

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 899

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MODOS TÍPICOS DE POLARIZAÇÃO DO RELÉ
DE DISTÂNCIA MHO NO COMPORTAMENTO DE SUA CARACTERÍSTICA DE
OPERAÇÃO DURANTE CONDIÇÕES DE FALTAS CLÁSSICAS NO SISTEMA
ELÉTRICO**

ALEXANDRE SALES BRAZ

DATA DA DEFESA: 13/11/2015

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MODOS TÍPICOS DE
POLARIZAÇÃO DO RELÉ DE DISTÂNCIA MHO NO
COMPORTAMENTO DE SUA CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO
DURANTE CONDIÇÕES DE FALTAS CLÁSSICAS NO SISTEMA
ELÉTRICO**

ALEXANDRE SALES BRAZ

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Clever Sebastião Pereira Filho

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2015

B827a

Braz, Alexandre Sales.

Análise da influência dos modos típicos de polarização do relé de distância MHO no comportamento de sua característica de operação durante condições de faltas clássicas no sistema elétrico [manuscrito] / Alexandre Sales Braz. - 2015.

xiv, 138 f., enc.: il.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 136-138.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Relés elétricos - Teses. 3. Relés de proteção - Teses. I. Pereira Filho, Clever Sebastião. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

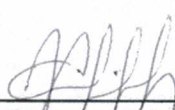
**"Análise da Influência dos Modos Típicos de Polarização
do Relé de Distância Mho no Comportamento de sua
Característica de Operação Durante Condições de Faltas
Clássicas no Sistema Elétrico"**

ALEXANDRE SALES BRAZ

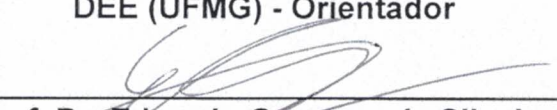
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 13 de novembro de 2015.

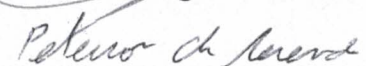
Por:



Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira
Departamento de Engenharia Elétrica (CEFET/MG)



Prof. Dr. Peterson de Resende
DELT (UFMG)

**"Análise da Influência dos Modos Típicos de Polarização
do Relé de Distância Mho no Comportamento de sua
Característica de Operação Durante Condições de Faltas
Clássicas no Sistema Elétrico"**

ALEXANDRE SALES BRAZ

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 13 de novembro de 2015.

Convidado Especial:



Engenheiro MSc Izonel Henriques Pereira Junior (convidado)
Proteção (Cemig Distribuição)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, com atenção especial à minha esposa Luciana, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Agradeço ao amigo Júlio César Marques de Lima, coordenador da equipe de proteção de sistemas elétricos da Cemig Distribuição, por me incluir no Projeto de P&D CEMIG/ANEEL - “Desenvolvimento de ferramenta computacional para simulação do comportamento dinâmico de relés de duas ou mais grandezas”, em parceria com a UFMG. Isso me incentivou a estudar o assunto de polarização de relés direcionais.

Agradeço ao Professor Clever Sