruturas e lógicas dos Esquemas de Teleproteção. Posteriormente, é apresentada uma análise dos efeitos do acoplamento mútuo sobre a função de distância, considerando duas configurações operacionais de uma LT de circuito duplo, e destacadas as consequências do uso do fator de compensação de mútua de sequência zero em relés. Por fim, são destacados os benefícios do uso do RTDS e dos testes em malha fechada em avaliações de esquemas de proteção.

No Capítulo 3, **Análise em LT de Circuito Simples**, são apresentados os resultados de uma análise comparativa dos Esquemas de Teleproteção aplicados em um sistema composto por uma LT de circuito simples, sendo destacados também os ganhos trazidos pela IEC 61850-90-1.

No Capítulo 4, **Análise em LT de Circuito Duplo**, são apresentados os resultados de uma análise prática sobre os efeitos do acoplamento magnético entre os circuitos de uma LT dupla nos elementos da função de distância, e a influência no desempenho dos Esquemas de Teleproteção. Vale mencionar que os detalhes dos sistemas modelados, da estrutura implementada para os testes, da metodologia adotada em cada uma das análises e todas as demais considerações são apresentadas nos respectivos capítulos de resultados.

No Capítulo 5, **Conclusões e Recomendações**, são apresentadas as principais conclusões extraídas no desenvolver desta dissertação, a publicação associada, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são listadas as **Referências Bibliográficas** utilizadas na elaboração deste texto e os **Apêndices**, com informações adicionais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Proteção de Distância

Como já mencionado, a função de proteção de distância – ANSI 21 – não tem capacidade de garantir, simultaneamente, a eliminação instantânea de faltas em toda a extensão da LT e seletividade absoluta por si só. Devido a muitos fatores, incluindo erro dos equipamentos de medição (Transformadores de corrente – TC – e de potencial – TP), tolerância de operação do relé, tolerância de cálculos e variações da impedância da fonte (CIGRÉ, 2000), não é possível distinguir com precisão se faltas próximas ao terminal remoto são internas ou externas. Por isso, essa função necessita que zonas de proteção sejam definidas.

A primeira zona da proteção ANSI 21 é tipicamente parametrizada para ficar sensível a faltas até 80 a 90% da LT, sendo caracterizada por transmitir um comando de abertura ao disjuntor de forma instantânea, ou seja, sem temporização programada. Já a segunda zona, que deve se sensibilizar com faltas em toda a LT, apresenta um alcance que chega a cerca de 20% da LT adjacente (à frente) e é caracterizada por apresentar uma temporização pré-definida, tipicamente de 20 a 30 ciclos. Geralmente são configuradas também outras zonas de acordo com o projeto de proteção, como, por exemplo, uma terceira zona com sentido reverso, temporizada, capaz de identificar faltas atrás da LT protegida.

Considera-se que a aplicação da proteção diferencial de corrente – ANSI 87L – seria mais adequada, tendo em vista que garantiria atuações de alta velocidade e seletivas para faltas em qualquer ponto da LT. No entanto, no contexto de LTs com grandes dimensões, o emprego dessa função torna-se mais difícil, devido à necessidade de troca de informações de corrente entre os relés de ambos os terminais de forma sincronizada.

2.2. O Uso de Telecomunicação na Proteção de LTs

Considerando ainda a proteção de distância, o tempo de eliminação de uma falta interna à LT e fora da primeira zona (ou seja, dentro da segunda zona), 20 a 30 ciclos (temporização típica de segunda zona), pode causar instabilidade no sistema, dependendo das condições operativas do mesmo, bem como do tipo de perturbação (Guerrero, 2011). O Grupo

de Trabalho 34/35.11 do CIGRÉ (2000) apresenta a importância do uso da telecomunicação para a solução desse problema, destacando a melhora do desempenho da proteção e a possibilidade de comandos de disparo de alta velocidade (na ordem de 2 a 3 ciclos) para faltas em toda a extensão da LT.

Segundo o CIGRÉ (2000), a proteção de LTs que utiliza telecomunicação é dividida em dois grupos. O primeiro, Esquemas de Comparação Analógica, envolve transmissão e comparação de parâmetros elétricos tal como corrente (magnitude e/ou fase) entre as extremidades da linha protegida (são eles: Proteção diferencial de corrente, Proteção por comparação de fase e Proteção por comparação de carga). Já o segundo grupo, Esquemas de Teleproteção por Comparação de Estado, envolve transmissão e comparação de informações lógicas entre as extremidades da linha protegida (esses esquemas são foco desta dissertação e serão apresentados no próximo capítulo).

Os Esquemas de Teleproteção por Comparação de Estado, chamados nessa dissertação de apenas “Esquemas de Teleproteção”, necessitam que os relés dos terminais da LT compartilhem informações sobre a direcionalidade detectada da falta. Desta maneira, a comparação da direção vista da falta entre os terminais, permite que cada relé determine se a falha é interna à LT e acelere a tomada de decisão, fornecendo, assim, uma proteção de alta velocidade e confiável para todo o comprimento da LT.

As informações compartilhadas entre os relés são muito básicas e se referem ao estado lógico das saídas de funções de proteção, normalmente o estado lógico do *pick-up* dos elementos de subalcance (normalmente, *pick-up* da zona 1 da proteção de distância de fase e de neutro – ANSI 21F e 21N), elementos de sobrealcance (normalmente, *pick-up* de zona 2 da ANSI 21F e 21N e de sobrecorrente direcional – ANSI 67 – na direção da LT protegida) e elementos reversos (normalmente, *pick-up* da zona reversa da ANSI 21F e 21N e *pick-up* da ANSI 67N, elemento reverso).

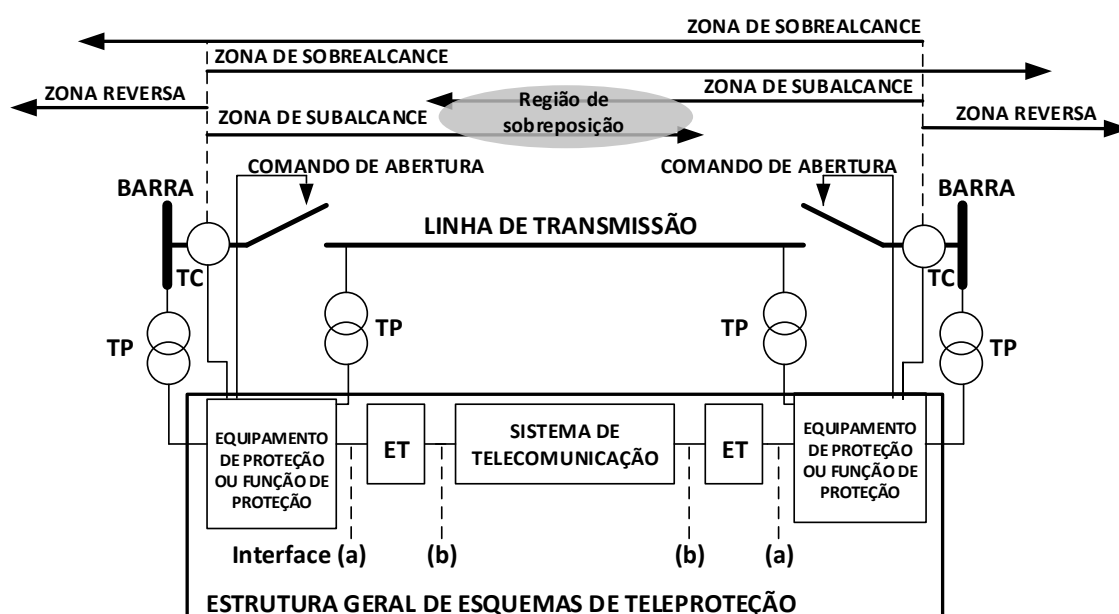
Por esse motivo, os requisitos de comunicação para esses esquemas são consideravelmente menos rigorosos do que para esquemas de proteção de comparação analógica, nos quais é necessário o compartilhamento contínuo e sincronizado de informações. A velocidade da comunicação é sempre de extrema importância, pois o propósito de usar a comunicação é melhorar a velocidade de disparo da proteção, no entanto, as variações na velocidade de comunicação em esquemas de comparação de estados são mais toleradas.

Cabe destacar também que a segurança do canal de comunicação é essencial em Esquemas de Teleproteção para evitar sinais falsos que possam causar atuação incorreta dos

relés de proteção. Da mesma forma, a confiabilidade do canal de comunicação é importante para garantir que os sinais sejam transferidos adequadamente durante as faltas (CIGRÉ, 2000).

2.3. Estrutura e Lógicas dos Esquemas de Teleproteção

A Figura 2.1 apresenta a Estrutura Geral dos Esquemas de Teleproteção de acordo com a IEC 60834-1 (1999) e descreve os principais componentes que interagem na operação dos mesmos. As interfaces (a) delimitam o "Sistema de Teleproteção" e as interfaces (b) delimitam o "Sistema de Telecomunicação".



TP- TRANSFORMADOR DE POTENCIAL
 TC- TRANSFORMADOR DE CORRENTE
 ET- EQUIPAMENTO DE TELEPROTEÇÃO OU FUNÇÃO DE TELEPROTEÇÃO

Figura 2.1 - Estrutura Geral dos Esquemas de Teleproteção.

O Sistema de Telecomunicação é constituído pelo meio físico de transmissão dos sinais e pelos equipamentos de telemunicação, os quais são projetados para possibilitar o compartilhamento de informações entre as extremidades da LT de forma rápida, segura e confiável (Guerrero, 2011).

Os principais meios de comunicação empregados nos Esquemas de Teleproteção são: fio piloto, enlaces de rádio, enlaces via satélite, fibra ótica e *Power Line Carrier* (PLC). Historicamente, os enlaces de rádio microondas e PLC foram amplamente utilizados na teleproteção baseada em sinalização, sendo essa última tecnologia a que mais se

destacou, pois possibilitou o uso das próprias LTs como meio de comunicação. Nos últimos anos, no entanto, a evolução na tecnologia de proteção numérica e a substituição dos cabos pára-raios convencionais por cabos *Optical Ground Wire* (OPGW) possibilitou que fibras óticas fossem uma eficaz alternativa nas telecomunicações em sistemas elétricos. Como consequência disso, vem ocorrendo uma substituição gradativa dos enlaces convencionais (Guerrero, 2011).

O CIGRÉ 2000 sugere os requisitos desse sistema, abrangendo os principais parâmetros que devem ser atendidos, quais sejam: tempo de propagação, largura de banda (ou taxa de bits, termo utilizado para sistemas digitais) e qualidade do sinal. A Tabela 2.1 destaca para cada Esquema de Teleproteção as recomendações feitas em relação ao tempo de propagação, o qual está relacionado ao tempo gasto na transmissão do sinal pelo Sistema de Telecomunicação, ou seja, o tempo gasto pelo sinal entre as interfaces (b) da Figura 2.1.

Tabela 2.1 - Requisitos do Tempo de Propagação.

Parâmetro	Comparação Direcional por Bloqueio	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance	Aceleração de zona	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
Tempo de Propagação	<10ms	<10ms	<10ms	<10ms	<10ms

A velocidade de tomada de decisão dos Esquemas de Teleproteção depende do tempo de propagação, por esse motivo esse parâmetro é um dos mais críticos dentro dos requisitos do Sistema de Telecomunicação.

O Sistema de Teleproteção engloba o Sistema de Telecomunicação e é também constituído pelos equipamentos de Teleproteção dos extremos da LT, os quais fazem a interface entre o relé de proteção e os equipamentos de telecomunicações. Vale ressaltar que essa função pode ser dedicada (um equipamento dedicado realiza essa função) ou integrada através de algoritmos dentro dos próprios relés ou dentro dos próprios equipamentos de telecomunicações (Guerrero, 2011).

O tempo gasto a partir da mudança de estado da entrada do Equipamento de Teleproteção transmissor até a mudança de estado da saída do equipamento receptor, ou seja, o tempo gasto pelo sinal entre as interfaces (a) da Figura 2.1, é chamado de Tempo de Operação da Teleproteção (T_A), cujos requisitos também são recomendados pelo CIGRÉ 2000, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Requisitos do Tempo de Operação da Teleproteção (T_A).

Parâmetro	Comparação Direcional por Bloqueio	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance	Aceleração de zona	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
Tempo de Operação da Teleproteção T_A	<25ms	<25...30ms	<25...30ms	<25...30ms	<50ms

2.3.1. Estrutura Convencional de Esquemas de Teleproteção

No que diz respeito à estrutura convencional de Esquemas de Teleproteção, as interfaces (a) mostradas na Figura 2.1 são comumente implementadas através de fios de cobre, que conectam os contatos secos do relé de proteção às entradas opto-isoladas do Equipamento de Teleproteção.

Por outro lado, as interfaces (b), também mostradas na Figura 2.1, são comumente implementadas pela comunicação de dados seriais elétricos ou óticos, padronizados como meios de comunicação da camada física. Em relação aos protocolos aplicados, houve grandes dificuldades de se chegar a uma padronização mundial. O esforço inicial buscando uma padronização da camada de enlace como protocolo de comunicação veio com os padrões DNP e IEC-870-5-1 na comunicação entre dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs – *Intelligent Electronic Devices*) e RTUs (*Remote Terminal Units*) das subestações. Porém, o protocolo DNP foi aplicado de forma preferencial em países da América e o IEC-870-5-1 em países da Europa, continentes de origem dos padrões (Guerrero, 2011).

2.3.2. Estrutura baseada na IEC 61850-90-1

A norma IEC 61850, que surgiu em 2004, é aplicável aos sistemas de automação e define a comunicação entre IEDs e os requisitos dos sistemas relacionados (IEC, 2003). Define serviços de comunicação (protocolos de comunicação) e estabelece um conjunto de padronizações para a organização de dados em um IED, facilitando a interoperabilidade entre equipamentos de diversos fabricantes.

Desta forma, estruturada em várias partes, ela padroniza a linguagem de configuração, o modelo de informação e o modelo de dados, o qual é orientado a objetos, ou seja, é estruturado considerando os elementos funcionais dos diversos equipamentos e dispositivos

que possuem dados utilizados em um sistema de automação, controle e proteção, independente de fabricantes.

Uma das aplicações que a norma permitiu foi a troca de mensagens GOOSE, através de uma rede de comunicação baseada em *Ethernet*, em sistemas integrados de proteção e controle de uma subestação. Este fato permitiu a substituição de muitos sinais binários usados para troca de informações entre dispositivos através de fiação convencional.

Desde que foi lançada em 2004, a IEC 61850 teve um crescimento em relação aos assuntos abordados, o que gerou até mesmo a mudança de seu nome. Antes intitulada “*Communication networks and systems in substations*” passou a ter o nome de “*Communication networks and systems for power utility automation*”. Novas partes foram sendo adicionadas as 14 que haviam no início, sendo hoje constituída por 31 partes. O que iniciou com uma padronização visando apenas à subestação, ampliou-se para aplicações em automação, controle e proteção de um sistema de energia por completo.

Em 2010, a norma foi acrescida da parte 90-1, a qual traz os principais aspectos a serem considerados em uma comunicação entre subestações. Ela propõe dois mecanismos diferentes de comunicação entre redes distintas de área local (LANs – *Local Area Networks*) alocadas em pontos remotos.

O primeiro mecanismo, baseado no método do tunelamento, permite a comunicação direta entre relés localizados nos extremos de uma LT. Assim, a rede de comunicação da subestação local pode se expandir até uma subestação remota, permitindo a livre alocação de uma função lógica, como por exemplo, Teleproteção (Guerrero *et al.*, 2012). Na prática, o tunelamento é estabelecido por meio de *switches* ou roteadores de rede (IEC, 2010). Portanto, esses dispositivos de comunicação cumprem a função de Teleproteção (mostrada na Figura 2.1), ou seja, permitem que as mensagens GOOSE (enviadas pelo relé de proteção) cheguem ao Sistema de Telecomunicação e, conseqüentemente, cheguem à outra extremidade da LT. Note que, para essa estrutura, o Sistema de Telecomunicação precisa suportar comunicações *Ethernet*.

Vale ressaltar que a norma propõe esse mecanismo, mas não padroniza as formas de implementar a comunicação entre duas redes LANs distintas através de tunelamento. Em (Oliveira *et al.*, 2013) são mostradas e sugeridas algumas maneiras práticas de estabelecer o tunelamento, são realizados testes de laboratório e um teste piloto de campo. Outros trabalhos de transmissoras brasileiras de energia são apresentados em (Sylvestre *et al.*, 2017) e (Merighi *et al.*, 2014), onde projetos piloto são propostos para o uso da IEC 61850-90-1 (2010) em Teleproteção.

O segundo mecanismo utiliza os próprios equipamentos de Teleproteção como *gateway* de cada rede LAN. Deste modo, o equipamento de Teleproteção no terminal receptor atua como um “*proxy*” ou espelho da função lógica habilitada no terminal transmissor (Guerrero *et al.*, 2012). Na prática, o relé de proteção envia mensagens GOOSE para o Equipamento de Teleproteção e este é responsável por codificar essas informações em um protocolo de comunicação compatível (protocolo não IEC 61850) com o Sistema de Telecomunicação. Na extremidade receptora da LT, o Equipamento de Teleproteção recebe as informações, decodifica e fornece ao relé de proteção através de mensagens GOOSE.

2.3.3. Lógicas dos Esquemas de Teleproteção

As lógicas dos Esquemas de Teleproteção comumente aplicados em LTs são encontradas em várias literaturas, como por exemplo em (Guerrero, 2011) e (CIGRÉ, 2000). Desta maneira, as mesmas são apresentadas nessa seção de forma simplificada, sendo destacado principalmente o princípio de operação de cada uma. Vale mencionar que algumas particularidades relevantes das lógicas dos fabricantes dos relés utilizados nesta dissertação são apresentadas juntamente com a análise dos resultados.

2.3.3.1 Transferência Direta de Disparo por Subalcance (DUTT)

A lógica simplificada do esquema de Transferência Direta de Disparo por Subalcance (DUTT – *Direct Underreach Transfer Tripping*) é mostrada na Figura 2.2.

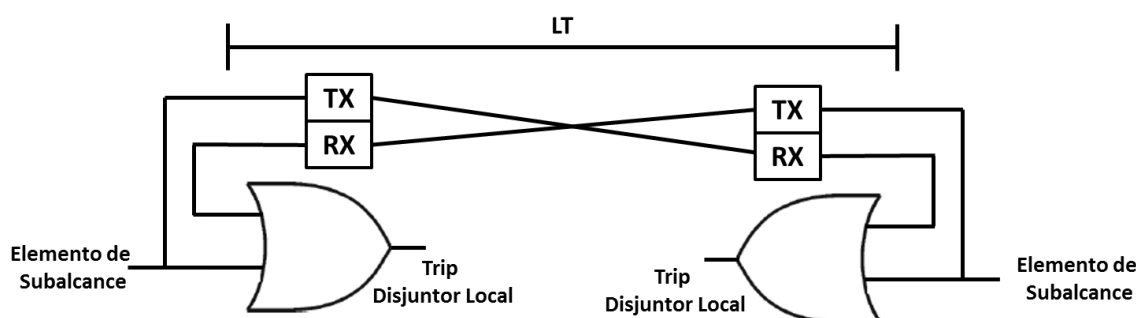


Figura 2.2 - Lógica Simplificada - Transferência Direta de Disparo por Subalcance.

Este esquema utiliza, basicamente, elementos de subalcance (1º Zona), os quais são obtidos, como já mencionado, através da função de distância. O esquema geralmente é

aplicado com um canal ativo que transmite um sinal de GUARDA em condições normais de operação para monitoração contínua do canal de telecomunicação (CIGRE, 2000).

Quando o elemento de subalcance do relé local detecta uma falha, é enviado diretamente um sinal de *Trip* para o disjuntor local e um sinal de DISPARO para o terminal remoto. O sinal de DISPARO recebido pelo relé remoto atua diretamente no circuito de abertura do disjuntor.

É válido destacar a necessidade de sobreposição dos elementos de subalcance de ambos os terminais da LT para evitar uma lacuna, onde falhas não seriam detectadas. Essa sobreposição é destacada na Figura 2.1 (região de sobreposição).

Exemplificando, para falhas internas dentro da região de sobreposição, as funções de subalcance em cada extremidade da LT operam, enviam um sinal de *Trip* para seus respectivos disjuntores e, ao mesmo tempo, causam o envio de um sinal de DISPARO (transferência direta de disparo) para o terminal remoto. Nesse caso, nenhum efeito adicional é causado pelo sinal da Teleproteção, pois os disjuntores já receberam o sinal de *Trip* pelas proteções *stand-alone*.

Para falhas internas dentro da zona do elemento de subalcance de apenas uma extremidade da LT, falta próxima ao disjuntor local por exemplo, um sinal de *Trip* é gerado e enviado pelo relé local ao seu respectivo disjuntor. Simultaneamente, um sinal de DISPARO é enviado para o terminal remoto, cujo elemento de subalcance não detecta a falta. Nesse caso, o sinal da Teleproteção, gerado devido à sensibilização do elemento de subalcance do terminal oposto, atua no circuito de abertura do disjuntor.

2.3.3.2 Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance

A lógica simplificada do esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance (PUTT – *Permissive Underreach Transfer Tripping*) é mostrada na Figura 2.3.

Este esquema utiliza tanto elementos de subalcance (1º Zona) como elementos de sobrealcance em ambos os terminais da LT. Como já mencionado, os elementos de sobrealcance são obtidos normalmente através da função de distância e da função de sobrecorrente direcional. Com a função direcional de terra se obtém maior sensibilidade na detecção de faltas fase-terra.

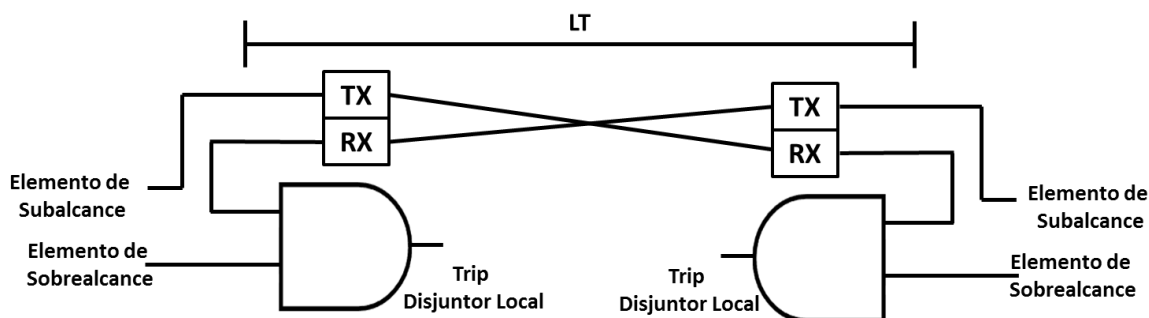


Figura 2.3 - Lógica Simplificada - Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance.

O esquema geralmente é aplicado com um canal ativo que transmite um sinal de GUARDA em condições normais de operação para monitoração contínua do canal de telecomunicação (CIGRÉ, 2000).

Quando o elemento de subalcance do relé local detecta uma falha, é enviado diretamente um sinal de *Trip* para o disjuntor local e um sinal de DISPARO é enviado para o terminal remoto. O sinal de DISPARO recebido atua no circuito de abertura do disjuntor apenas se, no momento da recepção, o elemento de sobrealcance do respectivo terminal tiver detectado falta dentro da sua zona de proteção.

Os elementos de subalcance de ambos os terminais da linha devem se sobrepôr em alcance para evitar uma lacuna, onde falhas não seriam detectadas.

Exemplificando, para falhas internas dentro da região de sobreposição, as funções de subalcance em cada extremidade da LT operam, enviam um sinal de *Trip* para seus respectivos disjuntores e, ao mesmo tempo, causam o envio de um sinal de DISPARO para o terminal remoto. Nesse caso, nenhum efeito adicional é causado pelo sinal de Teleproteção, pois os disjuntores já receberam o sinal de *Trip* pelas proteções *stand-alone*.

Para falhas internas, dentro da zona do elemento de subalcance de apenas uma extremidade da LT, falta próxima ao disjuntor local por exemplo, um sinal de *Trip* é gerado pelas proteções *stand-alone*, é enviado pelo relé local ao seu respectivo disjuntor e um sinal de DISPARO é enviado para o terminal remoto, cujo elemento de subalcance não detecta a falta. Nesse caso, o sinal da Teleproteção, gerado devido à sensibilização do elemento de subalcance do terminal oposto, atua no circuito de abertura do disjuntor, pois, no momento da recepção, o elemento de sobrealcance do respectivo terminal detecta a falta dentro da sua zona de proteção.

2.3.3.3 Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance

A lógica simplificada do esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance (POTT – *Permissive Overreach Transfer Tripping*) é mostrada na Figura 2.4.

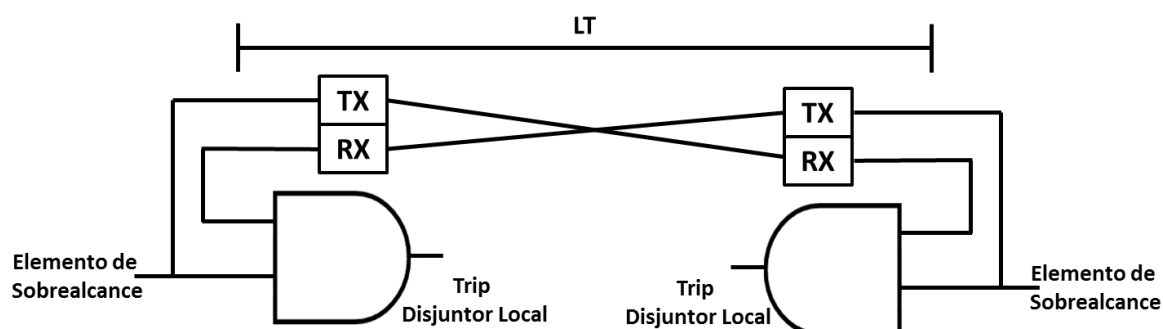


Figura 2.4 - Lógica Simplificada - Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance.

Este esquema utiliza basicamente elementos de sobrealcance em ambos os terminais da LT e, geralmente, é aplicado com um canal ativo que transmite um sinal de GUARDA em condições normais de operação para monitoração contínua do canal de telecomunicação (CIGRÉ, 2000).

Quando o elemento de sobrealcance do relé local detecta uma falha, um sinal de DISPARO é enviado para o terminal remoto. O sinal de DISPARO recebido atua no circuito de abertura do disjuntor apenas se, no momento da recepção, o elemento de sobrealcance do respectivo terminal tiver detectado falta dentro da sua zona de proteção.

Exemplificando, para falhas internas, as funções de sobrealcance em cada extremidade da LT detectam a falta e enviam imediatamente um sinal de DISPARO para o terminal remoto. O sinal da Teleproteção recebido atua no circuito de abertura do disjuntor, pois, no momento da recepção, o elemento de sobrealcance do respectivo terminal também detecta falta dentro da sua zona de proteção.

Considerando falhas externas, mas ainda dentro da zona de proteção do elemento de sobrealcance de um dos terminais da LT, a sensibilização deste elemento ocasionará o envio do sinal de DISPARO para o terminal remoto. O sinal da Teleproteção recebido no extremo remoto não atua no circuito de abertura do disjuntor, pois, no momento da recepção, o elemento de sobrealcance do respectivo terminal não detecta falta, já que o sentido é reverso à sua zona de proteção.

2.3.3.4 Comparação Direcional por Bloqueio

A lógica simplificada do esquema de Comparação Direcional por Bloqueio (DCB – *Directional Comparison Blocking*) é mostrada na Figura 2.5.

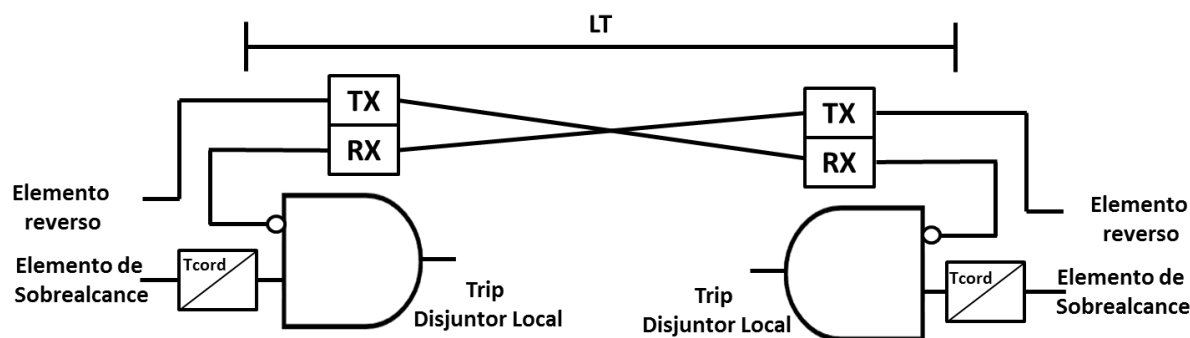


Figura 2.5 - Lógica Simplificada - Comparação Direcional por Bloqueio.

Este esquema utiliza elementos de sobrealcance e elementos reversos (utilizados para bloqueio) em ambos os terminais da LT. Os elementos reversos são obtidos normalmente através de zonas de proteção parametrizadas em sentido reverso, tanto da função de distância como da função de sobrecorrente direcional.

Os elementos reversos ou de bloqueio configurados no terminal local devem detectar falhas externas à LT (faltas atrás do terminal local), abrangendo todo o alcance externo à LT coberto pelos elementos de sobrealcance do terminal remoto. Portanto, são configurados, com margem, para além do sobrealcance do terminal remoto.

A própria LT é normalmente o meio de comunicação utilizado por esse esquema, pois o canal de comunicação não é utilizado no momento em que uma falta interna acontece. O canal é usado somente para transmitir um sinal de bloqueio quando a falha é externa à LT.

Quando o elemento reverso ou de bloqueio detecta uma falha, o transmissor que estava em sua condição normal, estado *Off*, é chaveado para o estado *On*. O recebimento deste sinal no terminal remoto, cujo elemento de sobrealcance foi atuado, bloqueia o disparo do disjuntor. O elemento de sobrealcance do terminal remoto, quando é ativado, atua no circuito de disparo do disjuntor se nenhum comando de bloqueio for recebido, por esse motivo um temporizador de coordenação (Tcord) é necessário para permitir que o sinal de bloqueio seja recebido. O temporizador é configurado visando o tempo de propagação do sinal e qualquer diferença de tempo de operação entre os elementos de bloqueio local e os elementos de sobrealcance remoto.

Exemplificando, para faltas internas, as funções de sobrealcance em cada extremidade da LT detectam a falta e nenhum sinal de bloqueio é recebido, pois os elementos reversos não

foram atuados. Desta maneira, um comando de *Trip* é liberado e enviado para o disjuntor logo após o tempo de coordenação (T_{cord}).

Considerando falhas externas, mas ainda dentro da zona de proteção dos elementos de sobrealcançe de um terminal, o respectivo disjuntor não receberá comando de abertura, pois um sinal de bloqueio da Teleproteção, gerado devido à sensibilização dos elementos reversos do terminal oposto, é recebido.

2.3.3.5 Comparação Direcional por Desbloqueio

A lógica simplificada do esquema de Comparação Direcional por Desbloqueio (DCUB – *Directional Comparison Unblocking*) é mostrada na Figura 2.6.

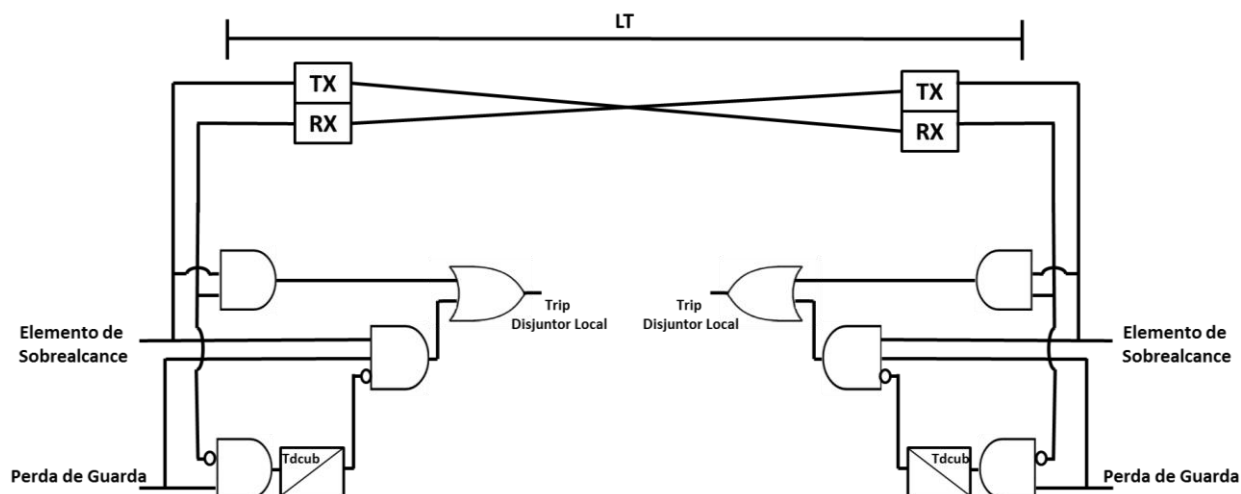


Figura 2.6 - Lógica Simplificada - Comparação Direcional por Desbloqueio.

Este esquema utiliza elementos de sobrealcançe em ambos os terminais da LT e possui uma lógica projetada para lidar com perdas de sinal de comunicação durante a falha na LT protegida.

Nesse esquema é necessário a transmissão de um sinal de GUARDA em condições normais de operação para monitoração contínua do canal de telecomunicação. Se em algum momento o receptor não detecta o sinal GUARDA e nem o sinal de DISPARO, a lógica entende isso como uma perda do sinal de comunicação.

Quando o elemento de sobrealcançe do relé local detecta uma falha, um sinal de DISPARO é enviado para o terminal remoto. O sinal de DISPARO recebido atua no circuito de abertura do disjuntor apenas se, no momento da recepção, o elemento de sobrealcançe do

respectivo terminal também haver detectado falta dentro da sua zona de proteção. Essa lógica específica dentro do DCUB se assemelha à lógica do esquema POTT.

Além disso, sendo detectada uma perda de sinal do canal de comunicação, causada por uma falha interna da LT, um temporizador é ativado (Tdcub), produzindo um desbloqueio. Assim, se durante esse período, geralmente definido entre 150 ms a 300 ms, o elemento de sobrealcance local detectar uma falha dentro da sua zona, o esquema envia um sinal de abertura para o disjuntor local.

Exemplificando, para falhas internas, as funções de sobrealcance em cada extremidade da LT detectam a falta, enviando um sinal de DISPARO para o terminal remoto. O sinal da Teleproteção recebido atua no circuito de abertura do disjuntor, pois, no momento da recepção, o elemento de sobrealcance do respectivo terminal também detecta falta dentro da sua zona de proteção. Se durante a falta interna ocorre uma perda do canal de comunicação, os respectivos disjuntores também recebem um comando de abertura, pois a lógica identifica a perda, produz um desbloqueio e emite um sinal de *Trip*, já que dentro desse período os elementos de sobrealcance são sensibilizados.

2.4. LTs de Circuitos Paralelos

Quando circuitos de uma LT correm paralelamente, gera-se um acoplamento indutivo mútuo entre os mesmos. Considerando LTs transpostas, o efeito desse acoplamento nas sequências positiva e negativa pode ser desprezado para fins práticos, pois os valores da reatância mútua são geralmente menores que 5% da impedância própria. Portanto, em condições normais de carga e em situações de curtos-circuitos sem envolvimento de terra, os circuitos paralelos podem ser considerados independentes (Ziegler, 2006).

Considerando a ocorrência de faltas com envolvimento de terra, o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero necessita ser considerado, já que durante tais eventos a soma das correntes das fases não é igual à zero, mas sim o valor correspondente a corrente de terra.

Os fatores que determinam a impedância mútua de sequência zero são: arranjo geométrico entre os condutores, resistência específica de aterramento, resistência do solo, altura dos condutores, número de cabos de guarda e frequência (Konishi, 1972).

Tendo em vista que tal acoplamento mútuo pode influenciar nas medições de tensão e corrente do relé de proteção, o efeito sobre a proteção de distância deve ser previsto.

Segundo (Reis, 2017), a influência dessa impedância mútua depende da impedância da fonte, principalmente de sequência zero, distribuição de aterramentos e de sua magnitude. Também destaca a influência desse acoplamento na medição de impedância dos relés aplicados na proteção de distância, destacando de forma teórica e simulada os erros observados em casos distintos, e evidencia a importância de considerá-lo em modelagens de LTs.

Em (Hu *et al.*, 2002) é destacado que o efeito do acoplamento mútuo varia de acordo com as condições operativas da LT e condição de falta, e impacta negativamente os relés de distância. É mencionado que a alteração nos ajustes de cobertura das zonas de proteção e/ou alteração no fator de compensação de sequência zero no relé podem contribuir para um melhor desempenho da proteção, mas isso só é possível se a configuração do barramento, a impedância do sistema e a condição operativa da LT paralela não se modificarem.

Simulações em ambiente *Matlab* são realizadas em (Santos, 2007) para também apresentar o desempenho da proteção de distância frente a curtos monofásicos associado ao efeito de indução mútua de sequência zero. Condições operativas diferentes são analisadas e casos de erros de subalcance e sobrealcance são observados, servindo para destacar a importância de tal consideração nos ajustes de proteção.

Em (Pillay *et al.*, 2011), a abordagem da problemática é realizada de forma diferente dos estudos já mencionados. Na referência, a simulação em tempo real através do RTDS é utilizada e a eficiência da metodologia adotada é destacada. Apesar dos resultados apresentados não serem de relés reais, mas sim de relés modelados no simulador, o trabalho menciona a implementação de uma estrutura em HIL e verifica a aparição de erros de alcance na função de distância diante de uma LT dupla mesmo nos casos em que as distâncias entre circuitos são da ordem de várias dezenas de metros.

2.4.1. Fator de Compensação de Terra

Considerando o *loop* de medição da função de distância para um curto-circuito fase-terra sólido na extremidade de uma LT de circuito simples, conforme mostrada a Figura 2.7, e utilizando o diagrama de equivalente de sequências (positiva, negativa e zero), mostrado na Figura 2.8, é possível realizar uma análise sobre a importância do Fator de Compensação de Terra para a função ANSI 21.

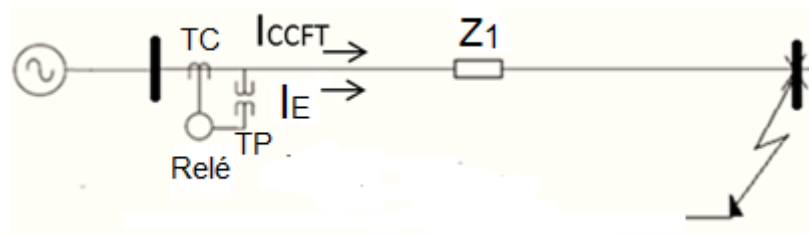


Figura 2.7 - Falta na Extremidade de uma LT de Circuito Simples.
 Fonte: Adaptado de: Maezono (2006)

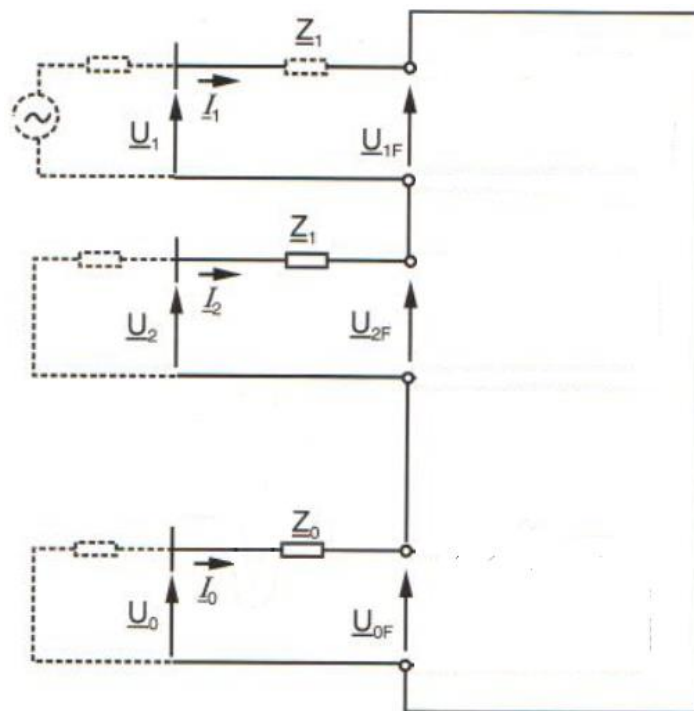


Figura 2.8 - Diagrama de Seqüências para uma Falta Monofásica em uma LT Simples.
 Fonte: Adaptado de: Ziegler (2006)

Onde:

U_X - Tensão de seqüência “X” (positiva, negativa ou zero) no ponto de medição do TP;

U_{XF} - Tensão de seqüência “X” (positiva, negativa ou zero) no ponto da falta;

I_{CCFT} - Corrente de curto-circuito fase-terra. $I_{CCFT} = I_1 + I_2 + I_0$.

I_E - Corrente de terra (Obs: É igual a I_{CCFT} se a linha é radial e não tem contribuição para o curto da outra extremidade), considerando seu sentido conforme figura acima. $I_E = 3I_0$;

Z_1 - Impedância de seqüência positiva da LT (Obs: a impedância de seqüência negativa de uma LT é igual a de seqüência positiva);

Z_0 - Impedância de seqüência zero da LT (influenciada pelo circuito de retorno da corrente de seqüência zero, ou seja, impedância dos cabos guarda, impedância de terra, impedância de falta, impedância do neutro);

Considerando que o curto-circuito é sólido (não apresenta resistência de falta), a equação 2.1 é válida. Ainda observando o diagrama da Figura 2.8, as equações 2.2, 2.3 e 2.4 podem ser obtidas e utilizadas em conjunto com a equação 2.5 para se chegar à equação 2.6, que apresenta a tensão fase-terra (V_{FASE}) medida pelo relé através do Transformador de Potencial (TP) durante a falta.

$$U_{1F} + U_{2F} + U_{0F} = 0 \quad (2.1)$$

$$U_1 = Z_1 I_1 + U_{1F} \quad (2.2)$$

$$U_2 = Z_1 I_2 + U_{2F} \quad (2.3)$$

$$U_0 = Z_0 I_0 + U_{0F} \quad (2.4)$$

$$V_{FASE} = U_1 + U_2 + U_0 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} V_{FASE} &= Z_1 I_1 + U_{1F} + Z_1 I_2 + U_{2F} + Z_0 I_0 + U_{0F} + (\mathbf{Z}_0 \mathbf{I}_0 - \mathbf{Z}_0 \mathbf{I}_0) \\ &= Z_1 (I_1 + I_2 + I_0) + I_0 (Z_0 - Z_1) = Z_1 I_{CCFT} + \frac{I_E}{3} (Z_0 - Z_1) \\ &= Z_1 I_{CCFT} + I_{CCFT} \frac{(Z_0 - Z_1)}{3} \end{aligned} \quad (2.6)$$

A corrente lida pelo relé através do Transformador de Corrente (TC) é a I_{CCFT} , portanto, a princípio, a impedância do *loop* (Z_m), lida pelo relé, é dada por:

$$Z_m = \frac{V_{FASE}}{I_{CCFT}} = Z_1 + \frac{(Z_0 - Z_1)}{3} \quad (2.7)$$

É possível notar que há um erro associado (segunda parcela da equação 2.7), já que a leitura correta da impedância para o ponto de falta seria Z_1 . Considerando tal situação, os relés de proteção não realizam simplesmente a divisão acima, mas também utilizam um fator chamado de Fator de Compensação de Terra (K_0), o qual interfere no cálculo e, conseqüentemente, na medida da impedância conforme equação 2.8:

$$Z_m = \frac{V_{FASE}}{I_{CCFT} + K_0 I_E} = \frac{Z_1 I_{CCFT} + \frac{I_E}{3} (Z_0 - Z_1)}{I_{CCFT} + K_0 I_E} = \frac{Z_1 (I_{CCFT} + I_E \frac{(Z_0 - Z_1)}{3Z_1})}{I_{CCFT} + K_0 I_E} \quad (2.8)$$

É possível notar que se K_0 é igual a $(Z_0 - Z_1)/3Z_1$, então Z_m é igual a Z_1 e, portanto, uma correta medição é realizada pelo relé. Desta forma, a comparação da impedância medida e a impedância de sequência positiva ajustada no relé se dará de forma adequada pela função de distância.

Desta forma, o Fator de Compensação de Terra, geralmente ajustado nos relés, é calculado utilizando a equação 2.9. Nos relés eletromecânicos somente o módulo de K_0 é ajustado, já os relés numéricos apresentam a possibilidade de ajuste também do ângulo (Maezono, 2006).

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (2.9)$$

De forma didática e apropriada, em (Mascher, 2010) é mostrada também a dedução da formulação do K_0 (apresentada acima de forma simplificada), considerando inclusive a presença de uma resistência de falta.

2.4.2. Erros na Medição de Impedância devido à Mútua de Sequência Zero

A corrente de sequência zero de um circuito de uma LT dupla induz tensão no circuito paralelo, conforme mostra a Figura 2.9 e as equações 2.10 e 2.11 abaixo.

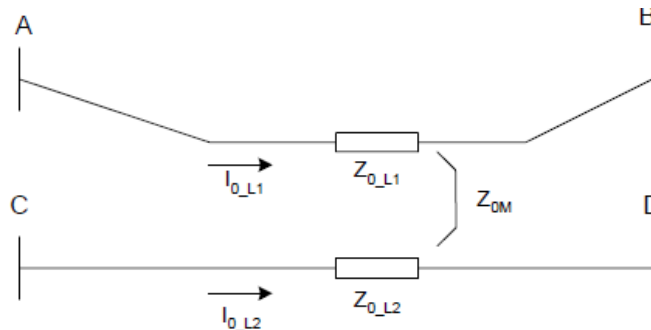


Figura 2.9 - Acoplamento Mútuo de Sequência Zero.
Fonte: Maezono (2006)

$$V_{0_AB} = I_{0_L1} Z_{0_L1} + I_{0_L2} Z_{0M} \quad (2.10)$$

$$V_{0_{CD}} = I_{0_{L2}}Z_{0_{L2}} + I_{0_{L1}}Z_{0M} \quad (2.11)$$

Onde:

$V_{0_{AB}}$ - Tensão de sequência zero entre “A” e “B”;

$V_{0_{CD}}$ - Tensão de sequência zero entre “C” e “D”;

$Z_{0_{L1}}$ - Impedância de sequência zero do circuito L1;

$Z_{0_{L2}}$ - Impedância de sequência zero do circuito L2;

Z_{0M} - Impedância mútua de sequência zero;

$I_{0_{L1}}$ - Corrente de sequência zero do circuito L1;

$I_{0_{L2}}$ - Corrente de sequência zero do circuito L2.

A Figura 2.10, que mostra a ocorrência de uma falta fase-terra sólida na extremidade de uma LT radial, e a Figura 2.11, que apresenta o respectivo diagrama de equivalente de seqüências (positiva, negativa e zero), podem ser utilizadas para verificação da influência do acoplamento mútuo de seqüência zero na medida da impedância realizada pelo relé de distância.

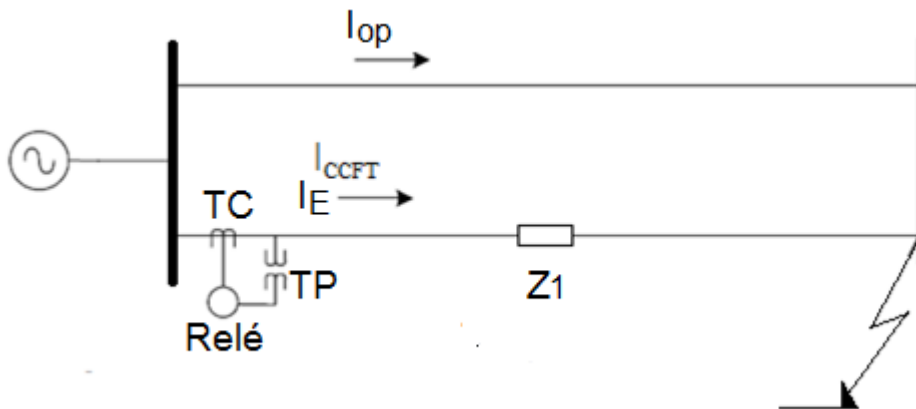


Figura 2.10 - Influência do Acoplamento Mútuo de Sequência Zero.
Fonte: Adaptado de: Maezono (2006)

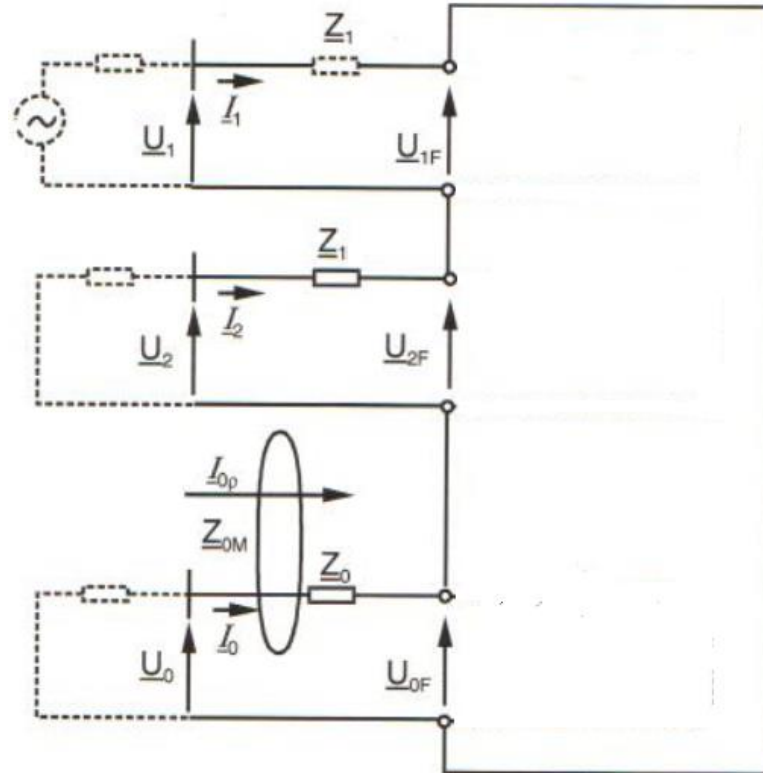


Figura 2.11 - Diagrama de Sequências para uma Falta Monofásica em uma LT Dupla.
 Fonte: Adaptado de: Ziegler (2006)

Onde:

I_{0p} - Corrente de sequência zero passante no circuito paralelo durante a falta;

I_E - Corrente de terra, considerando seu sentido conforme Figura 2.10. $I_E = 3I_0$;

Sabendo que se aplicam nesse cenário as mesmas considerações das equações 2.1, 2.2, 2.3, 2.5 e equacionando a 2.12, pode-se obter a equação 2.13, que apresenta (após um certo trabalho matemático realizado, parecido com o apresentado na equação 2.6) a tensão fase-terra (V_{FASE}) medida pelo relé através do TP durante a falta.

$$U_0 = Z_0 I_0 + Z_{0M} I_{0p} + U_{0F} \tag{2.12}$$

$$V_{FASE} = Z_1 I_{CCFT} + \frac{I_E}{3} (Z_0 - Z_1) + \frac{Z_{0M}}{3} I_{Ep} \tag{2.13}$$

Onde:

I_{Ep} - Corrente de terra do circuito paralelo. $I_{Ep} = 3I_{0p}$;

Como visto na seção anterior, a corrente utilizada nos cálculos (I_{calc}) pela função de distância, considerando o Fator de Compensação de Terra, é dada por:

$$I_{calc} = I_{CCFT} + K_0 I_E \quad (2.14)$$

Portanto, a princípio, a impedância do loop (Z_m), lida pelo relé, é dada por:

$$Z_m = \frac{V_{FASE}}{I_{CCFT} + K_0 I_{TERRA}} = \frac{Z_1 I_{CCFT} + I_E \frac{(Z_0 - Z_1)}{3} + \frac{Z_{0M} I_{Ep}}{3}}{I_{CCFT} + K_0 I_E} \quad (2.15)$$

Como K_0 é dado pela equação 2.9, chega-se:

$$Z_m = Z_1 \left(1 + \frac{\frac{Z_{0M} I_{Ep}}{3Z_1}}{I_{CCFT} + K_0 I_E} \right) \quad (2.16)$$

Ou seja:

$$Z_m = Z_1 + Z_1 \frac{\frac{Z_{0M} I_{Ep}}{3Z_1}}{I_{CCFT} + K_0 I_E} \quad (2.17)$$

Conforme destacado também em (Ziegler, 2006) e (Maezono, 2006), é possível notar que há um erro associado (segunda parcela da equação 2.17), já que a leitura correta da impedância para o ponto de falta seria Z_1 .

Em (Ziegler, 2006) são apresentados dados típicos de uma LT dupla radial de 400kV e calculados os erros de medição dos relés ($Z1$ e $Z2$) dos dois circuitos, conforme indicado na Figura 2.12. É possível notar pelo gráfico da imagem que casos de subalcance ocorrem em ambos os relés, ou seja, o erro é positivo e a impedância lida é maior que a impedância efetiva, que não considera a mútua. Isso ocorre quando as correntes de sequência zero nos dois circuitos têm o mesmo sentido (Maezono, 2006). O maior erro (aproximadamente 35%) é observado quando a falta ocorre na extremidade da LT oposta à fonte de alimentação.

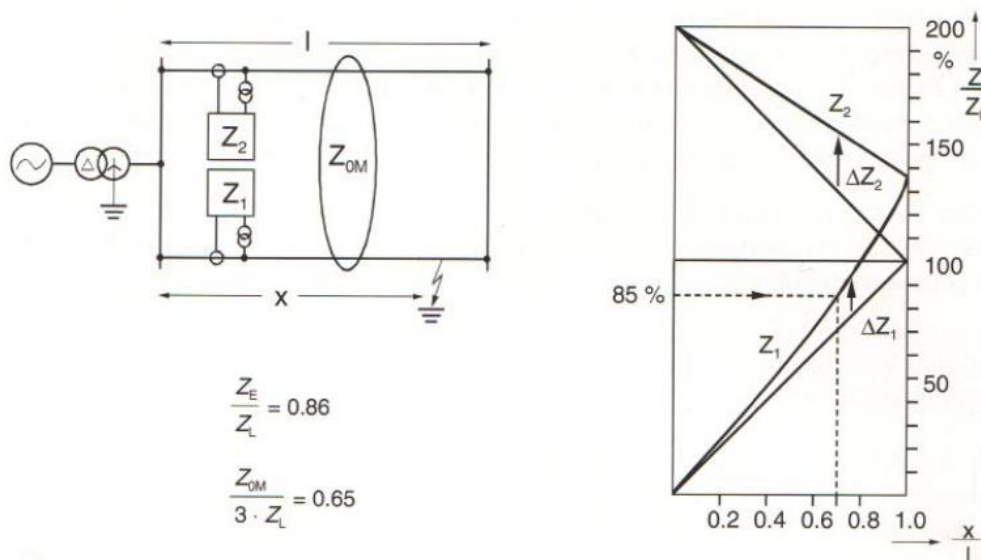


Figura 2.12 - Erros na Medição de Impedância.
 Fonte: Ziegler (2006)

Quando o erro na medição de impedância é negativo se configura um caso de sobrealcance, ou seja, a impedância medida é menor que a impedância efetiva. Isso ocorre quando as correntes de sequência zero nos dois circuitos têm sentidos opostos (Maezono, 2006).

Desta forma, pode-se concluir que a influencia do acoplamento mútuo de sequência zero sobre a medição de impedância do relé depende também da configuração operativa da LT. Em (Ziegler, 2006) são apresentadas diferentes configurações de LTs de circuito duplo que podem ser encontradas em campo, conforme mostra a Figura 2.13, e destacados os possíveis erros de sobrealcance ou subalcance na proteção de distância,

Segundo a referência, para a configuração onde os dois circuitos da LT estão em operação e existe fonte de alimentação em apenas uma extremidade, o erro pode chegar a aproximadamente 35% de Subalcance, considerando o relé e o circuito sob falta indicado na Figura 2.13a. Para a configuração onde um dos circuitos está aberto em uma extremidade e também existe alimentação em apenas uma extremidade, o erro pode chegar a aproximadamente 35% de Sobrealcance, considerando o relé e o circuito sob falta indicado na Figura 2.13b. Para a configuração onde um dos circuitos da LT está aterrado e existe alimentação nas duas extremidades, o erro fica em torno de 19% de Sobrealcance, considerando o relé e o circuito sob falta indicado na Figura 2.13c.

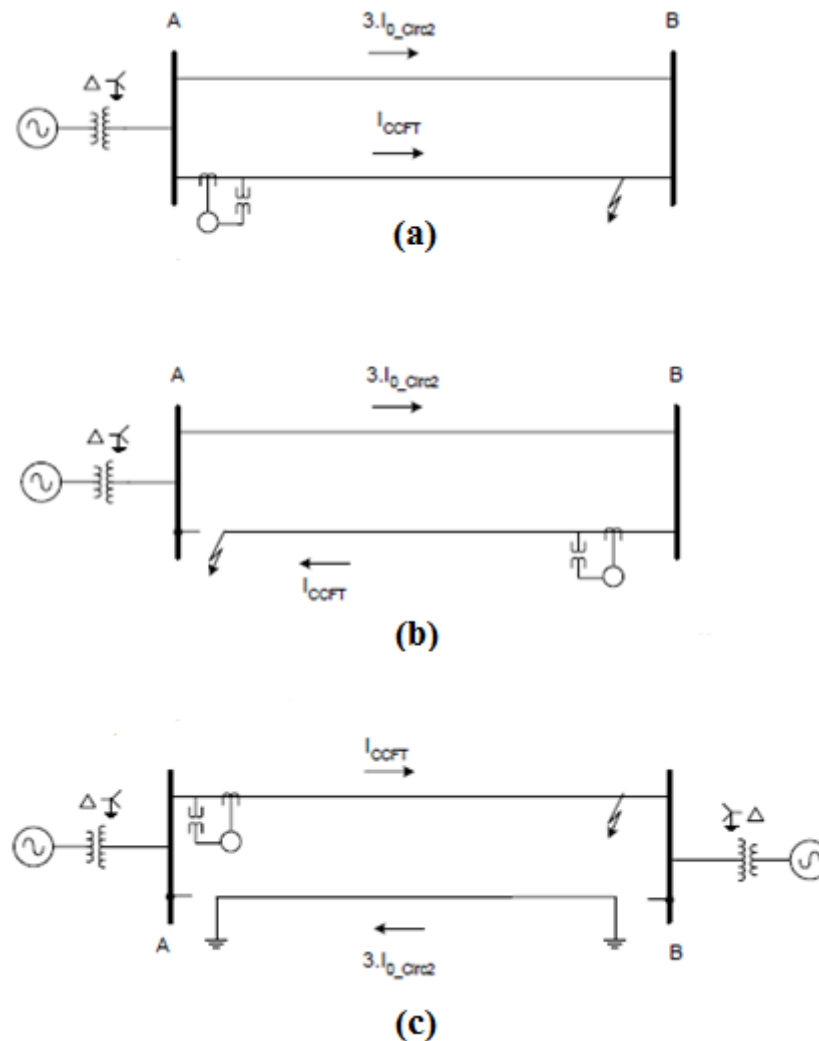


Figura 2.13 - Configurações operacionais de uma LT dupla.
 Fonte: Adaptado de: Maezono (2006)

Ainda segundo (Ziegler, 2006), considerando uma configuração onde os dois circuitos da LT estão em operação e existe fonte de alimentação nas duas extremidades, erros de Sobrealcance de aproximadamente 25% e de Subalcance de aproximadamente 40% podem ser observados dependendo da localidade da falta e da relação entre as correntes de terra das duas extremidades.

2.4.2.1 Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero

Considerando toda essa problemática da influência da mútua de sequência zero sobre a medição utilizada pela função de distância, os relés de proteção geralmente possibilitam o ajuste de um fator chamado de Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero (K_{0M}). Assim, a corrente utilizada nos cálculos pela função de distância, considerando o K_0 e K_{0M} , é dada por:

$$I_{calc} = I_{CCFT} + K_0 I_E + K_{0M} I_{Ep} \quad (2.18)$$

Desta forma, considerando a mesma situação de curto circuito e relé apresentado na Figura 2.10, a impedância do loop (Z_m), lida pelo relé, é dada pela equação 2.19:

$$Z_m = \frac{V_{FASE}}{I_{CCFT} + K_0 I_E + K_{0M} I_{Ep}} \quad (2.19)$$

Sendo V_{FASE} dada pela equação 2.13, chega-se a:

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{Z_1 I_{CCFT} + \frac{I_E}{3} (Z_0 - Z_1) + \frac{Z_{0M}}{3} I_{Ep}}{I_{CCFT} + K_0 I_E + K_{0M} I_{Ep}} = \frac{Z_1 I_{CCFT} + I_E \frac{(Z_0 - Z_1)}{3} + \frac{Z_{0M} I_{Ep}}{3}}{I_{CCFT} + K_0 I_E + K_{0M} I_{Ep}} \\ &= \frac{Z_1 \left(I_{CCFT} + I_E \frac{(Z_0 - Z_1)}{3Z_1} + \frac{Z_{0M} I_{Ep}}{3Z_1} \right)}{I_{CCFT} + K_0 I_E + K_{0M} I_{Ep}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Se K_{0M} é dado pela equação 2.21, então $Z_m = Z_1$, portanto, uma correta medição é realizada pelo relé de proteção. Desta forma, a comparação da impedância medida e a impedância de sequência positiva ajustada no relé se dará de forma adequada pela função de distância.

$$K_{0M} = \frac{Z_{0M}}{3Z_1} \quad (2.21)$$

Observa-se que para a utilização desse recurso, conhecido como Compensação Clássica de linha paralela, é necessário que o relé de um circuito tenha informação sobre a corrente de terra do outro circuito. Em alguns relés numéricos atuais existem entradas analógicas dedicadas para a corrente residual do circuito paralelo.

Os cálculos acima evidenciam que a aplicação do K_{0M} nos relés do circuito sob falta corrigem a medição de impedância, no entanto, o efeito da Compensação sobre as medições dos relés do circuito sem falta é diferente. Ao ser submetido o circuito “1” a uma falta, a sua elevada corrente entra no cálculo da impedância do loop (Z_m) do relé instalado no circuito “2” (e vice-versa), o qual apresentará um erro considerável. Desta forma, enquanto o relé do circuito “1” faz uma correta medição devido à compensação, o relé do circuito “2” apresenta erros de sobrealcance e mede uma impedância muito pequena, o que o leva a considerar a

falta, erroneamente, no próprio circuito. A Figura 2.14 ilustra esse problema para a mesma linha de circuito duplo radial apresentada na Figura 2.12.

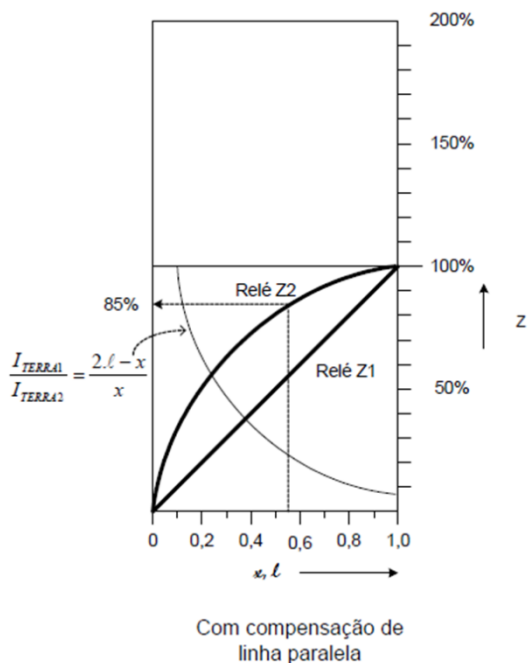


Figura 2.14 - Efeito da Compensação de Mútua.
Fonte: Ziegler (2006)

Observa-se na figura acima que para uma falta, por exemplo, ocorrida em 55% do circuito “1”, enquanto a medida do relé do circuito “1” é correta (devida à compensação), o relé do circuito “2” considera a falta como sendo interna (85%). Além disso, para qualquer falta que ocorra entre 0 e 55% do circuito “1”, o relé do circuito “2” considera, erroneamente, a falta dentro de sua primeira zona de atuação (considerando o ajuste dessa zona 85%). Apenas a partir de certo valor da relação I_{TERRA1}/I_{TERRA2} , o relé do circuito “2” passa a considerar a falta fora da sua primeira zona. O Apêndice A também mostra que a relação I_{TERRA1}/I_{TERRA2} é igual a relação $(2l - x)/x$, onde “l” é o comprimento da LT e “x” é a distância da extremidade até o ponto de falta.

Alguns relés numéricos possuem o recurso para que, de acordo com a relação I_{TERRA1}/I_{TERRA2} ajustada, a compensação seja bloqueada. Portanto, quando a corrente do circuito faltoso exceder à corrente do circuito paralelo em certa proporção, a compensação é bloqueada, evitando os erros mencionados. Esse recurso é conhecido como Balanço de Corrente de Terra e um ajuste típico da relação I_{TERRA1}/I_{TERRA2} é de 1,35, ou seja, o bloqueio da compensação ocorre quando a relação x/l é menor que 85% (Ziegler, 2006).

2.5. Uso do RTDS em Testes de Proteção

Com toda a evolução do SEP, dos sistemas de proteção, supervisão, controle e comunicação, surgiu a necessidade de uma nova geração de dispositivos especializados em testes funcionais dos diferentes componentes do sistema. O Simulador Digital em Tempo Real (RTDS – *Real-Time Digital Simulator*) aparece como uma ferramenta altamente benéfica para testes de sistemas de proteção. Trata-se de um equipamento desenvolvido para estudos em tempo real de fenômenos transitórios eletromagnéticos pertinentes aos sistemas elétricos de potência (Guerrero, 2011).

Além de simulação, é também possível realizar testes de malha fechada com o RTDS (ou HIL – *Hardware-In-The-Loop*), que são uma excelente metodologia para a avaliação de esquemas de proteção (Junior et al., 2018). Assim, se um sistema elétrico é modelado no simulador, o mesmo pode fornecer saídas analógicas e digitais e interagir com dispositivos de proteção e controle reais, fazendo com que os mesmos operem em condições muito próximas às que encontrarão no campo, podendo também enviar comandos ao RTDS e interagir com a própria simulação. Desta forma, avalia-se não apenas a influência do sistema de potência nos IEDs, mas também a influência da resposta dos IEDs no sistema, considerando todo o período de análise (antes, durante e após a perturbação). Assim, os desafios complexos de proteção encontrados no campo podem ser estudados dentro de um laboratório, sob condições controladas (Pillay, 2011).

Pillay (2011) também menciona que seu trabalho faz parte de um esforço contínuo que utiliza ferramentas modernas para entender melhor o desempenho dos relés de proteção reais e destaca a importância da simulação em tempo real para o alcance dos objetivos propostos.

Em (Guerrero, 2011) é apresentada uma introdução sobre o RTDS também utilizado neste trabalho, sendo destacado sua operação, *software*, principais componentes do *hardware* e como esses interagem para o funcionamento do sistema. Também são abordadas duas diferentes tecnologias que podem ser aplicadas para implementação de esquemas de teste de HIL, sendo a primeira a “Convencional”, que utiliza fiação elétrica nas interfaces entre o relé e o RTDS para troca de sinais analógicos e binários, e a segunda a “Moderna”, que permite que sinais (analógicos e binários) sejam digitalizados e trocados entre os equipamentos por meio de pacotes de dados através da rede LAN. Assim como em (Guerrero, 2011), vale lembrar que essas duas tecnologias serão aplicadas nesta dissertação para se comparar Esquemas de Teleproteção com estrutura convencional e com estrutura baseada na IEC 61850-90-1.

2.6. Considerações Finais

Esse Capítulo abordou os aspectos principais da proteção de distância e destacou o motivo pelo qual o uso das Telecomunicações possibilita a melhora do desempenho da proteção de LTs. Nesse contexto foram apresentados os principais Esquemas de Teleproteção comumente utilizados, sendo destacado de forma teórica o funcionamento dos que envolvem troca de informações lógicas entre as extremidades da LT, os quais são foco deste estudo. Apresentou-se a estrutura Convencional e a baseada na IEC 61850-90-1 de tais esquemas. Também, uma abordagem bastante didática foi conduzida com o intuito de apresentar os efeitos que o acomplamento mútuo de sequencia zero pode exercer sobre a proteção de distância, revelando a importância de se verificar a influência também nos Esquemas de Teleproteção. Por fim, foi mencionado o quão benéfico pode ser a utilização de um simulador em tempo real em análises de proteção.

No próximo capítulo será apresentada uma análise prática dos Esquemas de Teleproteção. Resultados de testes utilizando relés reais e um sistema composto de LTs de circuito simples possibilitarão a verificação das vantagens e desvantagens de cada esquema. Também, a implementação das duas estruturas de Teleproteção supracitadas permitirão a verificação dos ganhos trazidos pela norma IEC 61850-90-1.

3. ANÁLISE EM LT DE CIRCUITO SIMPLES

3.1. Sistema de Potência Modelado

A estrutura implementada no laboratório visa à realização de testes em HIL entre o RTDS e os relés de proteção. O sistema de potência utilizado nesta primeira análise foi modelado no RSCAD (*software* de simulação do RTDS) por (Guerrero, 2011) e se trata de um sistema trifásico de 230 kV composto por dois equivalentes de Thevenin e três LTs de circuito simples conectadas em série, conforme Apêndice A. Como ilustrado na Figura 3.1, uma das LTs é considerada como principal (extensão de 120 km), onde a análise da Teleproteção é realizada, e as outras como LTs adjacentes (ambas de 80 km). Sendo a fonte do Terminal “Sf” parametrizada como “forte” e a fonte do Terminal “Rf” parametrizada como “fraca”, o fluxo de potência na LT principal vai do Terminal S para o Terminal R.

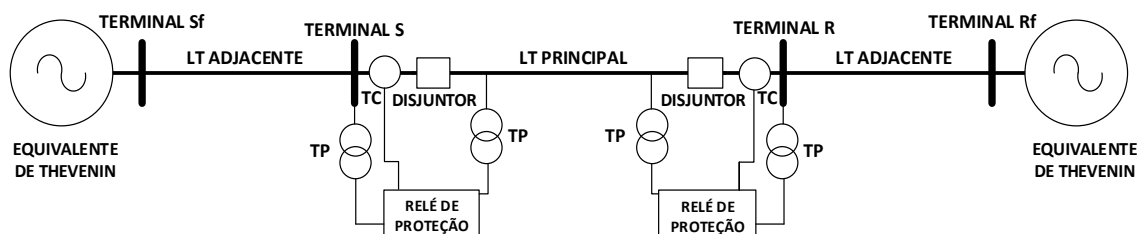


Figura 3.1 - Sistema de Potência Modelado - Análise em LT de Circuito Simples.

As impedâncias de sequência positiva e zero das LTs são apresentadas na Tabela 3.1, as impedâncias de sequência positiva e zero das fontes equivalentes são mostradas na Tabela 3.2 e a condição operativa do sistema pode ser visualizada na Tabela 3.3.

Tabela 3.1 - Impedâncias de Sequência Positiva e Sequência Zero das LTs.

LT	Impedância de Sequência Positiva (Ohm)	Impedância de Sequência Zero (Ohm)
LT Principal	34,04 \angle 80,92°	172,68 \angle 72,50°
LT Adjacente	22,68 \angle 80,92°	115,12 \angle 72,50°

Tabela 3.2 - Impedâncias das Fontes Equivalentes.

Fonte Equivalente	Impedância de Sequência Positiva (Ohm)	Impedância de Sequência Zero (Ohm)
Terminal “Sf”	10,00 \angle 84,80°	5,51 \angle 89,07°
Terminal “Rf”	20,00 \angle 88,76°	9,50 \angle 88,59°

Tabela 3.3 - Condição Operativa das Fontes Equivalentes.

Fonte Equivalente	Tensão [pu]	Potência Ativa [MW]	Potência Reativa [MVar]
Terminal “Sf”	1,043 \angle 20,00°	252,30	17,38
Terminal “Rf”	0,956 \angle -10,00°	-237,80	-5,99

Este capítulo é considerado uma continuação de (Guerrero, 2011), pois, seguindo uma das sugestões de trabalho fornecidas, realiza uma análise comparativa da aplicação de cinco esquemas de Teleproteção no sistema e também apresenta os ganhos em se utilizar uma estrutura baseada na IEC 61850-90-1 em comparação à estrutura convencional.

3.2. Circuitos de Controle Modelados

Os circuitos de controle, também modelados no RTDS, possibilitam a execução de algumas funcionalidades importantes, tais como:

- Abertura e fechamento dos disjuntos do sistema;
- Seleção das características da falta (tipo, localização, duração, resistência de falta);
- TCs e TPs ideais;
- Interfaces de envio de sinais analógicos (tensão e corrente) do RTDS para os relés de proteção reais;
- Dois tipos de interfaces para os esquemas de Teleproteção, possibilitando a comunicação entre os dispositivos (relés de proteção e RTDS) através da estrutura convencional e da baseada na IEC 61850-90-1;
- Dois Sistemas de Teleproteção (Convencional e baseado na IEC 61850-90-1).

Assim como o sistema de potência, tais circuitos também são modelados no módulo *Draft* do RSCAD e são controlados através de uma tela de supervisão criada no módulo *Runtime* (também do RSCAD), conforme mostra a Figura 3.2. Ressalta-se que os Sistemas de Teleproteção implementados são descritos na próxima seção e demais detalhes da modelagem podem ser encontrados na referência supracitada.

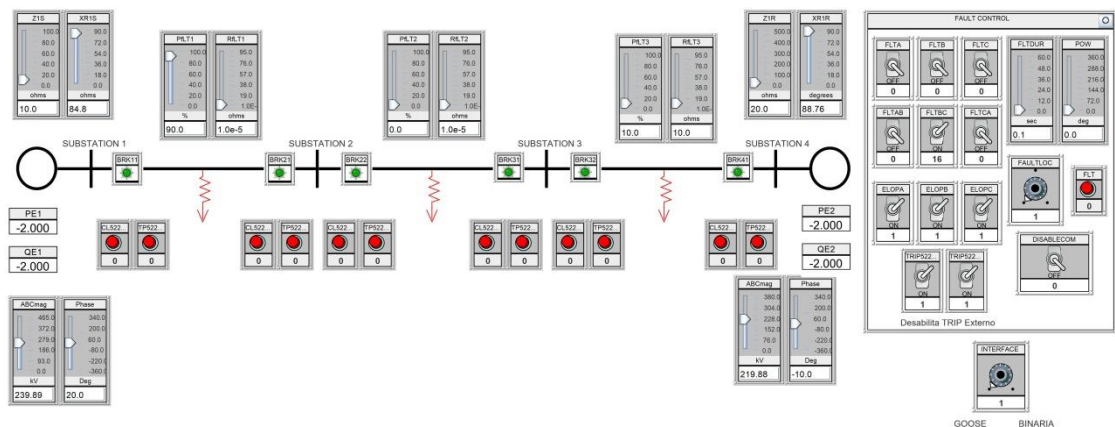


Figura 3.2 - Tela de Supervisão no RTDS – Análise em LT de Circuito Simples.

3.2.1. Sistemas de Teleproteção Modelados

Com base na Estrutura Geral dos Esquemas de Teleproteção apresentada no Capítulo 2, o RTDS foi utilizado também para modelar o Sistema de Teleproteção. Este modelo baseia-

se na simulação do tempo de operação da Teleproteção (T_A), ou seja, o tempo decorrido entre as interfaces (a) da Figura 2.1, conforme já mencionado.

Seguindo os requisitos de tempo recomendados pelo CIGRE 2000, pode-se observar na Figura 3.3 que é adotado um valor máximo de T_A (24 ms) na implementação dos esquemas de Teleproteção baseados na estrutura convencional, considerando os seguintes tempos:

- Atraso de tempo da binária de entrada do equipamento de Teleproteção no terminal Transmissor (2 ms);
- Atraso de tempo da binária de saída do equipamento de Teleproteção no terminal Receptor (4 ms);
- Tempo ajustado no Equipamento Teleproteção no terminal Transmissor para compensação do *debounce* do contato de saída do relé (3 ms);
- Tempo de propagação do canal de Telecomunicação (9 ms);
- Tempo gasto pelo sinal nas interfaces entre o equipamento de Teleproteção e o Sistema de Telecomunicação (6 ms).

Para os testes baseados na estrutura convencional, as interfaces entre os relés de proteção e o equipamento de Teleproteção modelado no RTDS, indicadas na Figura 3.5, são implementadas com fiação convencional, conectando os contatos secos e entradas optoisoladas de ambos os dispositivos para troca de sinais digitais associados aos esquemas de Teleproteção. Vale mencionar que as entradas e saídas binárias do RTDS apresentam uma latência da ordem dos micro-segundos na operação, por isso a necessidade de se modelar os atrasos de tempos das binárias de entrada e saída dos equipamentos de Teleproteção com tempos típicos de dispositivos de proteção.

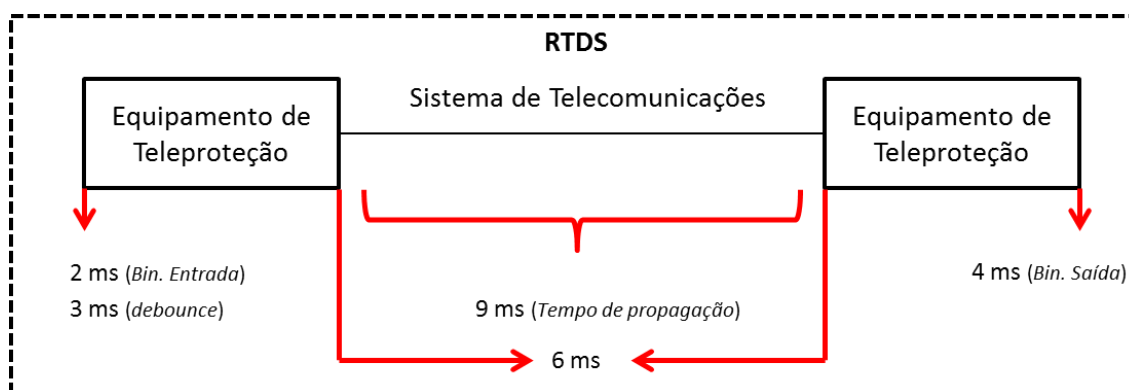


Figura 3.3 - Sistema de Teleproteção modelado no RTDS - Estrutura Convencional

Nos testes dos Esquemas de Teleproteção baseados na IEC 61850-90-1 foi aplicado o segundo mecanismo de comunicação trazido pela norma (*gateway*), descrito no Capítulo 2. Portanto, as interfaces entre os relés de proteção e o equipamento de Teleproteção (modelado no RTDS) são implementadas através de mensagens GOOSE para a troca de sinais digitais associados aos esquemas. Isso permite que atrasos de entrada/saída e *debounce* nos equipamentos de Teleproteção sejam substituídos pelos atrasos de codificação e decodificação das respectivas mensagens GOOSE, conforme mostra a Figura 3.4. Para esse modelo, o tempo de propagação do canal é mantido (9 ms), seguindo os requisitos de tempo recomendados pelo CIGRE (2000). Vale mencionar que o tempo total gasto na decodificação e codificação de uma mensagem GOOSE no RTDS apresenta um valor típico de 3ms (Guerrero, 2011), desta maneira não houve a necessidade de se modelar os atrasos associados à decodificação da mensagem na entrada do equipamento de Teleproteção transmissor e à codificação da mensagem na saída do equipamento de Teleproteção receptor.

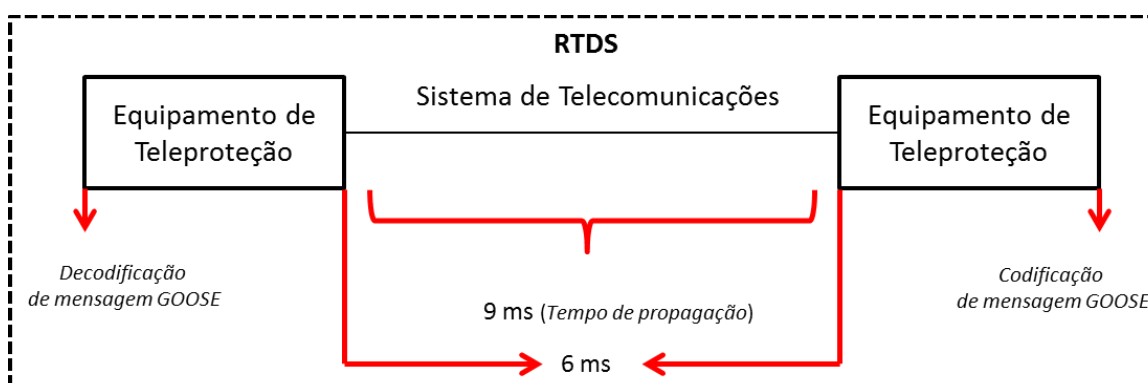


Figura 3.4 - Sistema de Teleproteção Modelado - Estrutura baseada na IEC 61850-90-1

Levando em consideração cada um dos Esquemas de Teleproteção avaliados, o Apêndice B apresenta de forma mais detalhada os circuitos de controle associados à modelagem apresentada acima, destacando a possibilidade de estabelecimento de condições operativas diferentes no canal de comunicação. A Figura 3.5 apresenta a estrutura completa implementada em laboratório, ilustrando os equipamentos e componentes utilizados para a execução dos testes em HIL.

Conforme mostrado abaixo, a placa GTFPI do RTDS, que está associada aos terminais do painel frontal do simulador, é responsável pela interface de compartilhamento de sinais binários com o relé de proteção da maneira convencional. Já a placa de comunicação GTNET do RTDS permite o estabelecimento de comunicação ponto a ponto com dispositivos externos ligados na rede LAN utilizando protocolos abertos de comunicação, como por exemplo,

DNP3, Modbus e protocolos da IEC 61850 (GOOSE, *Sampled Values*). Semelhante aos fabricantes de relés, o RTDS também fornece uma ferramenta de configuração relacionada à IEC 61850, o *SCD-Editor*, permitindo a parametrização de mensagens GOOSE que são assinadas e publicadas.

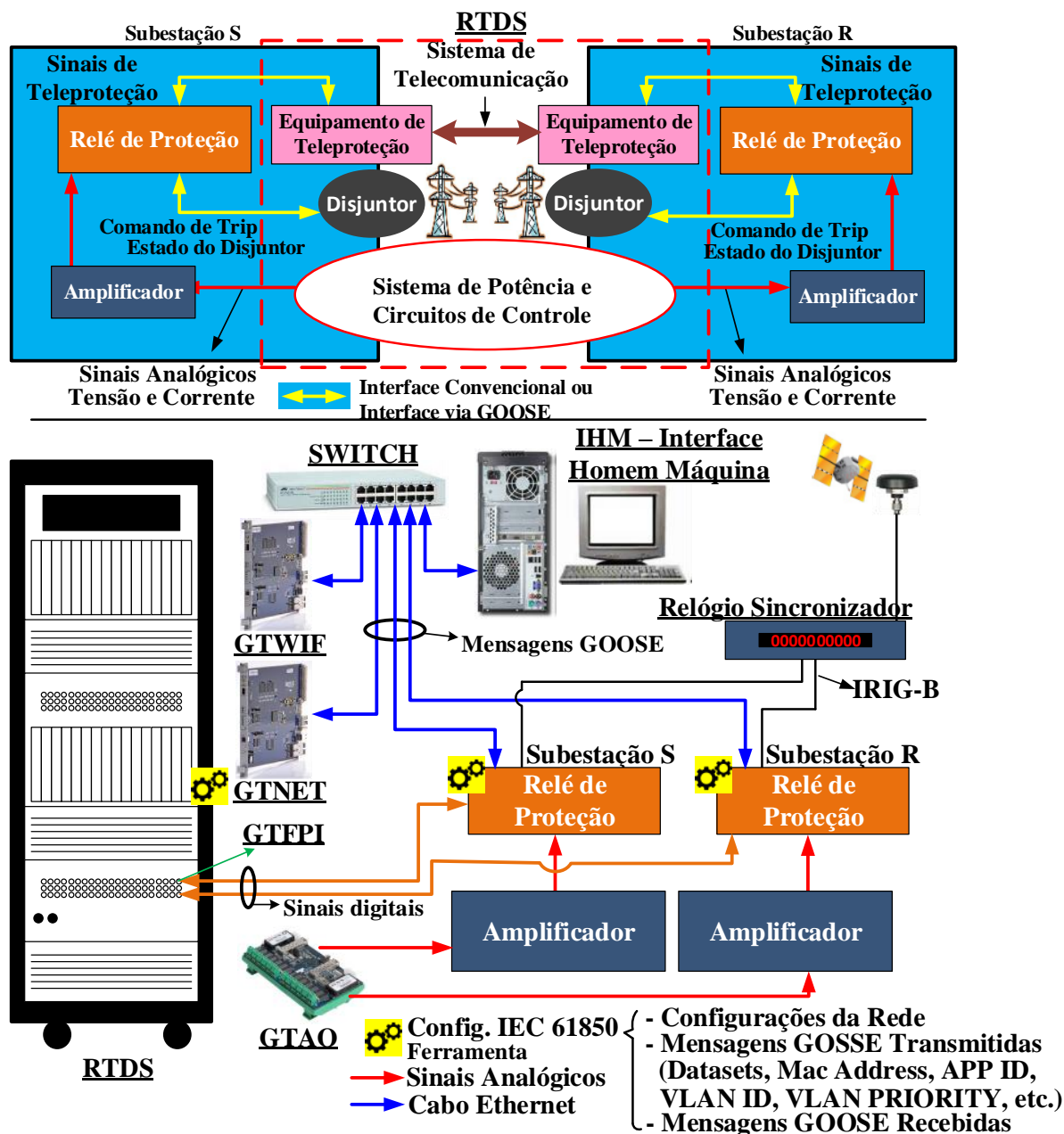


Figura 3.5 - HIL implementado - Análise em LT de Circuito Simples.

A placa GTAQ é responsável conversão D/A (digital-analógica) e permite que os sinais de tensão e corrente simulados dentro do RTDS cheguem aos relés de proteção. Na prática, sinais de tensão de baixa amplitude (entre -10 V e +10 V) saem da placa GTAQ e são

direcionados a um Amplificador, o qual efetua a conversão (no caso dos canais de corrente) e eleva os sinais para valores típicos de secundários de TCs e TPs reais.

A Figura 3.5 também ilustra a placa GTWIF do RTDS, responsável pela interface de comunicação entre o RTDS e o computador de IHM (interface homem-máquina), e o dispositivo utilizado para sincronizar os relés de proteção com a referência de tempo do sistema GPS (*Global Positioning System*). O formato de sincronização IRIG-B demodulado com exatidão de tempo de ± 100 ns (média) foi escolhido dentre os formatos disponíveis neste dispositivo e realizadas ligações através de cabos coaxiais.

3.3. Funções de Proteção

Os relés de proteção, classificados como IEDs, são os dispositivos que concentram as lógicas dos Esquemas de Teleproteção. Nas análises deste capítulo, relés de proteção de dois diferentes fabricantes, chamados aqui de M1 e M2, são utilizados.

Para atendimento das funcionalidades básicas dos Esquemas de Teleproteção e garantia de uma proteção *stand-alone* de *backup* tanto para a LT principal como para as LTs adjacentes, três tipos de funções de proteção são configuradas nos relés das duas extremidades da LT principal: proteção de distância, proteção de sobrecorrente não direcional e sobrecorrente direcional, ambas de fase e de neutro.

As funções de distância com característica MHO foram utilizadas para detecção de faltas fase-fase e as funções com característica quadrilateral para detecção de faltas a terra. Tanto para a proteção de fase como para a proteção de neutro, três zonas de proteção foram ajustadas. A primeira, com atuação instantânea e com sentido direto, alcança 80% da LT principal, a segunda, com temporização ajustada (20 ciclos ou 0,333 s) e sentido direto (ou para frente), alcança 120% da LT principal e a terceira, com temporização ajustada e sentido reverso, com alcance de 120% da LT adjacente.

Dois elementos de sobrecorrente direcionais (sentido direto, ou pra frente) de fase foram utilizados na proteção *stand-alone*, um instantâneo e outro temporizado. O ajuste do *pick-up* do elemento instantâneo foi definido em função do curto-circuito trifásico máximo para falta externa (definido um valor maior, considerando um fator de segurança). Já para o ajuste de partida ou *pick-up* do elemento temporizado foi considerado um valor entre o máximo carregamento da LT e o curto-bifásico mínimo no fim da LT adjacente à frente.

Quatro elementos de sobrecorrente de terra foram também configurados, um direcional instantâneo com sentido direto, um direcional temporizado com sentido direto, um

direcional instantâneo com sentido reverso (*pick-up* utilizado apenas nos Esquemas de Teleproteção) e um não direcional instantâneo (*pick-up* utilizado apenas nos Esquemas de Teleproteção). O ajuste do direcional instantâneo com sentido direto foi definido em função do curto-circuito monofásico máximo para falta externa (definido um valor maior, considerando um fator de segurança). Já para o ajuste de partida ou *pick-up* do elemento direcional temporizado foi considerado um valor entre o máximo desbalanço da LT e o curto monofásico mínimo no fim da LT adjacente. O ajuste do elemento não direcional foi definido para se obter um alcance maior do que a segunda zona da função 21N, sendo este mesmo ajuste aplicado ao elemento reverso.

Mais detalhes dos critérios adotados e parametrizações das funções de proteção (que não afetam o entendimento das análises posteriores) podem ser encontrados em (Guerrero, 2011). A Tabela 3.4 mostra o padrão de nomenclatura utilizado na apresentação dos resultados, indicando também quais elementos são utilizados nos Esquemas de Teleproteção (baseando-se nos modelos de relés dos fabricantes testados) e quais foram configurados para compor a proteção *stand-alone*, ou seja, que podem gerar sinais de *Trip* para os disjuntores da LT Principal.

Em relação às configurações dos Esquemas de Teleproteção, um parâmetro importante que deve ser destacado é o tempo de coordenação do DCB, o qual interfere no tempo de atuação do esquema. Para os testes com a estrutura convencional, este parâmetro foi definido em 0,033 s (2 ciclos), considerando a soma dos seguintes tempos:

- Tempo de operação da Teleproteção T_A (24 ms);
- Atraso de tempo da binária de entrada (2 ms) do relé do terminal receptor;
- Atraso de tempo da binária de saída (4 ms) do relé do terminal transmissor;
- Compensação de *debounce* na entrada do relé do terminal receptor (3 ms).

Para os testes com a estrutura baseada na IEC 61850-90-1, este parâmetro foi definido em 0,021 s, considerando a soma dos seguintes tempos:

- Tempo de operação da Teleproteção T_A (18 ms: soma incluindo o tempo gasto pelo sinal nas interfaces entre o equipamento de Teleproteção e o Sistema de Telecomunicação – 6 ms, o tempo de propagação do canal de Telecomunicação – 9 ms – e o tempo de codificação e decodificação de mensagens GOOSE dos equipamentos de Teleproteção – aproximadamente 3 ms);

- Tempo para codificação e decodificação de mensagens GOOSE no relé do terminal transmissor e receptor (aproximadamente 3 ms), respectivamente.

Conforme já mencionado no Capítulo 2, no esquema DCB, quando há a ativação dos elementos de sobrealcance, aguarda-se esse tempo antes da emissão do sinal de *Trip* ao disjuntor local. Caso nesse período aconteça o recebimento do sinal de bloqueio vindo da outra extremidade da LT, entende-se que a falta é externa e o sinal de *Trip* não é emitido. Demais informações relacionadas aos ajustes dos esquemas de Teleproteção são mencionadas durante a apresentação dos resultados.

Tabela 3.4 - Funções de Proteção utilizadas - Análise em LT de Circuito Simples.

Descrição da Função de Proteção	Nomenclatura Adotada	Esquemas de Teleproteção que utilizam o <i>Pick-up</i> da Função	<i>Trip</i> utilizado para Proteção <i>Stand-alone</i>
Proteção de Distância de Fase – Zona 1	21F (Zona 1)	DUTT, PUTT,	SIM
Proteção de Distância de Fase – Zona 2 (temporizado)	21F (Zona 2)	PUTT, POTT, DCB, DCUB	SIM
Proteção de Distância de Fase – Zona 3 (temporizado)	21F (Zona 3)	POTT, DCB, DCUB	NÃO
Proteção de Distância de Neutro – Zona 1	21N (Zona 1)	DUTT, PUTT,	SIM
Proteção de Distância de Neutro – Zona 2 (temporizado)	21N (Zona 2)	PUTT, POTT, DCB, DCUB	SIM
Proteção de Distância de Neutro – Zona 3 (temporizado)	21N (Zona 3)	POTT, DCB, DCUB	NÃO
Proteção Direcional de Sobrecorrente de Fase Instantâneo (sentido direto)	67FI	-	SIM
Proteção Direcional de Sobrecorrente de Fase Temporizado (sentido direto)	67FT	-	SIM
Proteção Direcional de Sobrecorrente de Terra Instantâneo (sentido direto)	67NI	POTT, DCB, DCUB	SIM
Proteção Direcional de Sobrecorrente de Terra Temporizado (sentido direto)	67NT	-	SIM
Proteção Direcional de Sobrecorrente de Terra Instantâneo (sentido reverso)	67NIrev	POTT, DCB, DCUB	NÃO
Proteção de Sobrecorrente de Terra Instantâneo	50NI	DCB	NÃO

3.4. Resultados dos Testes baseados na Estrutura Convencional

Para melhor entendimento dos resultados e análises das próximas seções deste capítulo, algumas informações são importantes:

- Os condutores de fase das LTs são nomeados como “A”, “B” e “C” e o condutor de terra como “G”;

- O tempo decorrido entre a ocorrência da falta e a emissão do comando de *Trip* pelo relé é representado por “ Δt ”. Para obtenção desses tempos e outros que serão mencionados foram utilizadas oscilografias e listas de eventos geradas pelos relés de proteção;
- Como mostrado na Figura 3.1, os relés de proteção estão localizados nos terminais S e R da LT Principal. A porcentagem relacionada à localização da falta tem como referência o disjuntor do terminal S;
- Os curtos-circuitos simulados entre fases são sólidos, ou seja, sem resistência de falta, e as faltas a terra apresentam uma resistência de 10 ohm;
- Os relés do fabricante M2 não possuem as lógicas dos esquemas DUTT e PUTT disponíveis;
- O Tempo de Transferência (terminologia utilizada nas análises posteriores), detalhado em (IEC, 2010), diz respeito ao tempo gasto a partir do momento em que o IED transmissor disponibiliza a informação (a ser transmitida) para ser codificada (no caso de comunicação via mensagens GOOSE) ou ser utilizada pela binária de saída (no caso da utilização da interface convencional) até o instante em que o IED receptor identifica o dado transmitido, ou seja, instante imediatamente após a decodificação da mensagem (no caso de comunicação via mensagens GOOSE) ou imediatamente após o tempo de atraso da binária de entrada ter se cumprido (no caso da utilização da interface convencional).

3.4.1. Cenário 1 - Faltas na Zona de Superposição

No Cenário 1 são aplicadas faltas a 50% da LT principal e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação está em condições normais de operação. Desta maneira, as faltas ocorrem na zona de subalcance de ambos os relés das extremidades da LT, ou seja, na zona de sobreposição destacada na Figura 2.1.

Neste caso em particular, foi observado nos testes que as proteções *stand-alone* foram as responsáveis pelas atuações dos dispositivos de proteção, ou seja, os Esquemas de Teleproteção não influenciaram as respostas dos relés. A Tabela 3.5 mostra o tempo de operação (Δt) das funções de proteção.

Tabela 3.5 - Faltas Internas (50%).

Falta interna AG (50%)								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
#	21N (Zona 1)	20	21N (Zona 1)	20	67NI	14	67NI	14
Falta interna AB (50%)								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
#	21F (Zona 1), 67FI	20	21F (Zona 1)	20	21F (Zona 1)	9	21F (Zona 1)	9

Com relação aos relés M1, as funções 21N e 21F foram as responsáveis pela emissão do comando de *Trip* em 20ms após a ocorrência da falta, tanto para os cenários de falta AG quanto para falta AB. Vale ressaltar que somente para o cenário de falta AB a função 67FI do terminal S atuou ao mesmo tempo que a função 21F. Já em relação aos relés M2, foi possível notar que a função 67NI mostrou-se mais rápida que a função 21N para o cenário de falta AG e emitiu o comando de *Trip* em 14ms. No entanto, para o cenário de falta AB, a função 21F mostrou-se mais rápida que a função 67FI e emitiu o comando de *Trip* em 9 ms.

Ao comparar o desempenho de ambos os fabricantes, os relés M2 mostraram um tempo operacional notavelmente mais curto, principalmente para faltas fase-fase. Diante disso, pode-se concluir que tal fabricante apresentou um tempo menor de processamento de identificação das faltas.

3.4.2. Cenário 2 - Faltas Internas próximas ao Terminal S

No Cenário 2 são aplicadas faltas próximas ao disjuntor do Terminal S e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação está em condições normais de operação. Nesse cenário, as faltas acontecem dentro da zona de subalcance apenas do relé de proteção do Terminal S, portanto, as funções de proteção *stand-alone* foram responsáveis por emitir o comando de *Trip* nesse terminal, conforme mostra a Tabela 3.6.

Ao analisar o desempenho do relé do Terminal R, é possível observar os benefícios dos Esquemas de Teleproteção na melhora do desempenho da proteção. Nesse caso, comandos de *Trip* da ordem de 204 a 353 ms emitidos por funções *stand-alone* (nos casos em que os esquemas não foram empregados) foram substituídos por comandos de alta velocidade de até 37ms após a falta.

Durante os testes foi observada, através da utilização de oscilografias e listas de eventos, certa aleatoriedade (desvios pequenos) relacionada ao tempo de atuação das funções

de proteção mesmo sob condições controladas de laboratório. Um exemplo disso pode ser observado olhando para os tempos de atuação dos esquemas POTT e DCUB. Estando o canal de comunicação em condições normais de operação, esses dois esquemas, na teoria, deveriam apresentar os mesmos tempos de atuação, no entanto pequenos desvios são observados, principalmente nos testes com faltas ABC, onde a função 21F (Zona 1 e 2) apresentou uma aleatoriedade nos tempos de atuação de um teste para o outro. Apesar disso, resultados importantes podem ser extraídos.

A diferença máxima de tempo de atuação na aplicação dos esquemas com relés M1 foi de 11 ms (56 – 45 ms) para faltas AG e de 10 ms (54 – 44 ms) para faltas ABC. Na aplicação dos esquemas com relés M2, essa diferença foi de 14 ms (60 – 46 ms) para faltas AG e de 5 ms (42 – 37 ms) para faltas ABC. Isso possibilita a visualização de que a escolha do esquema de Teleproteção pode influenciar no tempo de eliminação do defeito em uma LT. Um menor tempo de eliminação pode significar maior capacidade de transferência de potência ativa na LT (capacidade de se trabalhar em condições mais próximas do limite de estabilidade), maior segurança e redução de riscos aos equipamentos de potência. Eastvedt (1976) menciona que, para uma LT em particular, a redução de 1 ciclo nesse tempo aumentou a transferência de energia em 250 MW.

Observa-se na Tabela 3.6 que os esquemas DCUB e POTT tenderam a ser os mais rápidos. Uma razão para isso está no elemento utilizado para acionar a transmissão do sinal permissivo. Conforme já mencionado, os esquemas DCUB e POTT utilizam elementos de sobrealcance para esse acionamento, enquanto os esquemas PUTT e DUTT usam elementos de subalcance. Neste ponto se pode notar um dos benefícios da simulação em tempo real, que possibilita testes em condições muito próximas da realidade. A Figura 3.6, retirada do RTDS, ilustra o deslocamento da impedância capturada por um medidor modelado no Terminal S, onde fica claro que a impedância sai da região de carga, penetra na zona do elemento de sobrealcance (Zona 2 da função 21) e após um curto tempo penetra na zona do elemento de subalcance (Zona 1 da função 21). Esse *delay* é um dos fatores que explica o motivo pelo qual os esquemas DCUB e POTT apresentaram um melhor desempenho em relação à velocidade de operação.

A Tabela 3.7 apresenta a lista de eventos dos relés M1 para os testes com os esquemas POTT e PUTT durante a falta AG, servindo como exemplificação e reforço de alguns pontos já mencionados, além de possibilitar outras observações importantes. Vale ressaltar que, devido à dissertação fazer comparações de desempenho entre dispositivos de fabricantes diferentes, as listas de eventos apresentadas são alteradas em termos de nomenclatura para

que o fabricante não seja exposto. Também é válido mencionar que apenas os eventos que contribuem com as análises posteriores são transcritos.

Tabela 3.6 - Faltas Internas Próximas ao Terminal S

Falta interna AG próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
#	21N (Zona 1)	16	67NT	212	67NI	12	67NT	204
POTT	21N (Zona 1)	16	Esquema	46	67NI	12	Esquema	46
PUTT	21N (Zona 1)	16	Esquema	47	-	-	-	-
DCUB	21N (Zona 1)	16	Esquema	45	67NI	12	Esquema	47
DCB	21N (Zona 1)	16	Esquema	56	67NI	13	Esquema	60
DUTT	21N (Zona 1)	16	Esquema	48	-	-	-	-
Falta interna ABC próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
#	67FI	16	21F (Zona 2)	353	21F (Zona 1)	6	21F (Zona 2)	342
POTT	67FI, 21F (Zona 1)	16	Esquema	44	21F (Zona 1)	8	Esquema	42
PUTT	67FI	16	Esquema	50	-	-	-	-
DCUB	67FI	16	Esquema	48	21F (Zona 1)	3	Esquema	37
DCB	67FI	16	Esquema	54	21F (Zona 1)	6	Esquema	42
DUTT	67FI	16	Esquema	50	-	-	-	-

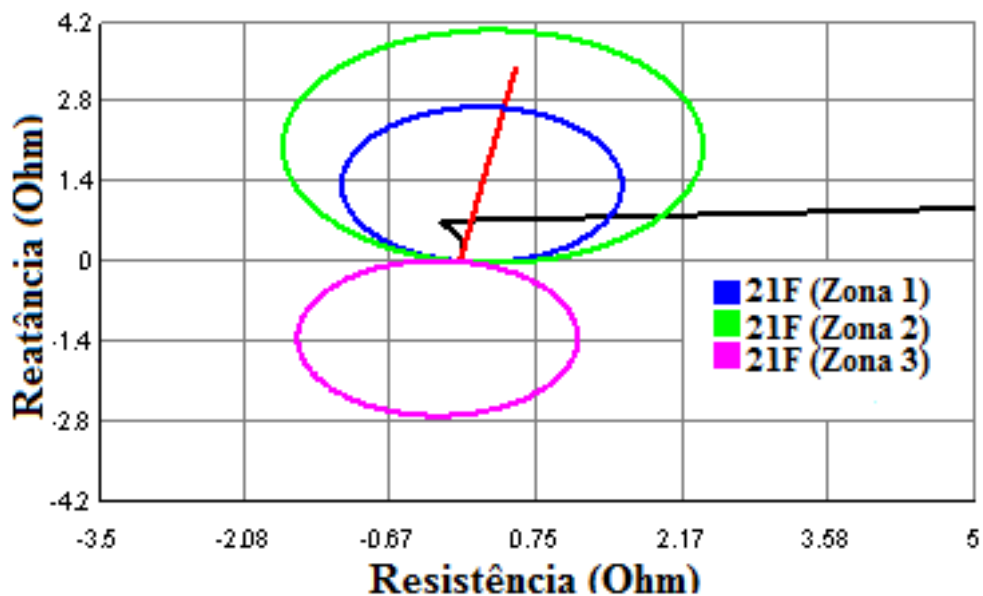


Figura 3.6 - Deslocamento de Impedância (falta fase-fase).

Tabela 3.7 - Lista de Eventos dos Relés M1 durante a Falta AG

Esquema POTT			
Relé M1 – Terminal S		Relé M1 – Terminal R	
Hora	Evento	Hora	Evento
17:35:53.215	APLICAÇÃO DA FALTA	17:35:53.215	APLICAÇÃO DA FALTA
17:35:53.229	21N (Zona 2) PICK-UP A	17:35:53.236	50NI PICK-UP
17:35:53.229	POTT TX	17:35:53.236	67NT PICK-UP
17:35:53.231	21N (Zona 1) PICK-UP A	17:35:53.238	21N (Zona 2) PICK-UP A
17:35:53.231	21N (Zona 1) OPERAÇÃO A	17:35:53.238	POTT TX
17:35:53.231	50NI PICK-UP	17:35:53.257	RX POTT
17:35:53.231	TRIP	17:35:53.261	POTT TRIP A
17:35:53.235	67NI PICK-UP	17:35:53.261	POTT OPERAÇÃO
17:35:53.235	67NI OPERAÇÃO	17:35:53.261	TRIP PICK-UP
17:35:53.235	67NT PICK-UP	17:35:53.261	TRIP
17:35:53.266	RX POTT		
17:35:53.268	POTT TRIP A		
17:35:53.268	POTT OPERAÇÃO		
Esquema PUTT			
Relé M1 – Terminal S		Relé M1 – Terminal R	
Hora	Evento	Hora	Evento
15:13:30.928	APLICAÇÃO DA FALTA	15:13:30.928	APLICAÇÃO DA FALTA
15:13:30.941	21N (Zona 2) PICK-UP A	15:13:30.949	50NI PICK-UP
15:13:30.944	21N (Zona 1) PICK-UP A	15:13:30.949	67NT PICK-UP
15:13:30.944	21N (Zona 1) OPERAÇÃO A	15:13:30.951	21N (Zona 2) PICK-UP A
15:13:30.944	50NI PICK-UP	15:13:30.972	RX PUTT
15:13:30.944	PUTT TX	15:13:30.975	PUTT TRIP A
15:13:30.944	TRIP	15:13:30.975	PUTT OPERAÇÃO
15:13:30.948	67NI PICK-UP	15:13:30.975	TRIP
15:13:30.948	67NI OPERAÇÃO		
15:13:30.948	67NT PICK-UP		

Observando os eventos destacados acima, pode-se mencionar:

- O intervalo de tempo entre a aplicação da falta e a partida do elemento 21N (Zona 2) no relé do terminal S foi de 14 ms no teste com o esquema POTT, e de 13 ms no teste com o esquema PUTT, sendo isso um exemplo da aleatoriedade (pequenos desvios) observada durante os testes;
- No teste com o esquema POTT, o intervalo de tempo entre a aplicação da falta e a partida do elemento 21N (Zona 1) no relé do terminal S foi de 16 ms, enquanto o intervalo entre a aplicação da falta e a partida do elemento 21N (Zona 2) foi de 14 ms, ou seja, uma diferença de 2 ms. No teste com esquema PUTT essa diferença foi de 3 ms, demonstrando também o que foi representado na Figura 3.6;

- O tempo de transferência do sinal permissivo entre os relés foi de 28 ms, tanto no teste com o esquema POTT (RX POTT – POTT TX) quanto no teste com o PUTT (RX PUTT – PUTT TX) (o tempo médio de transferência para ambos os fabricantes são apresentados na seção 3.5);
- Os relés M1 possibilitam a configuração de um tempo de *pick-up* para que após o recebimento do sinal permissivo o esquema aguarde um período antes de emitir o *Trip* (nos esquemas PUTT e POTT). Este ajuste é citado novamente na seção 3.4.8, quando é tratada a questão de sinais espúrios. Apesar de se ter configurado esse temporizador com 0 ms (para evitar influência na comparação de tempo de resposta com os relés M2, que não possuem este ajuste), depois do recebimento do permissivo no teste com o POTT, o sinal de *Trip* foi emitido após 4 ms no Terminal R, enquanto que no teste com o PUTT, o sinal de *Trip* foi emitido após 3 ms. Esse provável tempo de processamento, após recebimento do sinal da Teleproteção observados no relé M1, influencia o tempo de atuação do esquema. Em relação aos relés M2, não foi notado atraso relacionado a esse processamento, ou seja, ao receber o sinal da Teleproteção, a tomada de decisão ocorreu com tempo menor que 1ms nos testes com os esquemas.

O DCB tendeu a ser o esquema com o maior tempo de operação. Como já mencionado, na sua lógica existe um tempo de coordenação que deve ser concluído para que o esquema emita o comando de *Trip* corretamente. Para garantir que um possível sinal de bloqueio vindo da extremidade remota (indicando uma falta externa) seja recebido e não aconteça um disparo indevido, a configuração deste temporizador deve levar em consideração os tempos máximos envolvidos na transmissão do sinal entre as extremidades da LT (como realizado). Por isso esse esquema tende a ser o mais lento. Para os testes com o relé M2, falta ABC e esquema POTT, notou-se que o elemento 21F (Zona 2) partiu com um tempo maior do que no teste com o DCUB em ambas as extremidades (aleatoriedade mencionada), motivo que gerou a igualdade dos tempos de atuação dos esquemas POTT e DCB.

O desempenho de ambos os fabricantes também pode ser comparado observando a Tabela 3.6. Para faltas à terra, percebe-se que os tempos de operação de ambos os fabricantes foram próximos um do outro, pois, apesar do relé M2 do terminal S emitir o sinal de Teleproteção e processar o comando *Trip* mais rápido que o relé M1 (conforme visto na seção anterior, o tempo operacional das funções de proteção do M2 é mais curto), o tempo de transmissão do sinal entre os relés M1 foi menor (esse tempo é destacado na seção 3.5, na

Tabela 3.11). Considerando faltas fase-fase, é possível notar que os relés M2 foram mais rápidos que os relés M1 em todos os casos simulados. Por exemplo, o ganho de 11 ms (48 – 37 ms) dos relés M2 no esquema DCUB ocorreu devido à diferença significativa no tempo de partida da emissão do sinal permissivo no terminal S, causada pela atuação mais rápida do elemento de sobrealcance (na Tabela 3.6, no caso em que nenhum esquema é aplicado, claramente se nota a atuação mais rápida da função 21F-Zona 2 do relé M2) . Da mesma forma, o ganho de 12 ms (54 – 42 ms) no esquema DCB ocorreu devido ao menor tempo de operação do elemento de sobrealcance de fase no Terminal R.

3.4.3. Cenário 3 - Faltas Externas próximas ao Terminal S

No Cenário 3 são aplicadas faltas externas próximas ao disjuntor do Terminal S e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação está em condições normais de operação. Nesse cenário, as faltas acontecem dentro da zona de sobrealcance do relé de proteção do Terminal R.

Não houve emissão de comando de *Trip* nos testes realizados, pois o tempo de falta simulado considerou que a proteção da LT adjacente atua antes da operação das proteções de *backup* da LT principal.

Uma particularidade interessante foi observada no esquema lógico DCB dos relés M2 (que não está presente no esquema lógico DCB dos relés M1). O *pick-up* do elemento de sobrecorrente de neutro instantâneo sem direcionalidade (50NI) inicia a transmissão do sinal de BLOQUEIO para o relé da outra extremidade da LT (Terminal R). Nesse caso, se uma falta à terra na direção da LT protegida for detectada por um elemento de sobrealcance, o relé interrompe imediatamente a transmissão do sinal. No entanto, se a falta realmente for reversa (como é o caso desse cenário) essa lógica permite a transmissão mais rápida do sinal, já que os elementos de sobrecorrente não processam uma decisão direcional e apresentam um tempo de sensibilização menor. Essa característica simples confere maior segurança ao esquema, pois permite que o sinal de BLOQUEIO, que evita disparos indevidos, chegue mais rápido à outra extremidade.

3.4.4. Cenário 4 - Faltas Internas - Disjuntor do Terminal S Aberto

No Cenário 4 são aplicadas faltas internas próximas ao Terminal S e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação está em condições normais de operação, no

entanto o disjuntor do Terminal S encontra-se aberto. Nesse cenário, as faltas acontecem fora da zona de subalcance do relé de proteção do Terminal R.

Nos testes foi observado que as faltas não foram eliminadas em alta velocidade pelos Esquemas de Teleproteção que utilizam elementos de subalcance. Observa-se na Tabela 3.8 que a confiabilidade dos esquemas DUTT e PUTT foi comprometida, ou seja, não emitiram o comando de *Trip* de alta velocidade. Os outros esquemas não foram afetados e operaram corretamente.

Nos relés do Terminal R, o esquema DCB identificou a falta através do elemento de sobrealcance, aguardou o tempo de coordenação e emitiu o comando de *Trip*. Os esquemas POTT e DCUB emitiram o comando *Trip* por meio da lógica *Echo*.

De acordo com o ONS (2016), os esquemas permissivos de sobrealcance devem apresentar a lógica de *Echo* e *Week Infeed* (alimentação fraca). Assim, se o disjuntor local estiver aberto, ou se nenhum elemento reverso for sensibilizado (estando o disjuntor fechado), e houver recepção de um sinal permissivo, outro sinal permissivo (*Echo*) é enviado ao terminal remoto pela lógica de *Echo*. Considerando o caso em que o disjuntor local está fechado, se no momento em que o *Echo* é enviado para o terminal remoto o relé local detecta uma condição de alimentação fraca (através de elementos de subtensão de fase e/ou elementos de sobretensão residual), um comando de *Trip* é emitido para o disjuntor local pela lógica de *Week Infeed*.

Tabela 3.8 - Faltas Internas Próximas ao Terminal S com Disjuntor Aberto

Falta interna AG próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
POTT	#	#	Esquema	85	#	#	Esquema	84
PUTT	#	#	67NT	211	-	-	-	-
DCUB	#	#	Esquema	85	#	#	Esquema	88
DCB	#	#	Esquema	55	#	#	Esquema	52
DUTT	#	#	67NT	212	-	-	-	-

A Tabela 3.9 apresenta a lista de eventos dos relés M2 para o teste com o esquema POTT para efeito de exemplificação da atuação da lógica *Echo*. Observa-se (na tabela) que o elemento de sobrealcance do relé do terminal R, 21N (Zona 2), se sensibilizou e gerou o envio do sinal permissivo para o relé do terminal S. Esse, após receber o sinal (RX POTT), identificar a situação de disjuntor aberto e verificar que nenhum elemento reverso foi

sensibilizado, emitiu o sinal de retorno (ECHO TX) para o relé terminal R, o qual gerou o sinal de *Trip* após o recebimento (RX POTT).

Tabela 3.9 - Lista de Eventos dos Relés M2 – Lógica *Echo*

Esquema POTT			
Relé M2 – Terminal S		Relé M2 – Terminal R	
Hora	Evento	Hora	Evento
19:01:36.108	APLICAÇÃO DA FALTA	19:01:36.108	APLICAÇÃO DA FALTA
19:01:36.158	RX POTT	19:01:36.119	50NI PICK-UP
19:01:36.158	ECHO TX	19:01:36.122	67NT PICK-UP
19:01:36.		19:01:36.126	21N (Zona 2) PICK-UP A
19:01:36.		19:01:36.126	POTT TX
19:01:36.		19:01:36.192	RX POTT
19:01:36.		19:01:36.192	TRIP

3.4.5. Cenário 5 - Faltas Internas - Canal Inoperante

No Cenário 5 foram aplicadas faltas internas próximas ao Terminal S e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação estava inoperante.

Nos testes, os esquemas DUTT, PUTT, POTT e DCUB tiveram sua confiabilidade comprometida, pois o canal de comunicação estava inoperante e o sinal da Teleproteção enviado pelo relé do Terminal S não chegou ao seu destino. Já que a falta ocorreu fora da zona de subalcance, o relé do Terminal R não emitiu um comando de *Trip* de alta velocidade e a falta foi eliminada pelas funções de proteção *stand-alone*. O ONS (2016) enfatiza que os Esquemas de Teleproteção devem ser independentes e redundantes para proteção principal e alternativa, e sempre que possível utilizar meios de transmissão independentes, de modo que a indisponibilidade de um *link* de telecomunicação não comprometa a disponibilidade do outro *link*. O esquema DCB provou ser confiável nesse cenário e emitiu o comando de *Trip* no terminal R após o tempo de coordenação ser cumprido.

3.4.6. Cenário 6 - Faltas Externas - Canal Inoperante

No Cenário 6 foram aplicadas faltas externas atrás do Terminal S e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação estava inoperante.

Nesses testes, a segurança do esquema DCB foi comprometida. Como o canal de comunicação estava inoperante, o sinal de BLOQUEIO enviado pelo relé do Terminal S, que identificou a falta reversa, não chegou ao seu destino. Portanto, o relé do Terminal R emitiu

erroneamente um comando de *Trip* de alta velocidade para uma situação de falta externa. Os outros esquemas provaram ser seguros, pois não causaram a abertura da LT.

3.4.7. Cenário 7 - Falha de Canal durante Faltas Internas e Externas

No Cenário 7 foram aplicadas faltas internas e externas próximas ao Terminal S e o canal de comunicação do Sistema de Telecomunicação foi simulado inoperante durante as faltas.

O esquema DCUB foi testado nesse cenário, pois, como mencionado, apresenta uma lógica para lidar com a perda do sinal de comunicação durante faltas internas. Se a qualquer momento um relé não detectar o sinal de GUARDA (sinal transmitido em condições normais de operação) nem o sinal permissivo proveniente do terminal remoto, a lógica declara a condição de perda de canal (essa condição é declarada se a situação mencionada permanecer por um período definido configurado. Para o teste esse ajuste foi definido como 8ms) e produz um desbloqueio por um período de tempo definido (configurado em 150 ms). Se um elemento de sobrealcance for sensibilizado durante esse período e a condição de perda de canal persistir, o esquema emite o comando *Trip*.

No caso de perda de canal durante uma falta interna à LT fora da zona de subalcance do terminal R, o esquema DCUB provou ser confiável e emitiu um comando de *Trip* de alta velocidade nesse terminal, conforme mostra a Tabela 3.10.

É possível notar que o tempo de operação do esquema DCUB foi menor que o registrado na Tabela 3.6, pois a identificação da perda de canal (devido à falta interna) ocorre mais rápido do que a recepção do sinal permissivo em condições normais de canal.

Tabela 3.10 - Faltas Interna e Externa Próximas ao Terminal S com Perda de Canal.

Falta interna CA próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
DCUB	21F (Zona 1)	17	Esquema	19	21F (Zona 1)	12	Esquema	18
Falta externa CA próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
DCUB	#	#	Esquema	24	#	#	Esquema	15

A Tabela 3.11 apresenta a lista de eventos dos relés M2 perante o caso da falta interna, possibilitando o entendimento dessa lógica específica do DCUB.

Tabela 3.11 - Lista de Eventos dos Relés M2 - DCUB - Falta Interna e Perda de Canal.

Esquema DCUB			
Relé M2 – Terminal S		Relé M2 – Terminal R	
Hora	Evento	Hora	Evento
18:33:03.228	APLICAÇÃO DA FALTA	18:33:03.228	APLICAÇÃO DA FALTA
18:33:03.236	LOG RX	18:33:03.237	LOG RX
18:33:03.238	21F (Zona 2) PICK-UP	18:33:03.242	21F (Zona 2) PICK-UP
18:33:03.238	DCUB TX	18:33:03.242	DCUB TX
18:33:03.240	21F (Zona 1) PICK-UP	18:33:03.246	PERDA DE CANAL
18:33:03.240	TRIP	18:33:03.246	TRIP
18:33:03.247	67FI PICK-UP		

Observa-se que o relé do terminal R identificou ausência de sinal GUARDA (LOG RX) e após 9 ms, sem receber também o sinal permissivo, declarou perda de canal (PERDA DE CANAL). A partir desse momento o período de desbloqueio (ajustado em 150 ms) foi iniciado e a emissão do *Trip* aconteceu, já que o seu elemento de sobrealcance, 21N (Zona 2), já havia sido sensibilizado.

Por outro lado, conforme a Tabela 3.10 também mostrou, para faltas externas, a segurança do DCUB foi comprometida, pois o esquema emitiu erroneamente um comando de *Trip* no Terminal R. Isso aconteceu porque a lógica do DCUB não está preparada para lidar com a perda de canal durante faltas externas dentro da zona de sobrealcance. Por esse motivo, o CIGRÉ (2000) enfatiza que esse esquema é normalmente aplicado com a tecnologia PLC.

3.4.8. Consideração sobre Sinais Espúrios

A recepção de sinais espúrios devido a ruídos nos canais de comunicação pode afetar o funcionamento dos esquemas de Teleproteção. No caso do esquema DUTT, o recebimento de um sinal espúrio pelo relé gera uma abertura incorreta do disjuntor do respectivo terminal. Considerando a recepção de um sinal espúrio durante faltas externas dentro da zona de sobrealcance, os esquemas PUTT, POTT e DCUB têm sua segurança afetada, pois ocorrerá *Trip* indevido, enquanto o DCB não é afetado. No caso do recebimento de um sinal espúrio durante faltas internas dentro da zona de sobrealcance, o esquema DCB pode ter sua confiabilidade comprometida se o sinal permanece por toda a duração da falta (uma ocorrência rara), pois o sinal espúrio bloqueará o comando de *Trip*. Nesse caso, os esquemas PUTT, POTT e DCUB não são afetados.

O ONS (2016) propõe os requisitos técnicos para os canais de comunicação e estabelece que eles sejam dedicados à proteção, ou seja, não compartilhados com outras

aplicações. Isso faz com que a probabilidade de ocorrência de sinais espúrios seja mínima, principalmente com o uso de fibra ótica como meio de transmissão. O CIGRÉ (2000) recomenda o uso de meios de comunicação que não sejam afetados por interferência eletromagnética.

Como já mencionado, os relés M1 apresentam nas lógicas dos esquemas POTT e PUTT temporizadores configuráveis para lidar com sinais espúrios, ou seja, pode-se ajustar um tempo de *pick-up* para que após o recebimento do sinal permissivo o esquema aguarde um período antes de emitir o *Trip*, isso para garantir que não se trata de um ruído. Nota-se que o ajuste deste temporizador influencia no tempo de atuação dos esquemas. Os relés M2 não possuem esse ajuste, cabendo ao projetista criar uma lógica específica, caso seja de interesse.

3.5. Resultados dos Testes Baseados na IEC 61850-90-1

Nesta seção, a estrutura convencional dos Esquemas de Teleproteção foi substituída por uma estrutura baseada na IEC 61850-90-1. Diante disso, destaca-se alguns pontos iniciais:

- A interoperabilidade trazida pela norma foi experimentada. Apesar da identificação de algumas dificuldades (mencionadas no próximo item), foi possível estabelecer a comunicação entre os Equipamentos de Teleproteção modelados no RTDS e os relés de dois fabricantes diferentes, através de mensagens GOOSE.
- Para estabelecimento da comunicação entre os dispositivos de diferentes fabricantes notou-se a necessidade do domínio de conhecimento das distintas ferramentas de configuração do padrão IEC 61850. Observou-se particularidades entre as ferramentas e verificou-se a necessidade de transferência contínua de arquivos de configuração entre os *softwares* para estabelecimento das conexões lógicas dos IEDs. Este fato pode significar uma dificuldade ainda maior considerando a interoperabilidade entre uma quantidade maior de fabricantes diferentes em um sistema de automação;
- Notou-se a substituição de aproximadamente 24 fios de cobre, utilizados nas interfaces convencionais entre os relés e o RTDS, por três únicos cabos de rede utilizados nas interfaces com mensagens GOOSE. Este fato pode significar uma redução de custos com a digitalização dentro dos sistemas de automação das subestações;

- Diferentemente do observado na estrutura convencional, que permitia uma visão mais clara entre as conexões físicas de entrada e saída dos dispositivos, na estrutura baseada na norma as conexões lógicas entre os equipamentos é identificada com maior dificuldade. Neste caso, torna-se necessária a iteração com as ferramentas de configuração das mensagens GOOSE ou através de uma documentação elaborada pelo projetista que registre a origem e destino de cada conexão lógica. Este fato pode significar uma maior dificuldade e esforço na etapa de comissionamento dos sistemas de automação;

A Tabela 3.12 apresenta os resultados obtidos com a nova estrutura implementada, considerando o cenário de teste com faltas próximas ao Terminal S e com o canal de comunicação em condições normais de operação. Pode ser visto que comandos de *Trip* no Terminal R de 204 a 353 ms, emitidos por funções *stand-alone* (nos casos em que os esquemas não foram empregados), foram substituídos por comandos de alta velocidade de até 28ms após a falta.

Uma comparação dos tempos médios de transferência do sinal entre os terminais da LT, considerando as duas estruturas implementadas e os dois fabricantes utilizados, pode ser observada na Tabela 3.13. Tais informações foram obtidas através de listas de eventos extraídas dos relés.

Tabela 3.12 - Resultados com a Estrutura Baseada na IEC61850-90-1

Falta interna AG próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
#	21N (Zona 1)	16	67NT	212	67NI	12	67NT	204
POTT	21N (Zona 1)	16	Esquema	33	67NI	12	Esquema	33
PUTT	21N (Zona 1)	16	Esquema	35	-	-	-	-
DCUB	21N (Zona 1)	16	Esquema	35	67NI	10	Esquema	33
DCB	21N (Zona 1)	20	Esquema	48	67NI	13	Esquema	49
DUTT	21N (Zona 1)	16	Esquema	35	-	-	-	-
Falta interna ABC próxima ao Terminal S								
Esquema	Relés M1				Relés M2			
	Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms	TRIP por	Δt ms
#	67FI	16	21F (Zona 2)	353	21F (Zona 1)	6	21F (Zona 2)	342
POTT	67FI	16	Esquema	35	21F (Zona 1)	8	Esquema	28
PUTT	21F (Zona 1)	14	Esquema	34	-	-	-	-
DCUB	67FI	16	Esquema	37	21F (Zona 1)	8	Esquema	30
DCB	21F (Zona 1), 67FI	16	Esquema	44	21F (Zona 1)	6	Esquema	31
DUTT	67FI	16	Esquema	38	-	-	-	-

Tabela 3.13 - Tempo Médio de Transferência

Estrutura	Relés M1	Relés M2
Convencional	28 ms	34 ms
Baseada na IEC61850-90-1	17 ms	21 ms

Os resultados relatados acima mostram o ganho de velocidade obtido com a substituição das estruturas. Nota-se também que o tempo de transferência do sinal entre os relés M1 é menor em comparação com os relés M2. Essa diferença está relacionada aos atrasos de entrada/saída dos relés (testes com a estrutura convencional) e aos atrasos de tempo de codificação e decodificação de mensagens GOOSE (testes com a estrutura baseada na IEC61850-90-1). Com a substituição da tecnologia de comunicação entre dispositivos, os relés M1 apresentaram um ganho médio de 11ms (28-17ms) no tempo de transferência, enquanto os relés M2 apresentaram um ganho médio de 13ms (34-21ms). Consequentemente, os esquemas de Teleproteção implementados com relés M1 obtiveram um ganho médio de 11ms no tempo de operação, enquanto os esquemas implementados com relés M2 obtiveram um ganho médio de 13ms.

Como já mencionado, o mesmo tempo de propagação do Sistema de Telecomunicação utilizado nos testes baseados na estrutura convencional foi mantido nos testes baseados na IEC 61850. Essa decisão foi baseada nos requisitos apresentados pelo CIGRE (2000), no entanto, deve-se ter em mente que ganhos ainda maiores podem ser observados ao considerar os tempos reais de propagação dos sistemas de telecomunicações e meios de transmissão existentes. Características típicas observadas na prática são apresentadas em (CIGRÉ, 2000) e, com base nessa referência, a Tabela 3.14 apresenta os tempos de propagação de um link de PLC e de uma rede SDH com fibra ótica como meio de transmissão, considerando o comprimento da LT principal (120 km).

Tabela 3.14 - Tempo de Propagação de Sistemas de Telecomunicação

Sistemas de Telecomunicação	Tempo de Propagação
Links PLC	3,4 ms
Redes SDH	0,8 ms

3.6. Considerações Finais

Esse Capítulo apresentou toda a metodologia utilizada nos testes com os esquemas de Proteção aplicados a um sistema composto por LTs de circuito simples. Além das vantagens de se realizar testes em *hardware-in-the-loop* com um simulador em tempo real, foi possível

verificar o comportamento de cada Esquema de Teleproteção diante de condições operativas distintas e analisar aspectos de velocidade de atuação, confiabilidade e segurança. Ao realizar a substituição de uma estrutura convencional por uma baseada em interfaces que utilizam mensagens GOOSE, foi possível verificar a interoperabilidade trazida pela norma IEC 61850 e demais ganhos, principalmente relacionados com a velocidade de transferência do sinal da Teleproteção.

Mediante o conhecimento adquirido com os testes e análises realizadas, no próximo capítulo é implementada a estrutura baseada na IEC 61850-90-1 para verificação do comportamento dos esquemas diante de um sistema composto por LT de circuito duplo. Serão apresentados resultados de testes que revelam o efeito do acoplamento mútuo sobre a função de distância e, conseqüentemente, sobre os esquemas de Teleproteção.

4. ANÁLISE EM LT DE CIRCUITO DUPLO

4.1. Sistema de Potência Modelado

O sistema de potência modelado no RTDS para esta análise se trata de um sistema real de transmissão de 440 kV em circuito duplo, situado na região noroeste do estado de São Paulo: LT Ilha Solteira - Bauru circuito 1 e 2 (C1 e C2). Cada um dos circuitos possui aproximadamente 324 km de extensão e estão dispostos em uma mesma torre de transmissão, conforme mostra a Figura 4.1.

Apesar do foco do estudo estar na proteção dessa LT (chamada também neste capítulo de LT Principal), a Figura 4.2 apresenta toda a região considerada nas simulações para que uma resposta mais abrangente do sistema fosse obtida, sendo destacadas as LTs adjacentes envolvidas e as subestações de fronteira estabelecidas, para as quais foram calculados os equivalentes.



Figura 4.1 - Torre de Transmissão da LT Ilha Solteira - Bauru circuito 1 e 2.

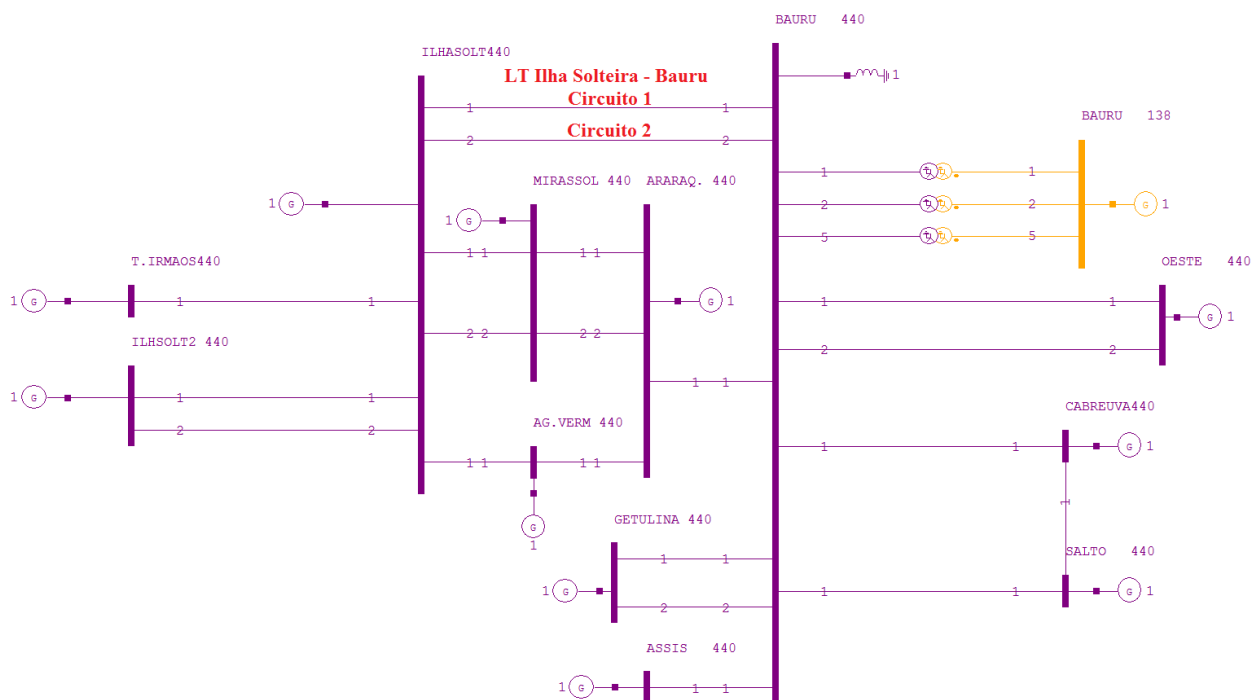


Figura 4.2 - Sistema de Potência - Análise em LT de Circuito Duplo.

4.1.1. Equivalentes do Sistema

O *software* ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas – foi utilizado para o cálculo dos equivalentes do SIN nas subestações adotadas como fronteiras. Considerando o banco de

dados do ONS, horizonte 2018 (caso BR1812PB), os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Equivalentes das Barras de Fronteira.

Nome da barra	Impedância de Sequência Positiva (Ohm)	Impedância de Sequência Zero (Ohm)
ILHA SOLTEIRA 2 (440 kV)	224,7604 \angle 83,0615°	86,5007 \angle 84,3755°
GETULINA (440 kV)	91,7936 \angle 87,6103 °	134,3094 \angle 83,3333°
MIRASSOL (440 kV)	199,3011 \angle 82,1172°	125,4670 \angle 86,9293°
OESTE (440 kV)	47,3068 \angle 86,7615°	19,0274 \angle 81,5228°
CABREUVA (440 kV)	21,3396 \angle 86,0484°	23,3000 \angle 75,9876°
TRÊS IRMAOS (440 kV)	25,6215 \angle 88,2285°	14,9744 \angle 86,6636°
ILHA SOLTEIRA (440 kV)	20,0695 \angle -90,0000°	4,5328 \angle 89,8734°
ASSIS (440 kV)	19,4766 \angle 87,1959°	23,7551 \angle 81,7238°
ÁGUA VERMELHA (440 kV)	21,4200 \angle 87,9245°	19,7818 \angle 86,4238°
BAURU 138 (138 kV)	24,9529 \angle 75,1049°	71,7992 \angle 77,3516°
SALTO (440 kV)	5109,9445 \angle 89,4911°	37,8570 \angle 88,1627°
ARARAQUARA (440 kV)	17,5217 \angle 86,2446°	15,8521 \angle 83,5758°

4.1.2. Fluxo de Potência Real e Tensões Internas das Fontes Equivalentes

O software ANAREDE – Análise de Redes – foi utilizado para se obter, mediante um banco de dados real do ONS (ONS - 2Q2018 - Maio Carga Pesada), um fluxo de potência real para o sistema analisado. A Tabela 4.2 mostra as tensões obtidas em cada uma das barras, a Figura 4.3 apresenta o fluxo (MW e MVar) nos circuitos do sistema e a Tabela 4.3 fornece o resultado das potências gerada (ou consumida, sinal negativo) em cada uma das barras de fronteiras.

Tabela 4.2 - Tensões obtidas nas Barras.

Barra	Tensão (pu)
TRÊS IRMÃOS	1,035 \angle -3,0°
ILHA SOLTEIRA 2	1,039 \angle -3,2°
ILHA SOLTEIRA	1,039 \angle -3,3°
MIRASSOL	1,033 \angle -9,0°
ÁGUA VERMELHA	1,027 \angle 1,1°
ARARAQUARA	1,017 \angle -12,1°
GETULINA	1,039 \angle -14,4°
ASSIS	1,042 \angle -13,1°
BAURU	1,038 \angle -18,2°
BAURU 138	1,033 \angle -19,6°
OESTE	1,022 \angle -32,3°
CABREUVA	1,025 \angle -32,3°
SALTO	1,027 \angle -31,6°

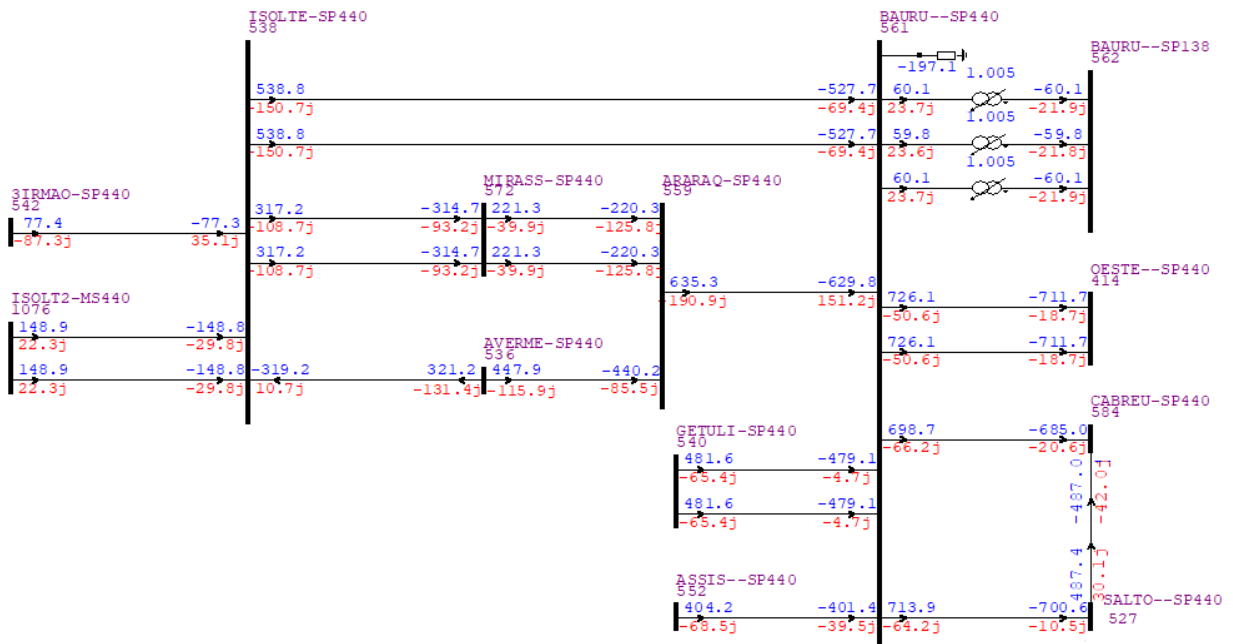


Figura 4.3 - Fluxo de Potência do Sistema – Caso Real do ONS.

Tabela 4.3 - Balanço de Potências nas Barras de Fronteiras.

Barra	MW	MVARr
TRÊS IRMÃOS	77,2	-87,4
ILHA SOLTEIRA 2	297,8	44,6
ILHA SOLTEIRA	1018,6	-532,9
MIRASSOL	-187	-266,6
ÁGUA VERMELHA	768,9	-247,4
ARARAQUARA	-245,6	-527,6
GETULINA	963,4	-131,2
ASSIS	404,2	-68,7
BAURU 138	-180	-65,3
OESTE	-1423,4	-37,4
CABREUVA	-1172,2	-62,1
SALTO	-213,2	19,6

Desta forma, tendo-se os valores de tensão e o balanço de potências em cada uma das barras adotadas como fronteiras, bem como as impedâncias de sequência positiva das fontes equivalentes, é possível calcular os valores internos da fonte. Para isso, calculam-se as correntes injetadas nas barras de fronteira utilizando a equação 4.1 e utiliza-se a equação 4.2 para se obter as tensões desejadas.

$$I = \frac{(P + jQ)^*}{V_{barra}\sqrt{3}} \tag{4.1}$$

$$V_{interna} = V_{barra} + Z_{1_{fonte}}I \tag{4.2}$$

Onde:

I- Correntes injetadas nas barras de fronteira;

P- Potência ativa injetada na barra de fronteira;

Q- Potência reativa injetada na barra de fronteira;

V_{barra} - Tensão na barra de fronteira;

$V_{interna}$ - Tensão interna da fonte equivalente;

$Z_{1_{fonte}}$ - impedância de sequência positiva da fonte equivalente;

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Tensões Internas das Fontes Equivalentes.

Fonte Equivalente	Tensão Interna (pu)
TRÊS IRMÃOS	1,0282 \angle -2,7106°
ILHA SOLTEIRA 2	1,0866 \angle 6,9651°
ILHA SOLTEIRA	1,0031 \angle -0,1607°
MIRASSOL	0,9106 \angle -17,3940°
ÁGUA VERMELHA	1,0163 \angle 3,8649°
ARARAQUARA	0,9963 \angle -13,3193°
GETULINA	0,9199 \angle -1,0669°
ASSIS	1,0298 \angle -12,0384°
BAURU 138	1,0530 \angle -27,2296°
OESTE	1,1960 \angle -37,0412°
CABREUVA	1,0871 \angle -34,3706°
SALTO	1,1466 \angle -48,3191°

4.1.3. Modelagem das LTs

A LT foco desta análise, LT Ilha Solteira - Bauru C1 e C2, foi modelada no RTDS, no módulo T-LINE, a partir do fornecimento das dimensões e geometria real da torre de transmissão, já apresentada na Figura 4.1. A disposição dos grupos de cabos condutores e pára-raios podem ser visualizados na Figura 4.4.

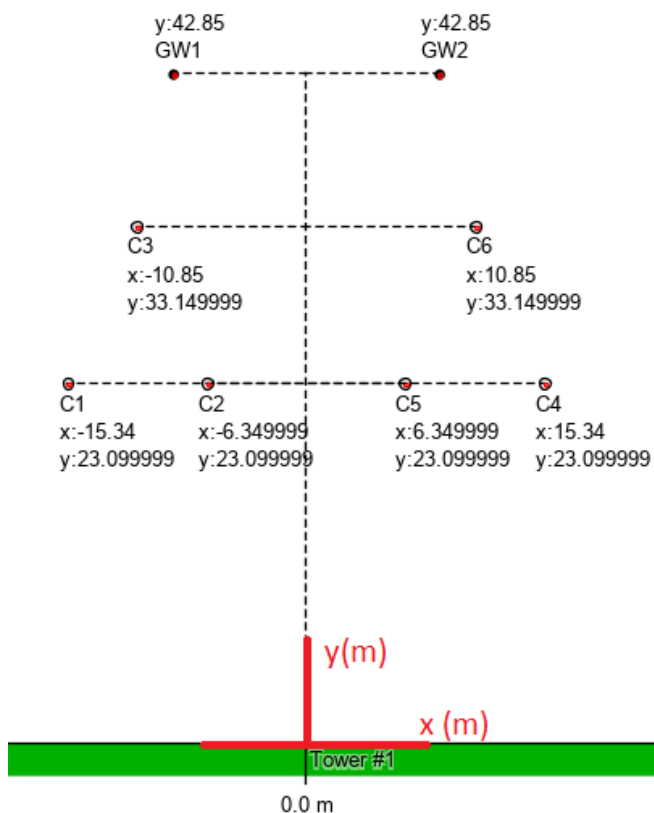


Figura 4.4 - Disposição Geométrica dos Condutores da LT.

A seguir são apresentadas algumas observações em relação à modelagem no simulador.

- a) Modelo utilizado: Bergeron;
- b) Resistividade do Solo adotada: $1000 \Omega \cdot \text{m}$, referente a um arenoso seco ou cascalho seco;
- c) Comprimento da LT: 324 km;
- d) Uso de transposição na configuração da linha de transmissão;
- e) Uso da frequência de 60 Hz na resolução do método de Bergeron;
- f) Nome do cabo condutor: Grosbeak (Raio do Subcondutor: 1,25 cm, Resistência DC por Subcondutor: $0,091 \Omega/\text{km}$);
- g) Número de Subcondutores: 4. Disposição conforme Figura 4.5.
- h) Nome do cabo pára-raio: Alumowel (Raio do cabo: 0,48 cm, Resistência por cabo: $1,491 \Omega/\text{km}$);
- i) Flecha dos Cabos: 6,9 m para os cabos condutores e 4,6 m para os cabos pára-raios, conforme Figura 4.6.

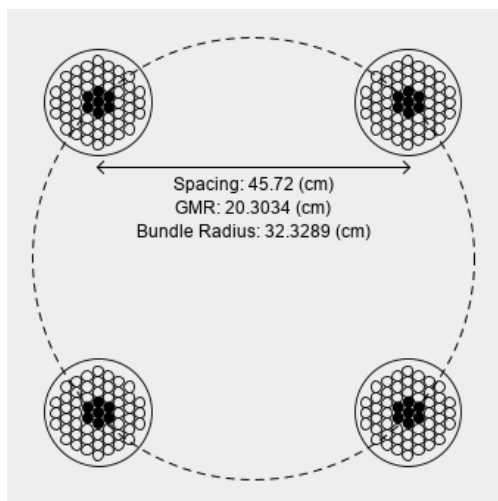


Figura 4.5 - Disposição Geométrica dos Subcondutores da LT.

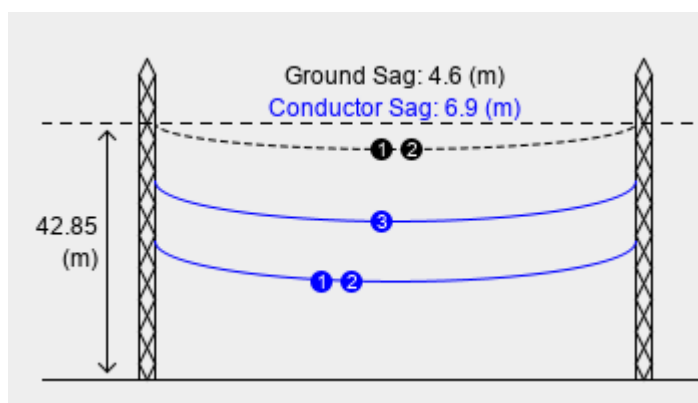


Figura 4.6 - Flecha dos Cabos da LT.

Para a modelagem das demais LTs também foi utilizado o modelo de Bergeron, no entanto, não foram inseridos dados geométricos (físicos) no *software*, mas sim dados elétricos referentes às impedâncias e reatâncias de sequência positiva e zero, retirados dos já citados bancos de dados do ONS.

4.1.4. Fluxo de Potência no RTDS

Com os dados de tensão em cada uma das barras, potência gerada (ou consumida) em cada uma das fronteiras e tensão interna em cada um dos equivalentes, obtidos através do caso real do ONS (apresentado na seção 4.1.2), foi possível simular uma condição de fluxo de potência muito próxima no sistema modelado no RTDS. Para isso, a barra de Ilha Solteira foi adotada como referência (barra *Swing*). Vale ressaltar que os equivalentes foram modelados utilizando o modelo de fonte trifásica do RSCAD.

Para efeito de comparação, a Tabela 4.5 apresenta o fluxo de potência na LT foco desta análise e as tensões nas barras obtidas através do ANAREDE e através do RTDS.

Tabela 4.5 - Comparação entre Resultados do ANAREDE e RTDS.

Descrição	Resultado ANAREDE	Resultado RTDS
Tensão na barra Ilha Solteira (pu)	1,039 \angle -3,3°	1,039 \angle -3,3°
Tensão na barra Bauru (pu)	1,038 \angle -18,2°	1,042 \angle -17,55°
MW de Ilha Solteira para Bauru C1 ou C2	538,8	546,02
MVAr de Ilha Solteira para Bauru C1 ou C2	-150,7	-165,00
MW de Bauru para Ilha Solteira C1 ou C2	-527,7	-535,53
MVAr de Bauru para Ilha Solteira C1 ou C2	-69,4	-70,58

4.2. Circuitos de Controle

Semelhante ao que foi citado no Capítulo 3, circuitos de controle também foram modelados no RSCAD para as análises com a LT dupla, ou seja, controles que possibilitam a execução de algumas funções:

- Abertura e fechamento dos disjuntos e chaves de aterramento do sistema;
- Seleção das características da falta (tipo, localização, duração, resistência de falta);
- TCs e TPs ideais;
- Interfaces de envio de sinais analógicos (tensão e corrente) do RTDS para os relés de proteção reais;
- Interface baseada na IEC 61850-90-1 para os esquemas de Teleproteção, possibilitando a comunicação entre os relés de proteção e o RTDS;
- Sistemas de Teleproteção baseado na IEC 61850-90-1.

Essa modelagem, bem como a modelagem do sistema elétrico, é realizada dentro do módulo *Draft* do RSCAD. A LT foco dessa análise modelada no *Draft* é ilustrada pela Figura 4.7.

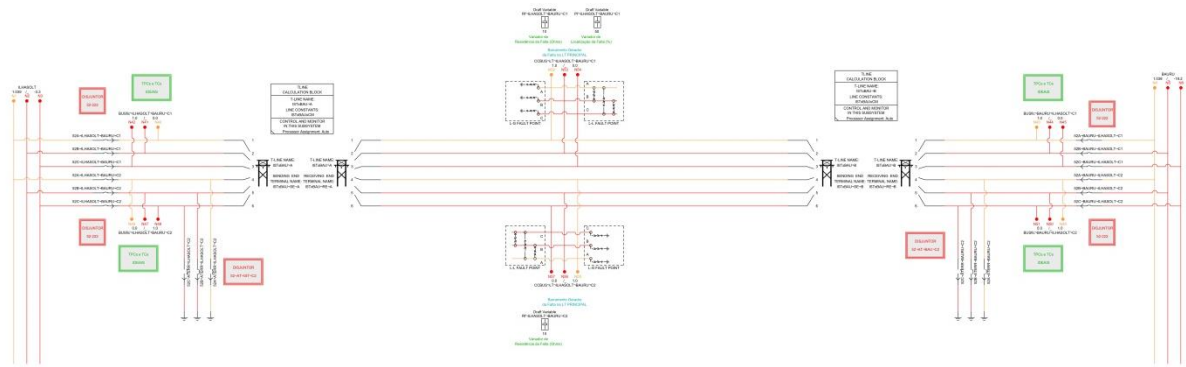


Figura 4.7 - LT Ilha Solteira - Bauru (circuito 1 e 2) Modelada no Módulo Draft do RTDS.

Conforme mencionado no Capítulo 3, os circuitos de controle criados no módulo *Draft* são controlados por um sistema supervisor desenvolvido no módulo *RunTime* do RSCAD. O sistema supervisor criado para a realização das análises desse capítulo é apresentado pela Figura 4.9. Pode-se perceber, por exemplo, que *Leds* são usados para indicar estados dos disjuntores e chaves do sistema, medidores são utilizados para apresentar valores de unidades elétricas e botões são utilizados para executar comandos (abertura e fechamento) e aplicar faltas.

4.2.1. Sistema de Teleproteção Modelado

Para as análises desse capítulo, apenas o Sistema de Teleproteção baseado na IEC 61850-90-1 é considerado, ou seja, as interfaces entre os relés de proteção e os Equipamentos de Teleproteção (modelados no RTDS), responsáveis pela troca de sinais digitais, são implementadas apenas através de mensagens GOOSE.

Semelhantemente ao que foi exposto no capítulo 3, o modelo do Sistema de Teleproteção baseia-se na simulação do tempo de operação da Teleproteção (T_A), conforme ilustra a Figura 4.8.

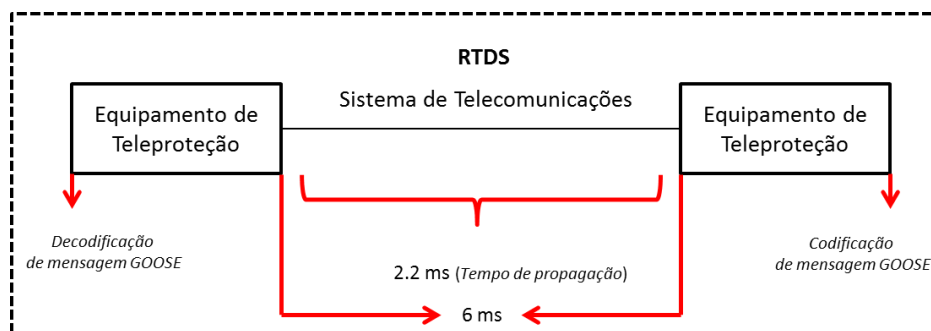


Figura 4.8 - Sistema de Teleproteção Modelado - Análise em LT de Circuito Duplo.

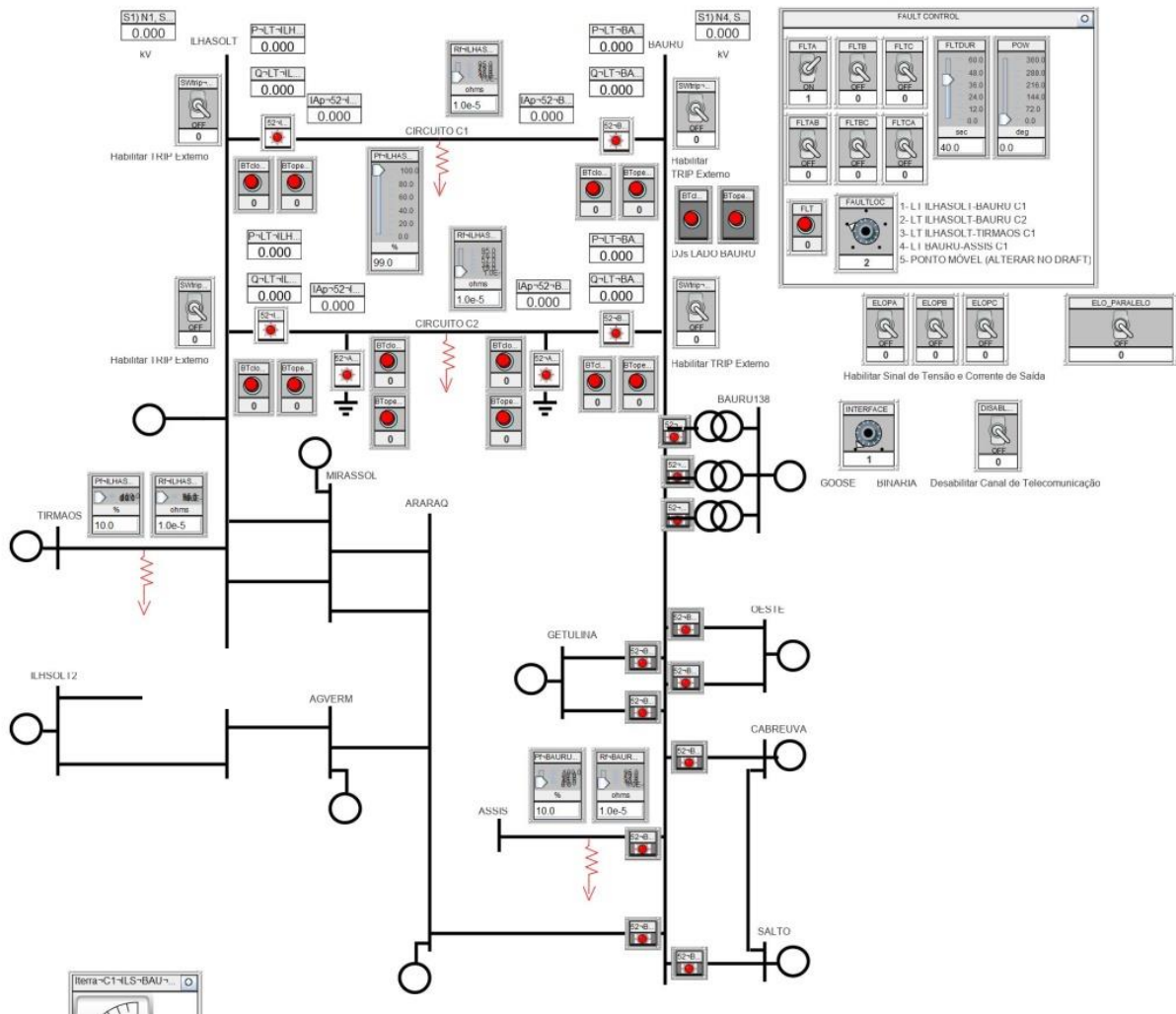


Figura 4.9 - Tela de Supervisão no RTDS – Análise em LT de Circuito Duplo.

Pode-se perceber na Figura 4.8 que, para essa análise em específico, o tempo de propagação do canal é adotado como sendo 2,2 ms, seguindo um valor típico associado a um meio de transmissão com fibra ótica, considerando o comprimento da LT (324 km).

Levando em consideração cada um dos esquemas de Teleproteção avaliados, o Apêndice B apresenta de forma mais detalhada os circuitos de controle da modelagem apresentada acima.

A mesma estrutura montada em laboratório para as análises do capítulo 3, apresentada pela Figura 3.5, é utilizada nas análises relacionadas à LT de circuito duplo. No entanto, neste capítulo, conforme já mencionado, apenas a interface baseada na IEC 61850-90-1 é considerada e apenas relés do fabricante intitulado M1 são utilizados, pois os mesmos apresentam todos os Esquemas de Teleproteção comentados utilizados em LTs e possibilitam a utilização do fator clássico de compensação de mútua apresentado na seção 2.4.2.

4.3. Funções de Proteção

Para atendimento das funcionalidades básicas dos esquemas de Teleproteção e garantia de uma proteção *stand-alone* de *backup* tanto para a LT principal como para as LTs adjacentes, três tipos de funções de proteção são configuradas nos relés das duas extremidades da LT principal: proteção de distância, proteção de sobrecorrente e proteção de sobrecorrente direcional.

O *software* ANAFAS, com suas funcionalidades de cálculo de curto-circuito, foi utilizado para a execução do estudo de proteção da LT sob análise. Para isso, o mesmo caso do ONS utilizado para gerar os equivalentes da rede foi considerado (horizonte 2018, caso BR1812PB).

A seguir são apresentados todos os critérios adotados e a definição dos ajustes das funções de proteção dos relés indicados pela Figura 4.10, representando uma memória de cálculo real que poderia ser aplicada aos ajustes de proteção da LT em questão.

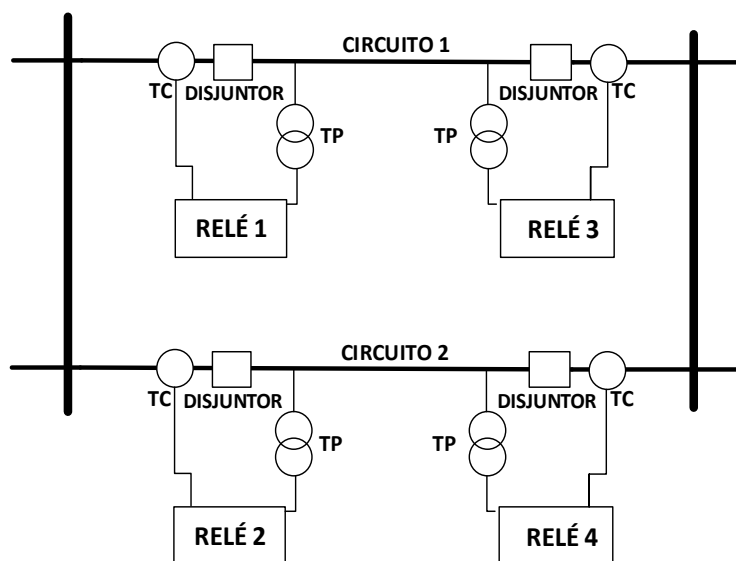


Figura 4.10 - Posição e Numeração dos Relés na LT de Circuito Duplo.

4.3.1. Memória de Cálculo – Relés 1 e 2

4.3.1.1. Dados do Sistema

A Tabela 4.6 destaca os dados da LT Principal.

Tabela 4.6 - Dados do Sistema – Memória de Cálculo – Relés 1 e 2.

Descrição	Valor
Tensão	440kV
Frequência	60Hz
Impedância de Sequência Positiva e Negativa (C1 ou C2)	99,85 \angle 85,39° Ω primário 14,98 \angle 85,39° Ω secundário
Impedância de Sequência Zero (C1 ou C2)	427,48 \angle 73,16° Ω primário 64,12 \angle 73,16° Ω secundário
Impedância Mútua de Sequência Zero	278,89 \angle 65,53° Ω primário 41,83 \angle 65,53° Ω secundário
Relação de Transformação TP	460kV/115V (4000)
Relação de Transformação TC	3000A/5A (600)

4.3.1.2. Proteção de Distância

A seguir são apresentados os critérios utilizados e cálculos dos alcances da proteção de distância, os quais foram baseados nos critérios adotados por uma Transmissora brasileira. As funções de distância com características MHO são utilizadas na proteção contra faltas entre fases e as funções com características quadrilaterais na proteção contra faltas do tipo fase-terra (*loop* fase-terra). Também são apresentados os cálculos do fator de compensação de terra e o fator de compensação de mútua.

- Alcance da característica MHO e alcance reativo da característica quadrilateral da Primeira Zona - Zona 1 (MHO_1 e X_1, respectivamente)

Critério adotado: A primeira zona é ajustada em 70 % da impedância da LT (considerando, por exemplo, erros dos equipamentos de transformação, TPs e TCs, tolerância de cálculos, variações da impedância da fonte, carregamento), sendo que não deve alcançar de forma nenhuma um curto-circuito externo. Para o caso do *loop* fase-terra é verificado a influência da configuração onde o circuito paralelo está aberto e aterrado em ambas as extremidades da LT. O menor valor entre 90 % da impedância medida pelo relé para uma falta monofásica na barra remota, considerando tal configuração, e 70 % da impedância da LT é adotado para o alcance reativo da característica quadrilateral. A Zona 1 não deve ser temporizada.

Conforme as faltas simuladas no ANAFAS, a impedância medida pelo relé para uma falta fase-terra na barra de Bauru com um circuito aberto e aterrado em ambas as extremidades é de $71,80 \angle 94,09^\circ$ ohms primários. Considerando o *loop* fase-terra, a seguinte verificação é necessária:

$$0,9 \times 71,80 = 64,62 \Omega \text{ primário} = 65\% \text{ da LT} < 70\% \text{ da LT}$$

Portanto, o valor do alcance reativo da característica quadrilateral da Zona 1 (X_1) adotado é:

$$X_1 \text{ adotado} = 64,9 \Omega \text{ primário (65\% da LT)}$$

Em relação ao *loop* fase-fase, o critério dos 70% da LT é mantido e o alcance da característica MHO da Zona 1 (MHO_1) é:

$$MHO_1 \text{ adotado} = 69,90 \Omega \text{ primário (70\% da LT)}$$

- Alcance da característica MHO e alcance reativo da característica quadrilateral da Segunda Zona - Zona 2 (MHO_2 e X_2, respectivamente)

Critério adotado: *A segunda zona é ajustada para garantia do alcance de toda a LT e deve estar limitada ao menor valor de impedância vista pelo relé para faltas (tanto monofásicas como trifásicas) a 50% das LTs conectadas à barra remota (com infeed), considerando uma falha dos respectivos disjuntores da barra remota. Também deve ser garantido que o ajuste não alcance a barra de baixa tensão dos transformadores conectados à barra remota. A temporização desta zona deve ser 0,4 s.*

Conforme simulações, tem-se:

- Para faltas nas LTs após a barra de BAURU, o menor valor de impedância medido é de 247,24 ohms primários e ocorre para uma falta trifásica a 50% da LT Bauru - Araraquara (disjuntor da extremidade de Araraquara aberto);
- Para faltas no lado de 138 kV da SE Bauru138, o menor valor de impedância medido é de 370,60 ohms primários e ocorre para faltas fase-terra.

Portanto, o ajuste da segunda zona pode estar entre 120% (margem de segurança adotado) da maior impedância vista pelo relé para um curto na barra de BAURU (133,93x1,2 ohms primários), que ocorre para a uma falta fase-terra com os dois circuitos da LT em operação, e no máximo em 247,24 ohms.

X₂ e MHO₂ adotado: 161 Ω primário

- Alcance da característica MHO e alcance reativo da característica quadrilateral da Terceira Zona - Zona 3 (MHO₃ e X₃, respectivamente)

Essa zona é utilizada apenas para indicação de faltas reversas para os esquemas de teleproteção, sendo que seu *Trip* não é utilizado para gerar comandos de abertura nos disjuntores.

Critério adotado: *Essa zona deverá ser capaz de detectar falhas externas à LT (faltas atrás do terminal local), abrangendo todo o alcance externo à LT coberto pelos elementos de sobrealcance do terminal remoto. Ou seja, deve ser configurada, com margem, para além do sobrealcance do terminal remoto.*

O critério acima é, especificamente, atendido utilizando as recomendações encontradas no manual de um dos fabricantes utilizados. O alcance da Zona 3 é definido como sendo igual ao alcance da Zona 2 (no sentido reverso), isso para que automaticamente o comprimento da LT protegida garanta uma margem de segurança suficiente para que o alcance da Zona 3 seja maior do que a cobertura fornecida pela Zona 2 do terminal remoto para faltas externas. Não há necessidade de definição de temporização, já que apenas a partida (ou pick-up) da função é utilizado.

Desta forma, o ajuste adotado é:

X₃ e MHO₃ adotado: 161 Ω primário (direção reversa)

- Alcance da característica MHO e alcance reativo da característica quadrilateral da Quarta Zona - Zona 4 (MHO_4 e X_4, respectivamente)

Critério adotado: *O alcance desta zona deve garantir uma proteção de retaguarda para a barra local e deve estar limitado ao menor valor de impedância vista pelo relé para faltas (tanto monofásicas como trifásicas) a 50% da menor LT na direção reversa (com infeed). A temporização deve ser ajustada em 2,5 s.*

O menor valor de impedância vista pelo relé para faltas na direção reversa ocorre na LT Ilha Solteira – Ilha Solteira 2, sendo o valor de 12,69 ohms para uma falta trifásica e 27,22 ohms para uma falta fase-terra. Desta forma, o ajuste adotado para a quarta zona é de:

MHO_4 e X_4 adotado: 10 Ω primário

- Alcance reativo da característica quadrilateral da Quinta Zona - Zona 5 (X_5)

Critério adotado: *O alcance desta zona deverá estar limitado ao menor valor de impedância vista pelo relé para faltas (monofásicas) a 100% das LTs conectada à barra remota (com infeed), considerando uma falha na operação dos respectivos disjuntores da barra remota. Também deve ser garantido que o ajuste não alcance a barra de baixa tensão dos transformadores conectados à barra remota. A temporização desta zona deve ser 1,5 s.*

Essa zona tem a finalidade de prover retaguarda remota para faltas em LTs adjacentes, no entanto, o ONS não recomenda sua utilização para o *loop* fase-fase, pois nessas aplicações alcances extensos são normalmente exigidos no diagrama R-X, podendo acarretar atuações incorretas durante contingências no sistema que provoquem aumentos significativos nos carregamentos das linhas. Portanto, essa zona é aplicada apenas em *loop* fase-terra.

Considerando as simulações, temos:

- Para faltas nas LTs após a barra de BAURU, o menor valor de impedância medido é de 391,67 ohms primários e ocorre para falta fase-terra a 99% da LT Bauru-Araraquara (disjuntor da extremidade de Araraquara aberto);
- A impedância vista pelo relé para faltas fase-terra no lado de 138 kV da SE Bauru138 é de 370,60 ohms primários.

Portanto, o ajuste adotado para o alcance reativo da característica quadrilateral é:

X_5 adotado: 350Ω primário (apenas loop fase – terra)

- Alcances Resistivos das características quadrilaterais

A seguir são apresentados os critérios adotados para a definição dos alcances resistivos das características quadrilaterais, ilustradas pela Figura 4.11.

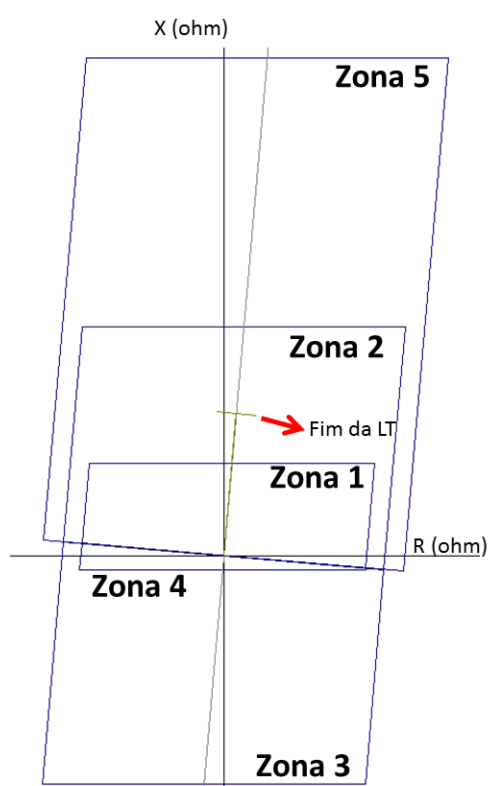


Figura 4.11 - Característica Quadrilateral da Proteção de Distância de Terra – Relés 1 e 2

Considerando que valores de 50 Ohms a 100 Ohms de resistências de faltas à terra são possíveis de correr na prática, os ajustes dos alcances resistivos para os *loops* fase-terra foram definidos considerando uma falta de alta resistência (de 100 Ohms primários), os alcances reativos já apresentados e o seu ângulo (próprio ângulo da LT Principal).

Colocando o alcance reativo da Zona 1 (X_1) na forma retangular, obtemos:

$$64,9 \angle 85,39^\circ = 5,21 + j64,69$$

Desta forma, o alcance resistivo (R_1) da zona 1 é obtido através da soma:

$$5,21 + 100 = 105,21$$

R_1 adotado: 100 Ω primário

Da mesma forma, adota-se os seguintes alcances resistivos para as Zonas 2, 3, 4 e 5, respectivamente:

R_2, R_3, R_4 e R_5 adotados:

113 Ω primário, 113 Ω primário, 100 Ω primário e 127 Ω primário

- Fator de Compensação de Terra

O Fator de Compensação de Terra é calculado utilizando a equação 2.7. Desta forma, chega-se ao seguinte valor:

$$K_0 = \frac{427,48 \angle 73,16^\circ - 99,85 \angle 85,39^\circ}{3 \times 99,85 \angle 85,39^\circ} = 1,10 \angle -15,90^\circ$$

- Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero

O Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero é calculado utilizando a equação 2.19. Desta forma, chega-se ao seguinte valor:

$$K_{0M} = \frac{278,89 \angle 65,53^\circ}{3 \times 99,85 \angle 85,39^\circ} = 0,93 \angle -19,90^\circ$$

4.3.1.3. Proteção de Sobrecorrente Direcional de Terra

A seguir são apresentados os critérios utilizados e cálculos dos parâmetros das funções de sobrecorrente direcional de terra.

- Proteção de Sobrecorrente Direcional de Terra Temporizado (67NT)

Critério adotado para a corrente de partida: *A corrente de partida (ou pick-up) deve considerar (ser maior) o desequilíbrio normal do sistema, erros de TCs e ser sensível suficiente para detectar curtos à terra com alta resistência de falta. Um ajuste de 10 % da corrente nominal do TC é praticável.*

Desta forma, temos:

$$10\% 3000 = 300 \text{ A primário}$$

Critério adotado para a definição da curva corrente-tempo: *É preferível a utilização da curva Normal Inversa, com temporização de 300 ms para curtos close-in e de 2 s para curtos na barra remota.*

Conforme simulação, a corrente passante para uma falta fase-terra *close in* em Ilha Solteira no bay de saída para a SE Bauru é de 27799 A (três vezes a corrente de sequência zero, $3I_0$) e a maior corrente passante para um curto na barra remota é de 1035 A ($3I_0$). Considerando a equação 4.4, que apresenta a formulação da curva normal inversa com base na norma IEC, pode-se obter o possível *Dial* de tempo (TD – *Time Dial*).

$$TD = \frac{(M^{0,02} - 1) \times t}{0,14} \quad (4.4)$$

Onde:

M- Múltiplo da corrente de partida;

t - Tempo de atuação;

Para o curto *close in* obtém-se um TD de 0,203 e para o curto na barra remota obtém-se um TD de 0,358. Adota-se o valor de TD de 0,234, possibilitando a atuação em 1 s para a maior contribuição para um curto na barra remota (corrente passante: 1507 A, que ocorre quando um circuito está aberto e aterrado).

Desta forma, temos:

*67NT adotado: Pickup de 300 A primário, Curva normal inversa,
TD de 0,23, Sentido Direto*

- Proteção de Sobrecorrente Direcional de Terra Instantâneo – Direto e Reverso (67NI e 67NIrev, respectivamente)

Dois elementos instantâneos são ajustados para apenas realizar a indicação de faltas diretas e reversas para os Esquemas de Teleproteção, sendo que seu *Trip* não é utilizado para gerar comandos de abertura nos disjuntores.

A partida do elemento direcional com sentido direto é definida com o mesmo valor da função de sobrecorrente direcional de terra temporizada. Portanto:

67NI adotado: Pickup de 300 A primário

Já a partida do elemento direcional com sentido reverso é definida considerando um curto fase-terra a 50% da maior LT na direção reversa com resistência de falta de 50 ohms. A maior LT atrás do barramento de Ilha Solteira é a LT Ilha Solteira – Mirassol, e a falta supracitada gera uma corrente passante de 95 A ($3I_0$). Considerando o mínimo ajuste do relé utilizado, o ajuste é definido em:

67NIrev adotado: Pickup de 150 A primário

4.3.1.4. Demais considerações

Apesar de não serem consideradas nessa memória de cálculo, as seguintes funções são recomendadas e podem ser configuradas para a proteção da LT em estudo:

- Função de sobrecorrente instantânea de fase para a proteção SOFT (proteção em casos de fechamento sob falta);
- Função de sobretensão (ANSI 59);
- Função de religamento automático (ANSI 79);
- Função de sincronismo (ANSI 25).

4.3.2. Ajustes dos Relés 3 e 4

Considerando os mesmos critérios adotados na memória de cálculo da seção anterior, os ajustes para os relés 3 e 4 são definidos e apresentados na Tabela 4.7, a qual também resume os ajustes estabelecidos para os relés 1 e 2.

Tabela 4.7 - Ajustes de Proteção dos Relés

Ajustes dos Relés 1 e 2	
Descrição	Configuração (valores primários)
X_1	64,9 Ω , pra frente, temporização 0 s
MHO_1	69,9 Ω , pra frente, temporização 0 s
X_2 e MHO_2	161 Ω , pra frente, temporização 0,4 s
X_3 e MHO_3	161 Ω , reversa
X_4 e MHO_4	10 Ω , reversa, temporização 2,5 s
X_5 e MHO_5	350 Ω , pra frente, temporização 1,5 s
R_1 e R_4	100 Ω
R_2 e R_3	113 Ω
R_5	127 Ω
K ₀	1,10 \angle – 15,90°
K _{0M}	0,93 \angle – 19,90°
67NT	Pickup 300 A, curva nolmal inversa, TD 0,23, pra frente
67NI	Pickup 300 A
67NIrev	150 A
Ajustes dos Relés 3 e 4	
Descrição	Configuração (valores primários)
X_1 e MHO_1	69,9 Ω , pra frente, temporização 0 s
X_2 e MHO_2	115 Ω , pra frente, temporização 0,4 s
X_3 e MHO_3	115 Ω , reversa
X_4 e MHO_4	110 Ω , reversa, temporização 2,5 s
X_5 e MHO_5	130 Ω , pra frente, temporização 1,5 s
R_1	100 Ω
R_2, R_3 e R_4	107 Ω
R_5	113 Ω
K ₀	1,10 \angle – 15,90°
K _{0M}	0,93 \angle – 19,90°
67NT	Pickup 300 A, curva nolmal inversa, TD 0,27, pra frente
67NI	Pickup 300 A
67NIrev	155 A

A Figura 4.12 ilustra as características quadrilaterais dos Relés 3 e 4.

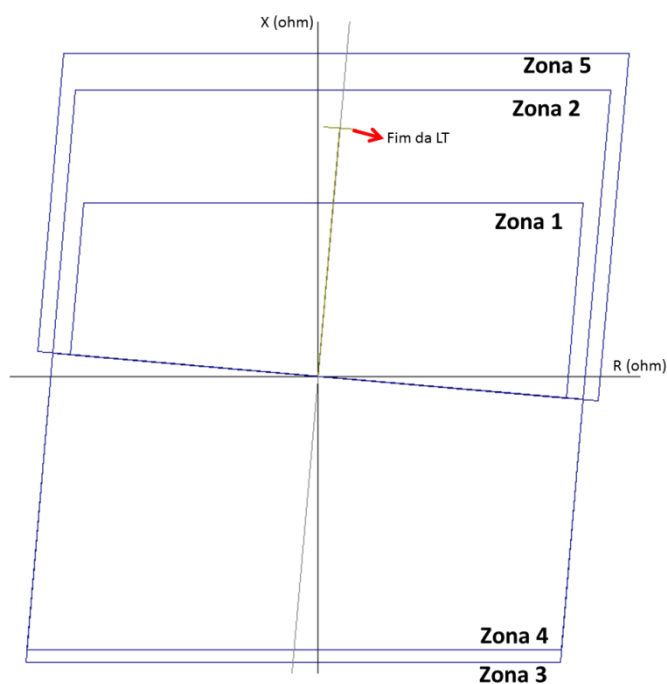


Figura 4.12 - Característica Quadrilateral da Proteção de Distância de Terra – Relés 3 e 4

4.4. Resultados dos Testes

Para melhor entendimento dos resultados e análises das próximas seções deste capítulo, algumas informações são importantes:

- Os curtos-circuitos simulados nesta seção são todos fase-terra (AG) sólidos, ou seja, sem resistência de falta;
- O tempo decorrido entre a ocorrência da falta e a emissão do comando de *Trip* pelo relé é representado por “ Δt ”. Para obtenção desses tempos, e os valores de impedância medida durante a falta, foram utilizadas oscilografias e listas de eventos geradas pelos próprios relés de proteção. Os valores de impedância indicados como “ ∞ ” se referem a um valor elevado não calculado ou desconsiderado pelo *software* de análise de oscilografia (esse mesmo valor aparece, por exemplo, quando a impedância está na região de carga);
- Apenas os relés do fabricante M1 são utilizados, os quais possuem o parâmetro do Fator de Compensação de Mútua Clássico (conforme apresentado na seção 2.4.2), KOM;

- A posição e nomenclatura dos relés encontra-se na Figura 4.10. A porcentagem relacionada à localização das faltas tem como referência o disjuntor do terminal do relé 1 para faltas no circuito 1, o disjuntor do terminal do relé 2 para faltas no circuito 2, o terminal ligado a barra Bauru para faltas na LT Bauru-Assis e o terminal ligado a barra Ilha Solteira para faltas na LT Ilha Solteira-Três Irmãos;
- As análises se concentram nas informações obtidas dos relés 1 e 3 e os testes de Teleproteção desse capítulo consideram os esquemas sendo implementados com tais relés;
- As Zonas de proteção da Função 21N de 1 a 5 são também nomeadas como Z1, Z2, Z3, Z4 e Z5.

4.4.1. Cenário 1 - LT em Operação Normal Sem Mútua

No Cenário 1 são aplicadas faltas nos locais indicados na Tabela 4.8 (1º coluna) e a LT Ilha Solteira - Bauru encontra-se em sua operação normal de operação, ou seja, seus dois circuitos em funcionamento. Este cenário é considerado referência para os próximos dois cenários, pois aqui o efeito da mútua é desconsiderado. Para isso, no RTDS a distância de separação entre os circuitos 1 e 2 foi elevada a tal ponto que o efeito da mútua pudesse ser desconsiderado (impedância mútua de sequência zero menor que 1% da impedância de sequência positiva).

Na tabela são mostradas as leituras de impedâncias (módulo e ângulo) realizadas pelos relés e em qual zona de proteção da função 21N essa medição se encontra. Observando os resultados dos testes, o comportamento das medições não é diferente do que já era esperado. Tanto para o relé 1 quanto para o relé 3, é notório que as impedâncias medidas diante de faltas no circuito 1 apresentam erros pequenos (lembrando que a impedância da LT é próxima a 100 ohm) e não são influenciadas pelo efeito da mútua (desconsiderada nesse cenário). A tabela destaca (em amarelo) inclusive a zona de sobreposição dos dois relés. A mesma conclusão pode ser obtida para os resultados diante de faltas no circuito 2 e externas, apesar dessa visualização não ser tão trivial por conta do efeito do *infeed* (contribuição das barras do sistema), ou seja, por conta de o sistema não ser radial.

Desta maneira, pode-se concluir que o comportamento dos esquemas de Teleproteção não é afetado nesse cenário e se assemelhará ao apresentado no Capítulo 3, ou seja, se assemelhará ao que é observado em uma LT de circuito simples.

Tabela 4.8 - Resultados – LT em Operação Normal - Sem Mútua.

Sem Mútua - Sem K0M						
Falta no circuito 1						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	0,98	85,70	Z1	101,22	85,30	Z2
10,00	9,80	85,80	Z1	89,98	85,90	Z2
20,00	19,68	85,80	Z1	80,30	85,60	Z2
40,00	39,32	85,80	Z1	59,14	85,80	Z1
60,00	59,75	85,70	Z1	39,57	85,80	Z1
80,00	79,84	85,70	Z2	19,65	85,80	Z1
90,00	90,42	86,20	Z2	9,81	86,00	Z1
99,00	100,99	86,10	Z2	0,98	86,20	Z1
Falta no circuito 2						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	56,19	-71,80	Z3	169,04	93,60	-
10,00	293,22	-24,50	-	∞	-	-
20,00	∞	-	-	∞	-	-
40,00	∞	-	-	∞	-	-
60,00	∞	-	-	∞	-	-
80,00	∞	-	-	191,85	-129,00	-
90,00	∞	-	-	120,87	-117,70	Z4
99,00	116,09	84,40	Z2	13,91	-104,50	Z4
Falta na LT Bauru-Assis						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	105,51	85,30	Z2	4,60	-110,10	Z4
5,00	125,53	82,40	Z2	16,52	-111,90	Z4
10,00	147,67	79,40	Z2	42,87	-114,50	Z4
Falta na LT IlhaSolteira-Três Irmãos						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	6,93	-86,80	Z4	111,43	86,40	Z2
5,00	34,06	-82,50	Z3	142,62	87,70	-
10,00	63,69	-79,20	Z3	187,01	92,10	-

4.4.2. Cenário 2 - LT em Operação Normal Com Mútua – Sem K0M

No Cenário 2 são aplicadas faltas nos locais indicados na Tabela 4.9 e a LT Ilha Solteira - Bauru encontra-se em sua operação normal de operação, ou seja, seus dois circuitos em funcionamento. Neste cenário o efeito da mútua é considerado, ou seja, a distância entre os circuitos 1 e 2 são os reais, e os relés de proteção não estão configurados com o Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero.

Tabela 4.9 - Resultados – LT em Operação Normal Com Mútua – Sem KOM

Com Mútua - Sem KOM										
Falta no circuito 1										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	1,00	85,40	Z1	SUB	1,91	112,34	86,50	Z2	SUB	10,99
10,00	10,04	85,30	Z1	SUB	2,43	93,11	85,50	Z2	SUB	3,47
20,00	20,20	85,20	Z1	SUB	2,68	82,38	85,50	Z2	SUB	2,59
40,00	40,95	85,10	Z1	SUB	4,15	60,52	85,40	Z1	SUB	2,32
60,00	62,82	84,90	Z1	SUB	5,13	39,87	85,30	Z1	SUB	0,76
80,00	87,95	84,80	Z2	SUB	10,16	19,83	85,40	Z1	SUB	0,90
90,00	104,61	84,30	Z2	SUB	15,70	9,89	85,40	Z1	SUB	0,83
99,00	131,92	82,70	Z2	SUB	30,63	0,99	85,60	Z1	SUB	0,61
Falta no circuito 2										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	58,89	-78,50	Z3	SUB	4,81	188,82	92,20	-	SUB	11,70
10,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
20,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
40,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
60,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
80,00	∞	-	-	-	-	159,26	-138,40	-	SOBRE	-16,99
90,00	274,26	72,00	Z5	-	-	107,04	-123,70	Z4	SOBRE	-11,44
99,00	151,38	81,10	Z2	SUB	30,40	13,76	-110,00	Z4	SOBRE	-1,11
Falta na LT Bauru-Assis										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	143,12	81,90	Z2	SUB	35,65	5,19	-109,30	Z4	SUB	12,79
5,00	167,34	79,70	Z5	SUB	33,31	24,67	-110,80	Z4	SUB	49,28
10,00	195,69	77,40	Z5	SUB	32,52	46,56	-112,80	Z4	SUB	8,60
Falta na LT IlhaSolteira-Três Irmãos										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	7,83	-86,90	Z4	SUB	12,97	129,17	87,80	Z5	SUB	15,92
5,00	38,53	-83,40	Z3	SUB	13,12	166,50	89,60	-	SUB	16,74
10,00	72,21	-79,50	Z3	SUB	13,37	220,78	93,50	-	SUB	18,06

Na Tabela 4.9 são mostradas as leituras de impedâncias (módulo e ângulo) realizadas pelos relés e em qual zona de proteção da função 21N essa medição se encontra. Também são apresentados os erros (associados à influência da mútua de sequência zero) calculados em relação à medição realizada no cenário 1 (que desconsidera o efeito da mútua), os quais são também caracterizados como sendo erros de Subalcance (SUB) ou Sobrealcance (SOBRE).

De forma gráfica, a Figura 4.12 apresenta os erros obtidos relacionados ao relé 1 diante de faltas no circuito 1. Nota-se que os erros tornaram-se expressivos a partir de faltas ocorridas a 80% do circuito (erros acima de 10%).

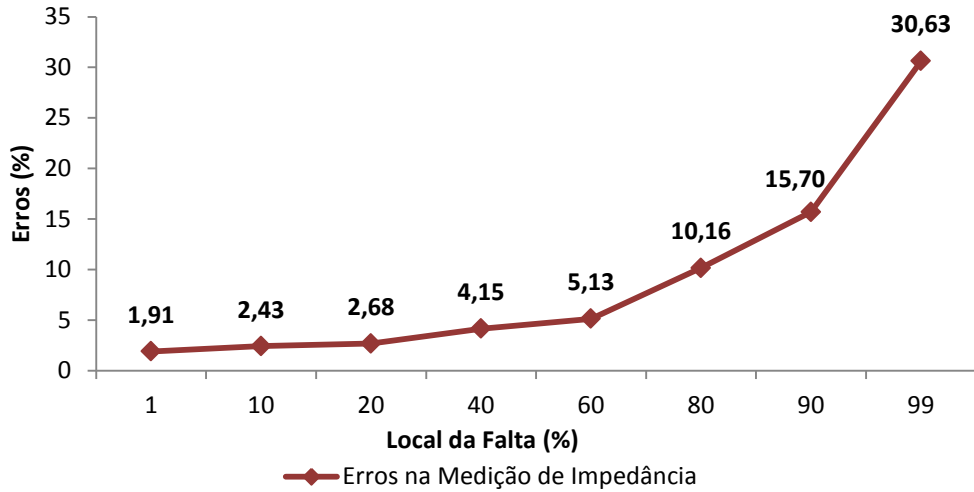


Figura 4.13 - Erros na Medição de Impedância – Relé 1

Em (Ziegler, 2006) também é apresentado um gráfico de erros relacionados à mesma configuração operativa considerada nessa seção (LT de circuito duplo com mútua com fonte de alimentação nas duas extremidades) e mesma posição do relé 1, conforme mostra a Figura 4.14.

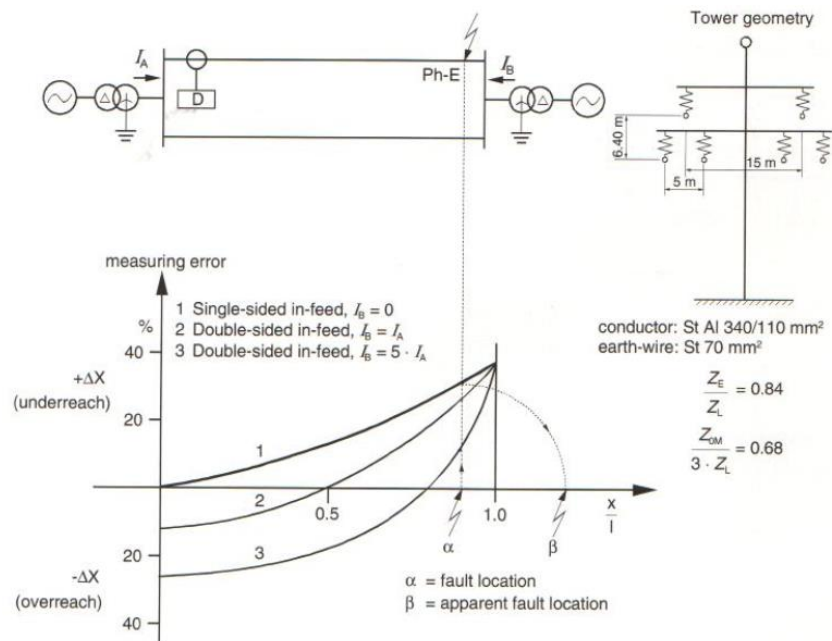


Figura 4.14 - Erros na Medição de Impedância
 Fonte: Ziegler (2008)

Como pode ser observado na Figura 4.14, Ziegler (2008) sugere que erros de subbalcance podem ocorrer considerando a configuração operativa onde existe contribuição para o curto apenas de uma extremidade da LT (curva 1, $I_B=0$) e, considerando a configuração operativa onde há fontes nas duas extremidades (configuração considerada nessa seção), casos de subbalcance e sobrealcance podem ocorrer (curvas 2 e 3).

Esse resultado se mostrou diferente ao obtido e ilustrado na Figura 4.13, onde apenas erros de subbalcance acontecem (o mesmo é observado em relação às medições do relé 3), mesmo havendo fonte de alimentação nas duas extremidades. Um fato importante observado é que em (Ziegler, 2006) o desenho de cada uma das curvas leva em consideração uma relação fixa entre as correntes de contribuição dos dois extremos (para a curva 2 essa relação é fixa em 1, para a curva 3 essa relação é fixa em 5), independentemente de onde a falta ocorre no circuito da LT, o que não ocorreu nos testes executados. Dependendo do local da falta, essa relação é modificada e, no caso do sistema analisado, os valores (dessa relação) em todas as faltas simuladas levaram a obtenção de apenas erros de subbalcance, motivo pelo qual as curvas 2 e 3, apresentadas na Figura 4.14, não se assemelharam a curva obtida na Figura 4.13. Esse fato reforça a importância de estudos que envolvem análises práticas com simulações.

Atentando-se especificamente ao erro obtido pelo relé 1 diante de uma falta a 99% do circuito 1 da LT, nota-se que o subbalcance foi de 30,63% e a impedância ainda foi identificada na Zona 2 da função 21N, conforme mostra a Figura 4.15.

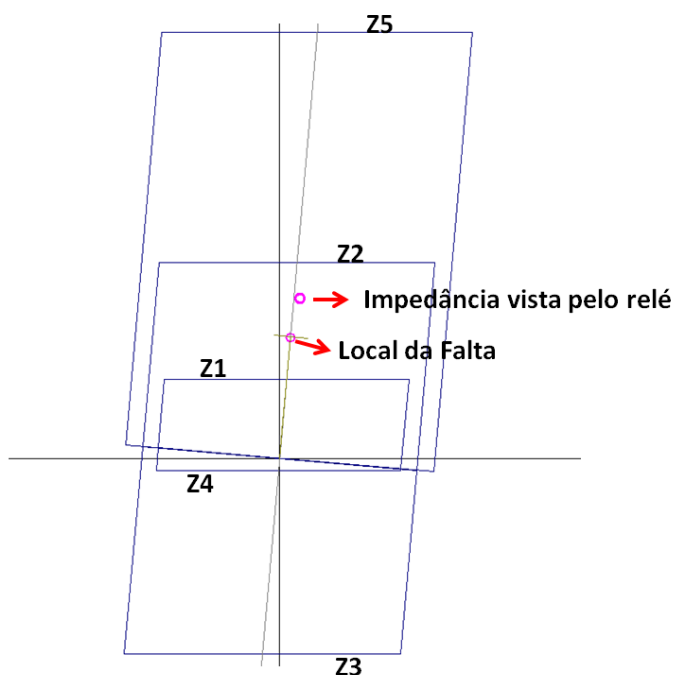


Figura 4.13 - Erro na Medição de Impedância – Relé 1 – Cenário 2 (Falta em 99% C1)

Desta maneira, fica evidente a importância de se considerar o efeito da mútua nos estudos de proteção. Como mencionado, o ajuste do alcance reativo da Zona 2 levou em consideração a maior impedância vista pelo relé para um curto na barra remota. No entanto, caso a modelagem presente no *software* de simulação de curto circuito não tivesse considerado a mútua de sequência zero, ou se apenas 120% do valor da impedância de sequência positiva da LT fosse utilizada para definição do alcance da zona de proteção, uma falta dentro da LT não seria vista pela mesma.

Considerando tal hipótese, ou seja, se o relé 1 não tivesse identificado a falta (ocorrida a 99% de seu terminal) dentro da sua Zona 2, é cabível pensar que o desempenho dos Esquemas de Teleproteção PUTT, POTT, DCUB e DCB estaria comprometido, pois a atuação dos mesmos, conforme já visto, depende da sensibilização do elemento de sobrealcance. Já o esquema DUTT não estaria comprometido, tendo em vista, que a sensibilização do elemento de subalcance do terminal remoto geraria um sinal de DISPARO correto e rápido, o qual seria emitido para a extremidade oposta, causando a abertura do disjuntor do terminal local. Baseado nessa hipótese e para exemplificação, dois testes com o esquema POTT foram conduzidos, o primeiro considerando que o relé 1 foi parametrizado com os ajustes definidos na memória de cálculo apresentada e o segundo considerando que a Zona 2 do relé 1 foi parametrizado com apenas 120% da impedância de sequência positiva da LT. A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos nos dois testes.

Tabela 4.10 - Teste POTT – Cenário 2

Falta AG a 99% do Circuito 1 – Zona 2 Não Alterada		
Esquema	Relé 1	
	TRIP por	Δt ms
POTT	Esquema	21
Falta AG a 99% do Circuito 1 – Zona 2 Reduzida		
Esquema	Relé 1	
	TRIP por	Δt ms
POTT	Esquema	81

Os resultados da tabela acima são bastante interessantes. Nos dois cenários considerados, houve emissão de *Trip* no relé 1 gerado pelo esquema POTT, no entanto, no cenário onde a Zona 2 foi reduzida, o tempo desde a falta até o *Trip* foi 60 ms (81 – 21 ms) a mais do que o observado no cenário onde a Zona 2 estava conforme memória de cálculo apresentada. A explicação disso está no fato de que, devido ao efeito da mútua, o relé 1 no primeiro cenário identificou a falta dentro da Zona 2 da função 21N somente após a abertura do disjuntor do terminal do relé 3, o que retardou a atuação do esquema. A Figura 4.14

apresenta as oscilografias de corrente capturadas pelo relé 1 e destaca os momentos onde houve a abertura do terminal remoto (ponto onde a corrente lida se eleva) e onde a Zona 2 foi sensibilizada (ponto o esquema POTT emitiu o sinal de *Trip*, já que o permissivo vindo do terminal remoto não havia cessado).

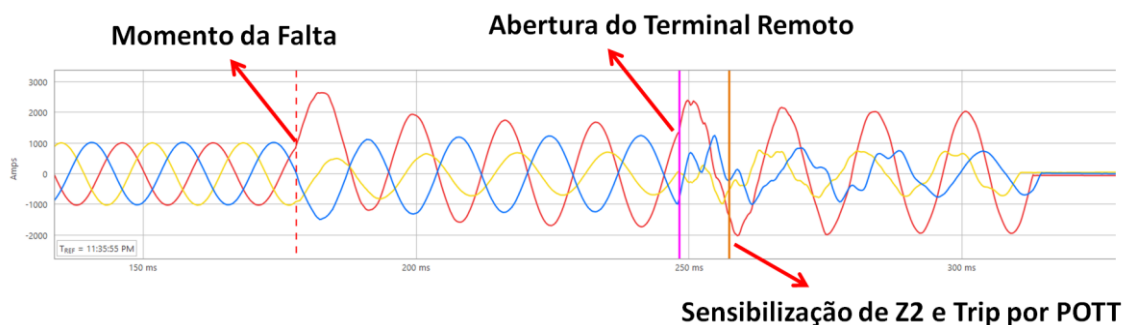


Figura 4.14 - Oscilografia (Falta em 99% C1) – Relé 1 –Zona 2 Reduzida.

Esse resultado pode ser aplicado aos demais Esquemas de Teleproteção (PUTT, DCUB e DCB) e evidencia a influência que a mútua de sequência zero pode exercer em suas atuações. Nesse caso, uma atuação que poderia ter ocorrido em 21 ms após a falta, ocorreu após 81 ms.

Diante dessa situação proposta, duas outras questões também devem ser observadas. Caso o disjuntor do terminal remoto tivesse falhado em sua abertura (cenário provável de acontecer), a atuação do esquema e disparo do relé 1 poderia ser ainda mais retardado. Além disso, é interessante notar que se o permissivo vindo do terminal remoto tivesse sido interrompido instantaneamente após a abertura do disjuntor remoto, os esquemas POTT e PUTT não emitiriam sinal de *Trip*, já que a atuação de tais esquemas depende tanto da sensibilização do elemento de sobrealcance como do sinal permissivo. Vale mencionar que os relés utilizados (tanto M1 como M2) permitem a parametrização de um temporizador para que o permissivo não cesse instantaneamente. Através da lista de eventos do relé 1 notou-se que o sinal permissivo cessou 16 ms após a sensibilização da Zona 2, demonstrando a importância de se considerar um temporizador *dropout* na emissão do sinal da Teleproteção. Nesse último caso em específico, o DCB não seria afetado, já que o esquema não necessita receber sinal permissivo para atuação, mas sim que o tempo de coordenação seja cumprido e o elemento de sobrealcance esteja ativado.

4.4.3. Cenário 3 - LT em Operação Normal Com Mútua – Com K0M

No Cenário 3 são aplicadas faltas nos locais indicados na Tabela 4.11 e a LT Ilha Solteira - Bauru encontra-se em sua operação normal de operação, ou seja, seus dois circuitos em funcionamento. Neste cenário o efeito da mútua é também considerado, no entanto, os relés de proteção estão configurados com o Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero, conforme apresentado nas memórias de cálculo, e recebem a corrente de terra da linha paralela para realização dos cálculos.

Na Tabela 4.11 são mostradas as leituras de impedâncias (módulo e ângulo) realizadas pelos relés e em qual zona de proteção da função 21N essa medição se encontra. Também são apresentados os erros calculados em relação à medição realizada no cenário 1 (que desconsidera o efeito da mútua), os quais são também caracterizados como sendo erros de Subalcance (SUB) ou Sobrealcance (SOBRE).

Os resultados demonstram o efeito da compensação de mútua sobre a medição de impedância dos relés. Observando os erros relacionados às faltas no circuito 1, nota-se que a compensação foi eficaz e reduziu drasticamente os erros visualizados no cenário anterior (Cenário 2). Notou-se também que os erros dos relés diante de faltas externas e à frente também foram reduzidos consideravelmente (medições do relé 1 para as faltas na LT Bauru – Assis e medições do relé 3 para as faltas na LT IlhaSolteira-Três Irmãos). Desta maneira, pode-se concluir que o comportamento dos esquemas de Teleproteção não é afetado diante de tais situações de falta e se assemelhará ao que é observado em uma LT de circuito simples.

No entanto, nota-se que para faltas no circuito 2 o efeito da compensação foi contrário. Por exemplo, conforme destacado (em amarelo) na Tabela 4.11, para uma falta à 1% do circuito 2, a impedância lida pelo relé 1 se localiza dentro da Zona 1 da função 21N. O mesmo ocorre em relação ao relé 3 para faltas a 80%, 90% e 99% do circuito 2. Como mencionado na seção 2.4.2, esse fato se deve à “supercompensação” causada devido à alta corrente residual que circula no circuito paralelo durante a falta, a qual é utilizada pelos relés 1 e 3 para os cálculos da compensação. Diante disso, é cabível pensar que não apenas os Esquemas de Teleproteção podem ser afetados, mas também a própria proteção *stand-alone* dos relés 1 e 3.

No entanto, para verificação de tal situação, não apenas a leitura das impedâncias foi analisada, mas também a atuação das funções. Desta forma, notou-se que para esses casos, apesar da impedância ser lida como dentro da Zona 1, não houve atuação da função 21N.

Tabela 4.11 - Resultados – LT em Operação Normal Com Mútua – Com K0M

Com Mútua - Com K0M										
Falta no circuito 1										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	1,00	85,40	Z1	SUB	2,22	101,13	85,60	Z2	SOBRE	-0,09
10,00	10,01	85,40	Z1	SUB	2,15	92,33	85,80	Z2	SUB	2,61
20,00	20,05	85,30	Z1	SUB	1,90	81,94	85,60	Z2	SUB	2,04
40,00	40,15	85,30	Z1	SUB	2,13	60,65	85,50	Z1	SUB	2,54
60,00	60,85	85,40	Z1	SUB	1,84	40,44	85,40	Z1	SUB	2,19
80,00	81,60	85,40	Z2	SUB	2,21	20,10	85,40	Z1	SUB	2,31
90,00	92,79	85,50	Z2	SUB	2,62	10,06	85,40	Z1	SUB	2,56
99,00	101,35	85,60	Z2	SUB	0,36	1,03	85,70	Z1	SUB	4,40
Falta no circuito 2										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	2,41	87,60	Z1	SOBRE	-95,71	131,95	87,80	-	SOBRE	-21,94
10,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
20,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
40,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
60,00	∞	-	-	-	-	∞	-	-	-	-
80,00	∞	-	-	-	-	54,40	89,20	Z1	SOBRE	-71,64
90,00	141,90	85,10	Z2	-	-	26,93	88,80	Z1	SOBRE	-77,72
99,00	∞	-	-	-	-	2,66	88,40	Z1	SOBRE	-80,91
Falta na LT Bauru - Assis										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	107,70	85,30	Z2	SUB	2,08	4,29	-103,20	Z4	SOBRE	-6,94
5,00	126,33	84,10	Z2	SUB	0,64	20,48	-104,30	Z4	SUB	23,95
10,00	151,62	82,90	Z2	SUB	2,67	38,54	-105,70	Z4	SOBRE	-10,09
Falta na LT IlhaSolteira-Três Irmãos										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	7,35	-88,60	Z4	SUB	6,04	111,58	85,70	Z2	SUB	0,13
5,00	36,05	-86,10	Z3	SUB	5,82	145,59	87,00	-	SUB	2,08
10,00	70,21	-83,70	Z3	SUB	10,23	194,54	90,00	-	SUB	4,03

Vale mencionar que o relé utilizado nesse capítulo não possui o recurso conhecido como Balanço de Corrente de Terra apresentado na seção 2.4.2. Realizando uma pesquisa no manual do fabricante, descobriu-se que o relé utiliza em seus elementos da função 21N correntes de sequência-zero e sequência-negativa como comparadores direcionais extras. O fabricante destaca que ambas as correntes são da linha protegida e não são afetadas por

nenhuma compensação e sua utilização é eficaz em relação aos casos de falhas reversas na situação quando o relé é “supercompensado”.

Para os casos supracitados, notou-se que realmente o sentido da corrente de sequência zero nos relés é reverso, ou seja, a metodologia utilizada pelo fabricante para o relé não ser afetado pela compensação de mútua foi satisfatória. No entanto, geram-se dúvidas relacionadas ao comportamento do relé diante de casos onde a “supercompensação” acontece quando a corrente de sequência-zero e sequência-negativa têm sentido direto. Este caso parece ser possível de ocorrer, por exemplo, onde a LT dupla é radial, como apresentado na Figura 2.12. Este fato não é analisado nesta dissertação em específico, mas trabalhos futuros podem ser direcionados para verificação de tais casos.

4.4.4. Cenário 4 - Circuito Paralelo Aterrado - Sem Mútua

No Cenário 4 são aplicadas faltas nos locais indicados na Tabela 4.12 e a LT Ilha Solteira - Bauru encontra-se com o circuito 2 aberto e aterrado nas duas extremidades. Este cenário é considerado referência para os próximos dois cenários, pois aqui o efeito da mútua é desconsiderado. Para isso, no RTDS a distância entre os circuitos 1 e 2 foi elevada a tal ponto que o efeito da mútua pudesse ser desconsiderado (impedância mútua de sequência zero menor que 1% da impedância de sequência positiva).

Na tabela são mostradas as leituras de impedâncias (módulo e ângulo) realizadas pelos relés e em qual zona de proteção da função 21N essa medição se encontra. Observando os resultados dos testes, o comportamento das medições não é diferente do que já era esperado. Tanto para o relé 1 quanto para o relé 3, é notório que as impedâncias medidas diante de faltas no circuito 1 apresentam erros pequenos (lembrando que a impedância da LT é próxima a 100 ohm) e não são influenciadas pelo efeito da mútua (desconsiderada nesse cenário). A tabela destaca (em amarelo) inclusive a zona de sobreposição dos dois relés. A mesma conclusão pode ser obtida para os resultados diante de faltas externas, apesar dessa visualização não ser tão trivial por conta do efeito do *infeed* (contribuição das barras do sistema), ou seja, por conta do sistema não ser radial.

Desta maneira, pode-se concluir que o comportamento dos esquemas de Teleproteção não é afetado nesse cenário e se assemelhará ao apresentado no Capítulo 3, ou seja, se assemelhará ao que é observado em uma LT de circuito simples.

Tabela 4.12 - Resultados – LT com Circuito Paralelo Aterrado - Sem Mútua

Sem Mútua - Sem K0M						
Falta no circuito 1						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	0,98	85,70	Z1	101,11	85,90	Z2
10,00	9,81	86,00	Z1	90,52	85,80	Z2
20,00	19,65	85,80	Z1	79,97	85,50	Z2
40,00	39,45	85,90	Z1	59,63	82,90	Z1
60,00	59,54	86,00	Z1	39,38	85,90	Z1
80,00	80,51	85,80	Z2	19,68	85,90	Z1
90,00	90,87	85,90	Z2	9,82	85,90	Z1
99,00	100,01	86,00	Z2	0,98	86,10	Z1
Falta na LT Bauru-Assis						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	105,86	85,00	Z2	4,09	-111,80	Z4
5,00	122,50	82,60	Z2	19,81	-114,70	Z4
10,00	142,64	79,80	Z2	37,85	-117,20	Z4
Falta na LT IlhaSolteira-Três Irmãos						
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1			Impedância Lida- Relé 3		
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA
1,00	6,10	-85,30	Z4	110,88	86,00	Z2
5,00	29,99	-81,60	Z3	138,01	88,00	-
10,00	56,57	-77,10	Z3	176,29	91,30	-

4.4.5. Cenário 5 - Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Sem K0M

No Cenário 5 são aplicadas faltas nos locais indicados na Tabela 4.13 e a LT Ilha Solteira - Bauru permanece com o circuito 2 aberto e aterrado nas duas extremidades. Neste cenário o efeito da mútua é considerado, ou seja, a distância entre os circuitos 1 e 2 são os reais, e os relés de proteção não estão configurados com o Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero.

Na tabela são mostradas as leituras de impedâncias (módulo e ângulo) realizadas pelos relés e em qual zona de proteção da função 21N essa medição se encontra. Também são apresentados os erros (associados à influência da mútua de sequência zero) calculados em relação à medição realizada no cenário 4 (que desconsidera o efeito da mútua), os quais são também caracterizados como sendo erros de Subalcance (SUB) ou Sobrealcance (SOBRE).

Fica evidente, conforme destacado (em amarelo) na tabela, os casos de sobrealcance ocorridos durante os testes. Por exemplo, para curto-circuito ocorrido em 99% do circuito 1, o relé 1 identificou a falta em aproximadamente 77% da LT (77,5 Ohm). Outro exemplo, mais

crítico, aconteceu para um curto-circuito à 1% da LT Bauru-Assis. Conforme mostrado na Figura 4.15, o relé 1 identificou a falta externa como estando em aproximadamente 79% do seu circuito (79,66 Ohm).

Tabela 4.13 - Resultados – LT com Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Sem K0M

Com Mútua - Sem K0M										
Falta no circuito 1										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	1,01	85,30	Z1	SUB	2,54	91,25	85,50	Z2	SOBRE	-9,75
10,00	10,03	85,30	Z1	SUB	2,17	92,98	85,20	Z2	SUB	2,72
20,00	20,06	85,30	Z1	SUB	2,08	84,41	85,20	Z2	SUB	5,55
40,00	39,93	85,40	Z1	-	-	63,27	85,20	Z1	SUB	6,10
60,00	59,27	85,80	Z1	SOBRE	-0,46	41,95	85,10	Z1	SUB	6,55
80,00	76,10	86,50	Z2	SOBRE	-5,48	20,81	85,00	Z1	SUB	5,77
90,00	81,30	87,60	Z2	SOBRE	-10,54	10,37	85,10	Z1	SUB	5,59
99,00	77,50	89,60	Z2	SOBRE	-22,51	1,04	85,20	Z1	SUB	5,58
Falta na LT Bauru-Assis										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	79,66	89,80	Z2	SOBRE	-24,75	3,23	-98,40	Z4	SOBRE	-20,91
5,00	94,20	88,60	Z2	SOBRE	-23,10	15,70	-99,30	Z4	SOBRE	-20,75
10,00	112,05	87,50	Z2	SOBRE	-21,45	30,55	-100,70	Z4	SOBRE	-19,30
Falta na LT IlhaSolteira-Três Irmãos										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	5,46	-88,70	Z4	SOBRE	-10,38	94,12	86,30	Z2	SOBRE	-15,12
5,00	27,15	-86,80	Z3	SOBRE	-9,47	119,41	87,50	Z5	SOBRE	-13,48
10,00	52,96	-84,10	Z3	SOBRE	-6,37	152,52	89,20	-	SOBRE	-13,48

Esse fato destaca a importância de se considerar o efeito da mútua de sequência zero na definição do alcance da Zona 1 da função 21N em linhas paralelas. Essa consideração, apesar de gerar uma redução drástica do alcance da zona, como observado na memória de cálculo, garante que a atuação instantânea não se entenda além do fim da LT.

Observa-se que caso o ajuste típico de 80% (adotado em muitos estudos de proteção) fosse considerado na definição da Zona 1, o desempenho da proteção *stand-alone* realizada pelo relé 1 estaria comprometido, pois possibilitaria a atuação instantânea diante de uma falta externa. Pensando especificamente em Esquemas de Teleproteção, o esquema DUTT estaria comprometido, já que o mesmo utiliza o elemento de subalcance para transmitir um sinal de disparo para a outra extremidade da LT.

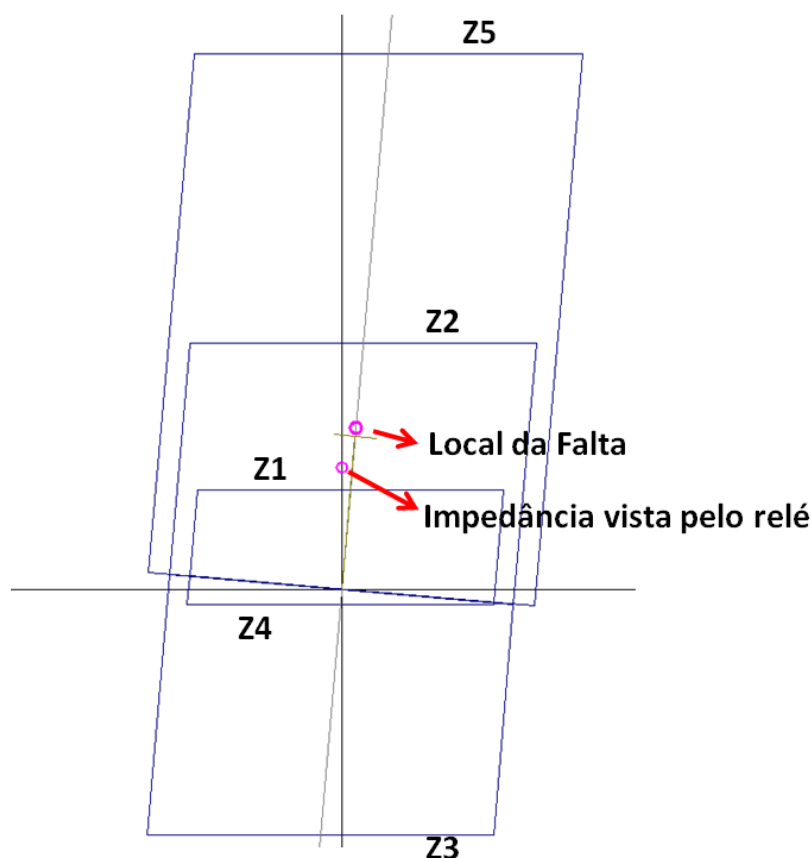


Figura 4.15 - Erro na Medição– Relé 1 – Cenário 5 (Falta em 1% da LT Bauru-Assis)

Baseado nessa hipótese e para exemplificação, um teste foi conduzido considerando que a Zona 1 do relé 1 foi parametrizado com 80% da impedância de sequência positiva da LT. Desta forma, constatou-se que para uma falta à 1% da LT Bauru-Assis, o relé 1 emitiu um *Trip* indevido através da função 21N (Zona 1) e enviou um sinal de disparo para a outra extremidade, conforme lógica do esquema DUTT.

4.4.6. Cenário 6 - Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Com K0M

No Cenário 6 são aplicadas faltas nos locais indicados na Tabela 4.14 e a LT Ilha Solteira - Bauru permanece com o circuito 2 aberto e aterrado nas duas extremidades. Neste cenário o efeito da mútua é também considerado, no entanto, os relés de proteção estão configurados com o Fator de Compensação de Mútua de Sequência Zero, conforme apresentado nas memórias de cálculo, e recebem a corrente de terra da linha paralela para realização dos cálculos.

Tabela 4.14 - Resultados – LT com Circuito Paralelo Aterrado - Com Mútua – Com K0M

Com Mútua - Com K0M										
Falta no circuito 1										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	1,00	85,40	Z1	SUB	1,72	103,79	85,50	Z2	SUB	2,65
10,00	10,02	85,40	Z1	SUB	2,08	94,70	85,20	Z2	SUB	4,62
20,00	20,10	85,30	Z1	SUB	2,26	83,50	85,30	Z2	SUB	4,42
40,00	40,44	85,20	Z1	-	-	61,53	85,40	Z1	SUB	3,19
60,00	61,28	85,00	Z1	SUB	2,92	40,44	85,30	Z1	SUB	2,70
80,00	82,65	85,00	Z2	SUB	2,65	20,02	85,40	Z1	SUB	1,76
90,00	93,73	85,00	Z2	SUB	3,15	9,99	85,40	Z1	SUB	1,70
99,00	102,82	85,40	Z2	SUB	2,81	0,97	85,60	Z1	SOBRE	-1,65
Falta na LT Bauru-Assis										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	109,14	85,20	Z2	SUB	3,10	3,57	-111,00	Z4	SOBRE	-12,70
5,00	125,56	82,70	Z2	SUB	2,50	18,74	-112,90	Z4	SOBRE	-5,43
10,00	147,55	80,20	Z2	SUB	3,44	35,85	-115,40	Z4	SOBRE	-5,30
Falta na LT IlhaSolteira-Três Irmãos										
Local (%)	Impedância Lida- Relé 1					Impedância Lida- Relé 3				
	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)	Mod. (Ohm)	Ang (°)	ZONA	Desc. do Erro	Erro (%)
1,00	6,25	-85,80	Z4	SUB	2,44	111,85	85,90	Z2	SUB	0,87
5,00	30,80	-82,40	Z3	SUB	2,72	144,05	88,30	-	SUB	4,38
10,00	59,75	-78,50	Z3	SUB	5,62	185,69	92,00	-	SUB	5,33

Na Tabela 4.14 são mostradas as leituras de impedâncias (módulo e ângulo) realizadas pelos relés e em qual zona de proteção da função 21N essa medição se encontra. Também são apresentados os erros calculados em relação à medição realizada no cenário 1 (que desconsidera o efeito da mútua), os quais são também caracterizados como sendo erros de Subalcance (SUB) ou Sobrealcance (SOBRE).

Os resultados demonstram o efeito da compensação de mútua sobre a medição de impedância dos relés. Observando os erros, nota-se que a compensação foi bastante eficaz e reduziu drasticamente os erros visualizados no cenário anterior (Cenário 5). Tendo em vista que o circuito paralelo está aterrado, o problema relacionado a faltas no circuito 2 e à “supercompensação” não é identificado nesse cenário. Desta maneira, pode-se concluir que o comportamento dos esquemas de Teleproteção não é afetado diante de tal cenário e se assemelhará ao que é observado em uma LT de circuito simples.

Nota-se também que o efeito da mútua na proteção *stand-alone* também é contornado pela compensação, principalmente observando que os casos de sobrealcance evidenciados no cenário anterior (que conduziram a redução da zona 1, conforme memória de cálculo) foram

eliminados de forma drástica. Este fato levanta a hipótese de que, mesmo o projetista optando por não utilizar o Fator de Compensação de Mútua nos casos em que a LT esteja em condição normal de operação (por conta da “supercompensação” passível de ocorrer), uma possível mudança de grupo de ajuste no relé ao identificar que o circuito paralelo está aberto e aterrado poderia levar ao uso da compensação. Isso geraria ganhos, pois a zona instantânea (Zona 1) não precisaria ser reduzida para todas as configurações possíveis da LT. Isso faz com que faltas em uma maior região da LT possam ser eliminadas em alta velocidade pela proteção *stand-alone*. Este fato não é mais explorado nesta dissertação em específico, mas trabalhos futuros podem ser direcionados nesse sentido.

4.4.7. Análise do *Transient Blocking*

Conforme introduzido no Capítulo 1, a abertura sequencial dos disjuntores de um dos circuitos da LT dupla para eliminação de uma falta interna pode ocasionar, por um rápido instante, inversão da direção da corrente de falta na linha paralela (sem defeito) e, conseqüentemente, provocar ativação ou desativação dos elementos de sobrealcance das funções de distância e direcional nos relés das suas respectivas extremidades. Isso pode ocasionar uma atuação incorreta dos Esquemas de Teleproteção que utilizam em sua lógica de disparo elementos de sobrealcance.

4.4.7.1. POTT e DCUB

Os esquemas POTT e DCUB, como já visto, apresentam similaridade em suas lógicas quando o canal de comunicação da Teleproteção está sob condições normais de operação, por isso a análise a seguir pode ser feita para os dois esquemas de forma conjunta.

Considere, por exemplo, que uma falta em certo ponto do circuito 2 da LT Ilha Solteira – Bauru, conforme ilustrado no caso (a) da Figura 4.16, ocasione a sensibilização dos elementos de sobrealcance do relé 1 e dos elementos reversos do relé 3. Tendo em vista que a falta é interna ao circuito 2, os relés 2 e 4 comandam o disparo dos seus respectivos disjuntores, os quais se abrem, conforme indicado no caso (c) da figura, eliminando o defeito. No entanto, pode-se analisar um ponto anterior a essa eliminação. Sendo a falta identificada na zona instantânea do relé 4, o mesmo gera um sinal de *Trip* de alta velocidade, sendo que o seu respectivo disjuntor se abre primeiro que o disjuntor do terminal remoto, conforme mostra o caso (b) da figura. Ainda nesse cenário, é possível perceber que os elementos de

sobrealcance do relé 1, que estavam ativos no caso (a), se dessensibilizaram, passando o relé a visualizar a falta como reversa. Além disso, os elementos reversos do relé 3, que estavam ativos no caso (a), também se dessensibilizaram, passando o relé a visualizar a falta no sentido direto através dos seus elementos de sobrealcance.

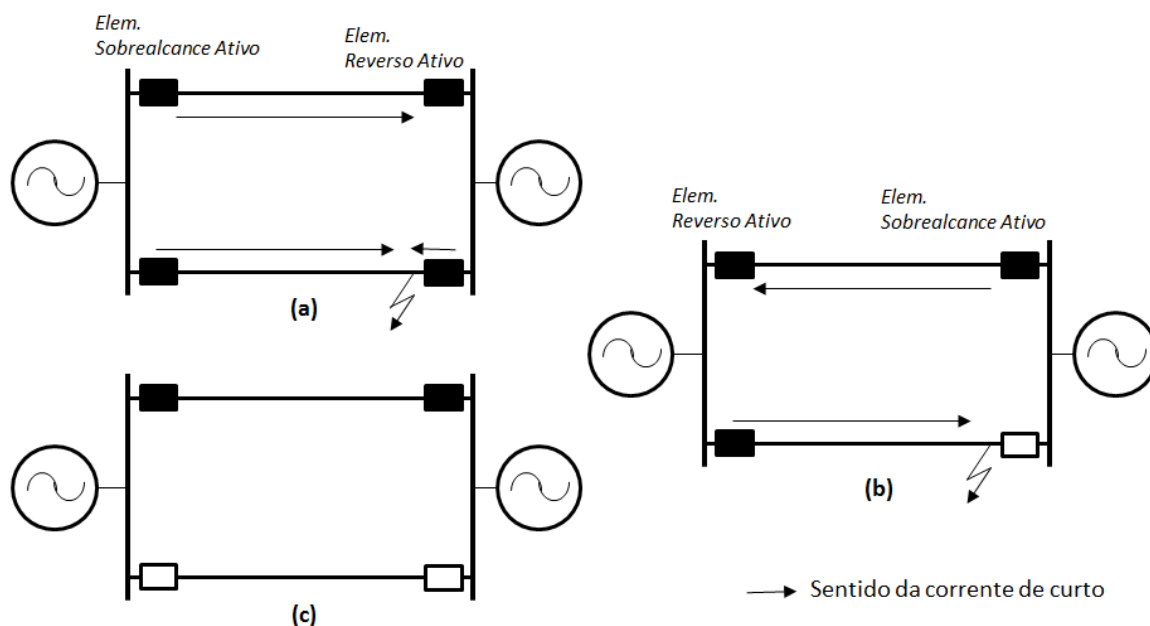


Figura 4.16 - Análise *Transient Blocking*.

A hipótese levantada acima é totalmente possível de ocorrer na prática, por isso, existe a preocupação de que os Esquemas de Teleproteção não sejam afetados por essa situação. Nota-se que caso o relé 3 (que estava com seus elementos reversos ativos no caso (a) da Figura 4.16 e recebendo o sinal permissivo da extremidade remota) ativar os seus elementos de sobrealcance ainda quando o sinal permissivo vindo da extremidade remota não cessou, os Esquemas POTT e DCUB irão atuar indevidamente para a falça externa, já que a condição de atuação dos esquemas é satisfeita. Considerando também que o relé 3, logo após seus elementos de sobrealcance serem ativados no caso (b), envie instantaneamente o sinal permissivo para a extremidade remota, é possível que o relé 1 receba o sinal permissivo antes que seus elementos de sobrealcance sofram o *dropout*, o que acarretaria também na atuação indevida dos esquema POTT e DCUB.

Fica evidente que os esquemas podem ser afetados diante de tais situações. Por isso, as lógicas desenvolvidas pelos fabricantes contemplam um temporizador para que ao serem dessensibilizados os elementos reversos aconteça a prorrogação tanto da emissão do

permissivo como da atuação dos esquemas mencionados, cabendo ao projetista o ajuste de tal parâmetro.

De forma a exemplificar tais situações, foi conduzido um teste com o esquema POTT para visualização da importância de tal lógica, chamada de *Transient Blocking*. A Tabela 4.15 apresenta a lista de eventos dos relés 1 e 3 geradas para uma falta a 99% do circuito 2.

Tabela 4.15 - Lista de eventos dos relés M1 – Lógica Transient Blocking

Esquema POTT			
Relé 1		Relé 3	
Hora	Evento	Hora	Evento
15:01:19.210	APLICAÇÃO DA FALTA	15:01:19.210	APLICAÇÃO DA FALTA
15:01:19.229	21N (Zona 5) PICK-UP A	15:01:19.224	67NIrev PICKUP
15:01:19.237	21N (Zona 2) PICK-UP A	15:01:19.224	21N (Zona 3) PICK-UP A
15:01:19.237	POTT TX	15:01:19.224	21N (Zona 4) PICK-UP A
15:01:19.239	67NT PICK-UP	15:01:19.247	POTT RX On
15:01:19.279	21N (Zona 2) DROPOUT A	15:01:19.283	21N (Zona 3) DROPOUT A
15:01:19.287	GND DIST Z5 DROPOUT A	15:01:19.283	21N (Zona 4) DROPOUT A
15:01:19.297	21N (Zona 3) PICK-UP A	15:01:19.297	67NT PICK-UP
15:01:19.297	GND DIST Z4 PICK-UP A	15:01:19.310	67NI PICKUP
15:01:19.316	GND DIST Z4 DROPOUT A	15:01:19.310	POTT TX
15:01:19.320	21N (Zona 3) DROPOUT A	15:01:19.310	POTT TRIP 3P
15:01:19.320	POTT RX On	15:01:19.310	POTT OPERAÇÃO
15:01:19.322	67NT DROPOUT	15:01:19.310	TRIP OPERAÇÃO
15:01:19.356	POTT RX Off	15:01:19.310	POTT RX Off

Observa-se que os elementos reversos do relé 3 (67NIrev, 21N - Zona 3 e 4) e o elemento de sobrealcance do relé 2 (21N - Zona 2) foram sensibilizados com a aplicação da falta externa. Diante disso o relé 1 emitiu um sinal permissivo para o relé 3. Como a falta está próxima ao terminal do relé 4 no circuito 2, foi forçado no RTDS a abertura do respectivo disjuntor (essa abertura considerou um *Trip* ocorrendo após 12 ms da falta e um tempo de abertura de 70 ms). Após essa abertura, nota-se que no relé 3 houve a dessensibilização dos elementos reversos (instante 15:01:19.283) e após 27 ms houve a partida do elemento de sobrealcance (67NI). Neste instante (15:01:19.310), como o sinal permissivo vindo da outra extremidade ainda não havia sido cessado, houve a atuação indevida do esquema POTT. Para esse teste, o relé 2 do circuito 2 emitiu um sinal de *Trip* 40 ms após a falta e foi ajustado um tempo de 30 ms para o *dropout* do sinal permissivo.

A situação mencionada acima evidência a importância da parametrização do *Transient Blocking*. Após o *dropout* dos elementos reversos no relé 3, se a lógica tivesse sido utilizada

com uma temporização típica de 90 ms, o bloqueio do esquema estaria ativo no momento da sensibilização do elemento de sobrealcançe e não haveria atuação incorreta.

Observe também que, após 27 ms da desativação dos elementos reversos no relé 3, houve a ativação dos elementos de sobrealcançe e conseqüentemente o envio do sinal permissivo para o relé 1. Nota-se que no momento do recebimento desse sinal, o elemento de sobrealcançe no relé 1 já havia sido dessensibilizado. Caso isso não tivesse ocorrido, havia disparo indevido também nesse terminal. Por isso a logica *Transient Blocking* também bloqueia, por certo instante (configurável), o envio do permissivo após o *dropout* dos elementos reversos, isso para que tal risco possa ser eliminado.

4.4.7.2. DCB

Ainda observando as informações da Tabela 4.15 é possível notar que o *dropout* dos elementos reversos do relé 3 ocorreu depois do *dropout* dos elementos de sobrealcançe do relé 1 (4 ms depois). Este fato é extremamente necessário quando está sendo utilizado o esquema DCB. Imaginando que tal esquema estivesse sendo utilizado no teste acima e que a situação supracitada não tivesse ocorrido, ou seja, imaginando que o *dropout* dos elementos reversos no relé 3 tivesse ocorrido antes (o que é possível de ocorrer em outras situações práticas), o sinal de Bloqueio que estava sendo enviado pelo esquema (enviado pelos elementos reversos) teria cessado antes do *dropout* dos elementos de sobrealcançe do relé 1, dando condição favorável para a atuação indevida do esquema e abertura do terminal.

Por isso, as lógicas desenvolvidas pelos fabricantes contemplam um temporizador para que ao serem dessensibilizados os elementos reversos aconteça a prorrogação ou extensão do sinal de Bloqueio, cabendo ao projetista o ajuste de tal parâmetro.

4.5. Considerações Finais

Esse Capítulo apresentou os procedimentos necessários e utilizados para que um sistema real fosse modelado no simulador em tempo real. Fazendo uso de um *software* bastante utilizado por profissionais da área, também foi proposto um estudo de proteção da LT sob análise, o qual gerou os ajustes a serem parametrizados nos relés. Mediante a implementação de uma estrutura de Esquemas de Teleproteção baseada na IEC 61850-90-1 foram propostos testes que possibilitaram a visualização do efeito da mútua de seqüência zero sobre a medição de impedância dos relés e, conseqüentemente, sobre os esquemas.

Foram identificados erros de sobrealcance e subalcance que podem comprometer o desempenho dos esquemas caso a mútua seja desconsiderada do estudo de proteção. Na análise realizada sobre a utilização do fator clássico de compensação de mútua perante o cenário onde o circuito paralelo está aberto e aterrado, notou-se a correção de erros que, no momento da definição dos ajustes, causaram a redução da zona instantânea da função 21N. Este fato observado é interessante e é sugerida a continuação da análise em trabalhos futuros. Também, a verificação da possibilidade de ocorrência de atuação incorreta dos esquemas de Teleproteção diante de reversão de corrente em circuitos paralelos permitiram, através de testes, a visualização da importância da lógica de *Transient Blocking*.

Desta maneira, as análises dessa dissertação são encerradas e no próximo capítulo são agrupadas as principais conclusões e sugeridos trabalhos futuros para que o tema proposto seja ainda mais explorado.

5. Conclusões e Recomendações

O grande impacto do uso dos Esquemas de Teleproteção na melhora do desempenho da proteção foi verificado nessa dissertação. Diante dos testes com o sistema composto por LTs de circuito simples, notou-se que comandos de *Trip* de 204 a 353 ms puderam ser substituídos por comandos de alta velocidade de até 28 ms após as faltas internas simuladas.

Observou-se que a escolha do esquema pode influenciar o tempo de eliminação do defeito na LT. Os esquemas DCUB e POTT tenderam a ser os esquemas mais rápidos, enquanto o DCB tendeu a ser o esquema com maior tempo de operação. Também se notou que o tempo de transferência do sinal da Teleproteção e o tempo de atuação das funções de proteção entre os relés utilizados apresentaram diferenças que também influenciaram o tempo de atuação dos esquemas.

O cenário de disjuntor local aberto e falha interna evidenciou a falta de confiabilidade dos esquemas PUTT e DUTT (não atuaram para uma falha interna próxima ao terminal aberto), enquanto o desempenho dos demais esquemas não foi comprometido. Diante do cenário com canal de comunicação inoperante, os esquemas PUTT, DUTT, POTT e DCUB demonstraram falta de confiabilidade e maior segurança (não atuaram diante de faltas interna e externa), diferentemente do esquema DCB que apresentou maior confiabilidade e falta de segurança (atuou diante de faltas interna e externa). A escolha do esquema a ser utilizado

dependerá das características do sistema de potência, da operação proposta e das características do Sistema de Telecomunicações, o que influenciará a escolha por maior velocidade e maior segurança ou por maior velocidade e maior confiabilidade. Também vale ressaltar a importância de se considerar os requisitos e recomendações do ONS para os sistemas de Teleproteção.

Utilizando um dos mecanismos apresentados na IEC 61850-90-1 para a comunicação entre subestações, também foi proposta a substituição da estrutura convencional dos Esquemas de Teleproteção por uma estrutura baseada na troca de mensagens GOOSE. Observaram-se ganhos significativos, principalmente a diminuição de até 13 ms no tempo de transferência do sinal e no tempo de operação dos esquemas. No caso de LTs, o aumento da velocidade da proteção ajuda a manter a estabilidade do sistema, além de aumentar a capacidade de transferência de potência e a segurança, reduzindo inclusive o risco de danos aos equipamentos.

Além das análises em circuito simples, que possibilitaram verificar as vantagens e desvantagens de cada esquema, análises em um sistema composto por uma LT de circuito duplo foram propostas. Diante do cenário onde os dois circuitos da LT estavam em operação e o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero foi considerado, observou-se que a leitura de impedância dos relés de proteção foi afetada, causando erros significativos de subalcance de até 30,63%. Esse fato possibilitou a visualização da importância de se considerar o efeito da mútua em estudos de proteção e de utilizar *softwares* de cálculos de curto-circuito que modelam corretamente esse efeito, principalmente após a realização de testes que comprovaram a influência de tais erros na atuação dos Esquemas de Teleproteção.

Diante da mesma condição operativa acima, também foi verificado o comportamento dos relés considerando a parametrização do fator clássico de compensação de mútua. Apesar das correções dos erros diante de faltas internas, foram observados erros consideráveis de sobrealcance causados pela compensação para faltas no circuito paralelo. Apesar de não serem identificadas atuações indevidas dos relés, gerou-se dúvidas se a metodologia utilizada pelo fabricante é eficaz em todas as configurações operativas possíveis da LT.

O cenário onde o circuito paralelo estava aberto e aterrado nas duas extremidades também foi considerado nas análises. Erros devido ao acoplamento mútuo chegaram a 24% de sobrealcance. Diante disso um teste foi conduzido e constatou que se o efeito da mútua não tivesse sido considerado na definição dos ajustes de proteção, tanto a proteção *stand-alone* da LT como esquema DUTT seriam afetados. Para esse cenário, identificou-se a eficácia da utilização do Fator de Compensação, gerando a hipótese de que o mesmo poderia ser utilizado

para evitar a necessidade de redução do ajuste da zona instantânea da função de distância devido ao acoplamento mútuo. Além disso, testes também possibilitaram a visualização da importância da parametrização relacionada à lógica *Transient Blocking* perante LTs de circuito duplo, permitindo também, mais uma vez, identificar o quão benéfico é a utilização de um simulador em tempo real em análises de proteção.

5.1. Publicação associada

Como publicação associada ao desenvolvimento desta dissertação de mestrado tem-se:

- O artigo intitulado “*Practical Analysis of Teleprotection Schemes based on IEC 61850-90-1 using Real-Time Simulation*”, publicado em IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference 2019 - Latin America (ISGT Latin America). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8895498>>

5.2. Recomendações de Trabalhos Futuros

Visando dar continuidade à pesquisa relacionada com o desenvolvimento dessa dissertação, indicam-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Implementar uma estrutura de teste com Esquemas de Teleproteção utilizando o primeiro mecanismo de comunicação trazido pela norma IEC 61850-90-1, que se baseia no método do tunelamento, propondo a utilização de *switches* e *softwares* de simulação de canal de comunicação;
- Verificar a eficácia de outros métodos de compensação de mútua de sequência zero propostos por fabricantes de relés;
- Continuar a avaliação dos efeitos do acoplamento mútuo sobre a proteção de distância e sobre Esquemas de Teleproteção, considerando mais configurações operativas de LTs de circuito duplo, como, por exemplo, as mostradas nas Figuras 2.13a e 2.13b;
- Continuar a análise da eficácia do fator clássico de compensação de mútua (que utiliza a corrente do circuito paralelo para a compensação), verificar todos os possíveis casos de “supercompensação” em outras configurações operativas da LT dupla e, consequentemente, analisar a possibilidade de ocorrência de disparos indevidos;
- Verificar se a utilização de grupos de ajustes dos relés para chavear automaticamente a utilização do fator de compensação (dependendo da configuração operativa da LT

dupla) seria eficaz para evitar a redução da zona instantânea da função de distância em estudos de proteção;

- Além disso, também sugere-se aplicar e avaliar os princípios da proteção de LT baseada em ondas viajantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cigré SC34 WG 34-35.11. “**Protection using telecommunications**”, TB 13, Dezembro, 2000.

Eastvedt, R. B. “**The Need for Ultra-Fast Fault Clearing**”. Proceedings of the Third Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA. Outubro, 1976.

Guerrero, C. A. V. “**Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplicando o padrão IEC 61850**”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

Guerrero, C. A. V.; Silveira, P. M. “**Uso do RTDS em Testes de Esquemas de Teleproteção Aplicando o Padrão IEC61850**”. Anais do PAC World, 2012.

Guimarães, J. M. C. “**Investigação de esquemas de proteção para linhas de transmissão em EAT com circuitos duplos e com compensação série-fixa**”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

Hu, Y.; Novosel, D.; Saha, M. M. *et al.* “**An adaptive scheme for parallel-line distance protection**”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 1. Janeiro, 2002.

International Electrotechnical Commission – IEC, “**Part 90-1: Use of IEC 61850 for the Communication Between Substation**”, IEC Standard 61850-90-1 – 2010/03.

International Electrotechnical Commission – IEC, “**Communication networks and systems in substations - Part 1: Introduction and overview**”, IEC Standard 61850-1, 2003.

International Electrotechnical Commission – IEC, “**Teleprotection equipment of power systems – Performance and testing**”, IEC Standard 60834-1 – 1999.

Junior, P. S. P.; Bernardino, R. C.; Salge, G. S.; Davi, M. J. B. B.; Martins, C. M. *et al.* “**Avaliação da performance de uma proteção de linha implementada com barramento de processo (IEC 61850-9-2) através de ensaios em malha fechada**”. XIV STPC, 2018.

Konishi, T. “**Comportamento dos relés de distância em linha de circuito duplo**”. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. São Paulo, 1972.

Maezono, P. K. “**Proteção de sistemas elétricos – Proteção de linhas de transmissão**”. Virtus Consultoria e Serviços LTDA, São Paulo, 2006.

Mascher, L. J. D. “**Análise do desempenho de algoritmos de proteção de distância frente à faltas monofásicas – Abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa**”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

Merighi, G. C.; Albuquerque, F. F.; Abboud, R. “**Experiência da Enersul na transmissão de mensagens GOOSE entre subestações para teleproteção com base na norma IEC 61850-90-1**”. XXI SENDI, 2014.

Oliveira, C. H. R.; Bower, A. P. “**Comunicação de mensagens GOOSE na WAN entre roteadores de subestações para teleproteção de linhas de transmissão e dispositivos elétricos proporcionando convergência de serviços**”. CIGRÉ-Brazil, X SIMPASE, 2013.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. “**Plano de ampliações e reforços nas instalações de transmissão do SIN**”. PAR 2017-2019, 2017.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. “**Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção**”. Procedimentos de Rede, Submódulo 2.6, Revisão 2016.12.

Ordacgi, J. M. “**Proteção de linhas de transmissão: Teleproteção**”. Monografia, CEPSE 2010, Universidade Federal de Itajubá, 2010.

Pillay, K. R.; Rigby, B. S. “**Studying the impact of mutual coupling on distance protection relays using a real-time simulator**”. IEEE Africon - The Falls Resort and Conference Centre, Livingstone, Zambia. Setembro, 2011.

Reis, J. L.; Ristow, R. G. S.; Fabris, G. B. A. “**Abordagem diferenciada da influência de paralelismos de linhas de transmissão na proteção de distância**”. XVII IRIAC, Cigré. Paraguay, 2017.

Santos, V. A. “**Proteção de distância aplicada a linhas de transmissão em circuito duplo**”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Sylvestre, M. H.; Machado, J. R. S.; Vicente, D. T. **“Aplicação da norma IEC 61850-90-1 “Comunicação entre subestações” para teleproteção via GOOSE em linha de transmissão da rede básica da CTEEP de 230 kV”**. CIGRÉ-Brazil, XVII ERIAC, 2017.

Ziegler, G. **“Numerical distance protection. Principles and applications”**. 3ª Ed., 2006.

APÊNDICE A

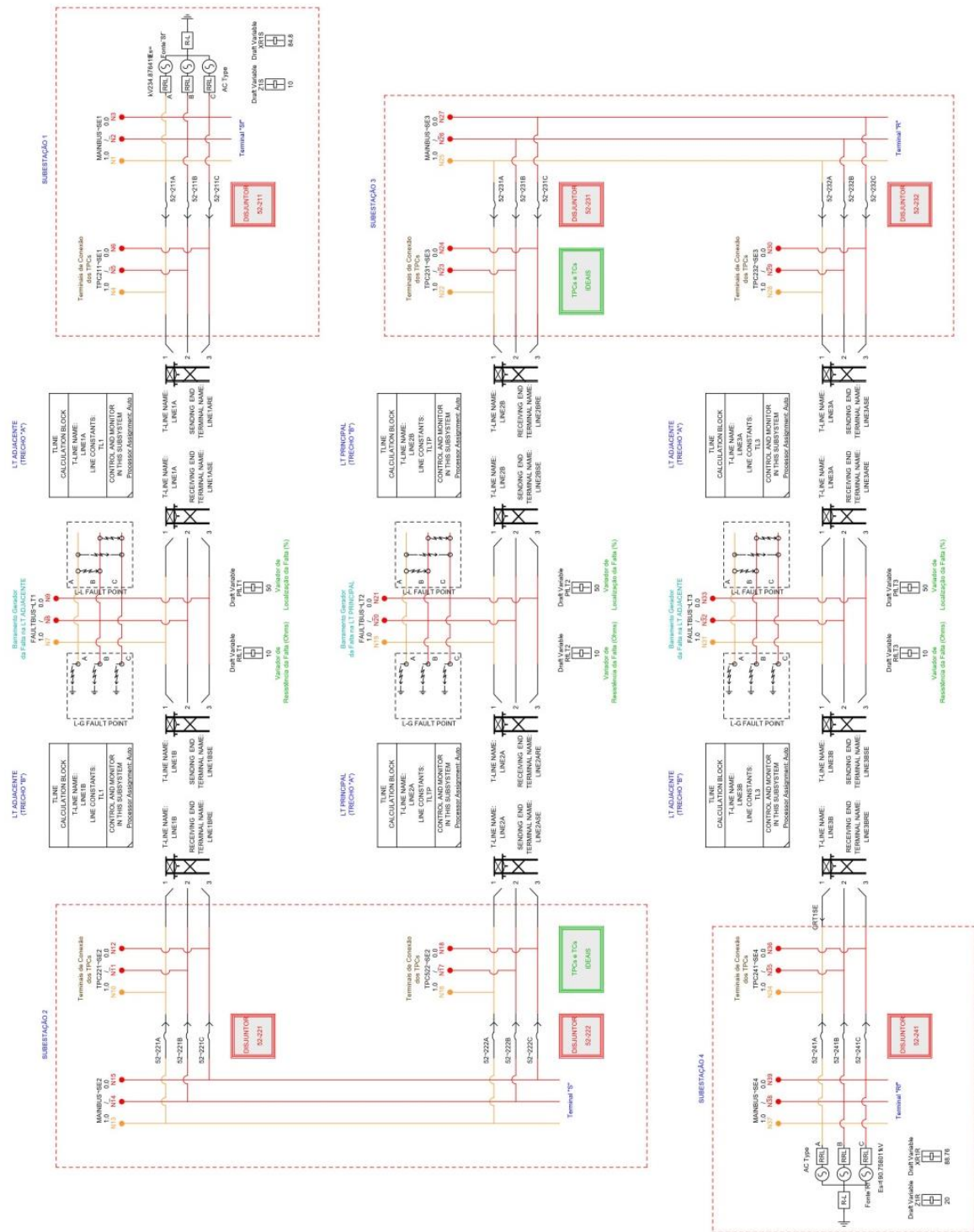


Figura A.1 - Sistema de Potência no Draft do RTDS – LT de Circuito Simples.

APÊNDICE B

Com o intuito de modelar o Sistema de Teleproteção dos esquemas no RTDS, foram modelados no módulo *Draft* do RSCAD dois tipos de circuitos de controle que permitem representar o tempo gasto na transmissão do sinal da Teleproteção (Disparo, permissivo ou bloqueio). Um destes circuitos é utilizado nos testes com interface convencional e outro nos testes com interface via mensagens GOOSE, conforme itens abaixo:

- **Apêndice B.1 - Circuito de Teleproteção para Interface Convencional – DCB**

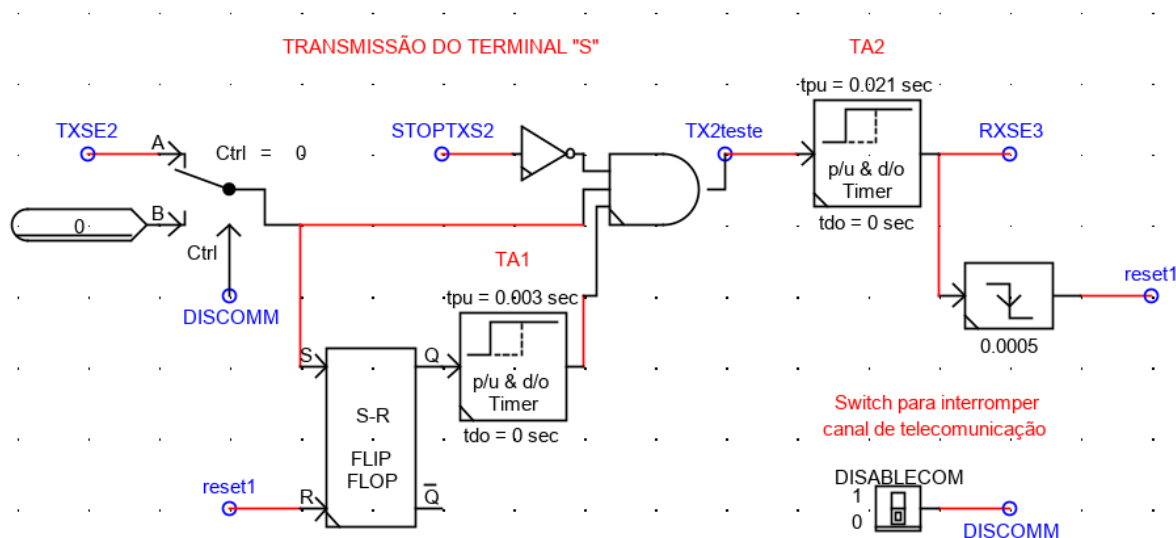


Figura B.1.1 - Circuito de Transmissão - DCB - Interface Convencional.

O funcionamento desse circuito de controle é explicado com a sequência a seguir:

- A variável de entrada “TXSE2” é ativada quando o relé do terminal transmissor envia o comando de partida da transmissão do sinal da Teleproteção ao RTDS.
- Aguarda-se um tempo (temporizador TA1) para compensar o *debounce* do contato de saída do relé.
- Depois de concluído o tempo de *debounce*, inicia-se a contagem do segundo temporizador (TA2) que completa o tempo total da Teleproteção, conforme apresentado na seção 3.2.1;

- Terminada essa última temporização, a variável “RXSE3” é ativada e um comando de confirmação (RX) é enviado ao relé do terminal receptor. Este comando indica ao relé a chegada do sinal da Teleproteção.

Outras variáveis de interesse aparecem no circuito da Figura B.1.1. A variável “DISCOMM” permite simular a perda do canal de telecomunicação durante os testes e a variável “STOPTXS2” está associada especificamente com a lógica DCB, ou seja, representa o comando de parada da transmissão do sinal de bloqueio enviado pelo próprio relé do terminal transmissor após identificar que a falta tem sentido direto (à frente).

A Figura B.1.1 apresenta apenas o circuito que está relacionado à transmissão do sinal do Terminal S para o Terminal R, no entanto, a transmissão do Terminal R para o Terminal S ocorre da mesma forma.

- **Apêndice B.2 - Circuito de Teleproteção para Interface Convencional – POTT, PUTT e DUTT**

O circuito de controle relacionado aos esquemas POTT, PUTT e DUTT (Estrutura Convencional), mostrado na Figura B.2.1, é similar ao mostrado acima para o esquema DCB, com a exceção de que não existe a variável “STOPTXS2”, que é exclusiva do circuito do DCB.

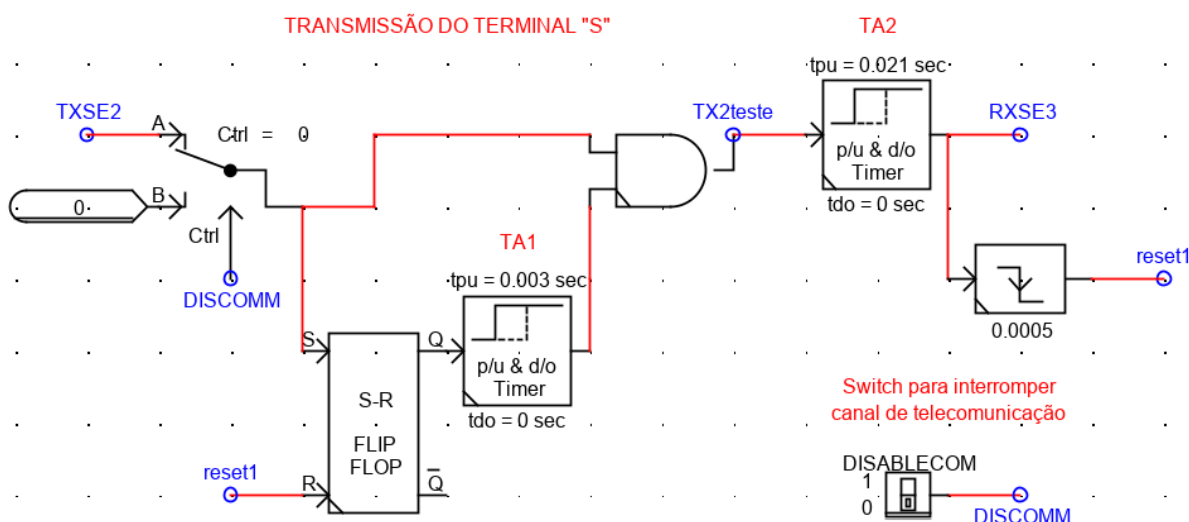


Figura B.2.1 - Circuito de Transmissão - POTT, PUTT e DUTT - Interface Convencional.

• Apêndice B.3 - Circuito de Teleproteção para Interface Convencional – DCUB

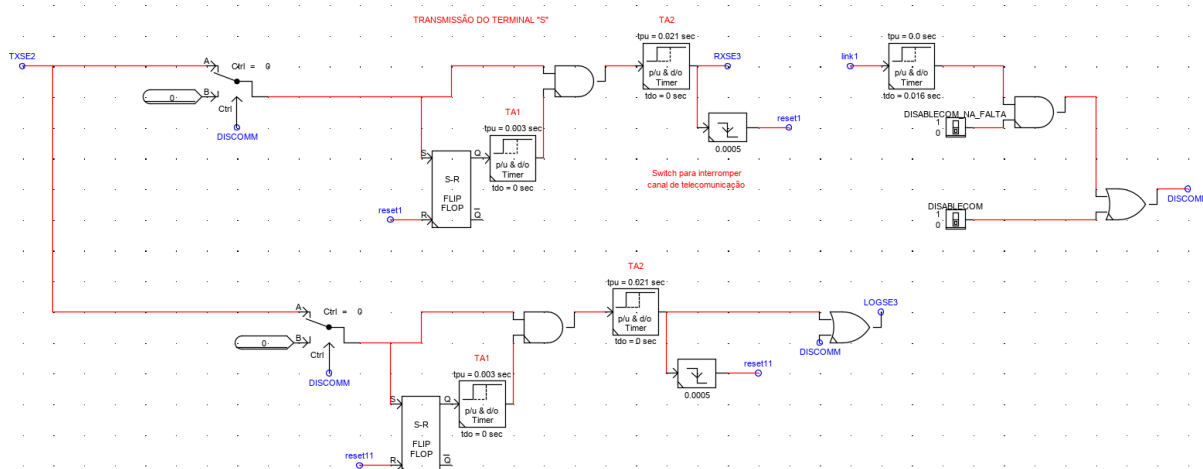


Figura B.3.1 - Circuito de Transmissão - DCUB - Interface Convencional.

O circuito de controle relacionado ao esquema DCUB (Estrutura Convencional), mostrado na Figura B.3.1, é também similar ao mostrado para o esquema DCB. No entanto, também não possui a variável “STOPTXS2”, que é exclusiva do circuito do DCB, e acrescenta, em paralelo ao circuito de transmissão do sinal da Teleproteção, um circuito idêntico para transmissão do sinal relacionado à perda de GUARDA (“LOGSE3”). É possível observar que na situação normal (ausência de transmissão de sinal permissivo), o relé não recebe nenhuma informação de entrada, ou seja, não há sinal permissivo (“RXSE3”) e nem sinal “LOGSE3”. Quando o sinal permissivo é transmitido, o relé receptor recebe (após o tempo de transmissão) a informação relacionada à perda de GUARDA e o sinal permissivo. O caso de “perda de GUARDA” e ausência simultânea de sinal permissivo é obtido quando a variável “DISCOMM” é ativada (nota-se que a porta lógica “OU” antes da variável “LOGSE3” recebe a variável “DISCOMM”), representando a situação de perda de canal de comunicação.

Foi acrescentada também a lógica que possibilita a perda do canal durante a ocorrência da falta. Sendo ativada a chave “DISABLECOM_NA_FALTA”, no instante da aplicação da falta, representado pela variável “link1”, ocorre a ativação da variável “DISCOMM”.

• **Apêndice B.4 - Circuitos de Teleproteção para Interface via Mensagens GOOSE**
GOOSE

Os circuitos de controle relacionados aos Esquemas de Teleproteção que consideram a interface via mensagens GOOSE são parecidos com os circuitos apresentados acima, no entanto, não consideram o tempo de compensação de *debounce*, conforme mencionado na seção 3.2.1.

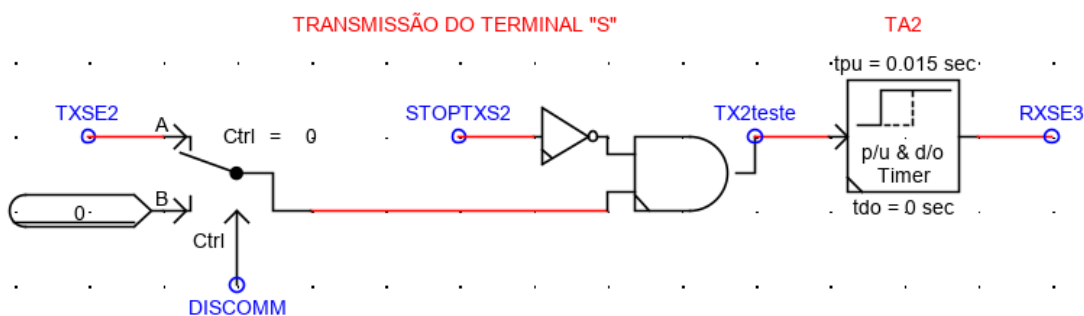


Figura B.4.1 - Circuito de Transmissão – DCB - Interface via GOOSE

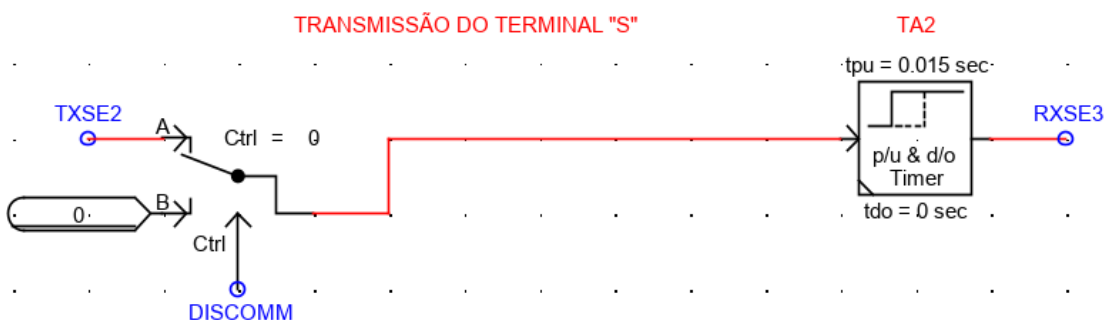


Figura B.4.2 - Circuito de Transmissão – POTT, PUTT e DCUB - Interface via GOOSE

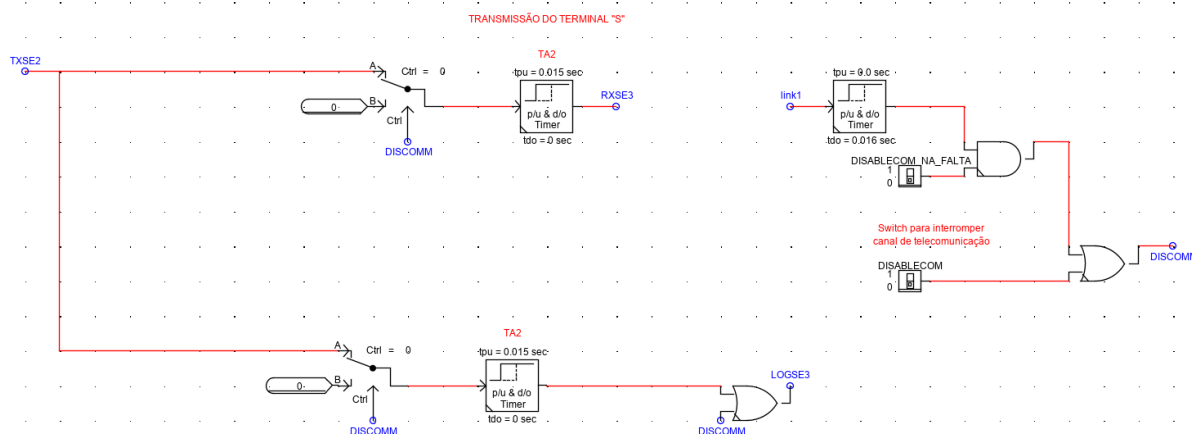


Figura B.4.3 - Circuito de Transmissão - DCUB - Interface via GOOSE

Os circuitos acima são utilizados tanto na análise com LT de circuito simples quanto na análise com a LT de circuito duplo. Os temporizados são ajustados conforme tempos totais da Teleproteção, apresentados nas seções 3.2.1 e 4.2.1, respectivamente.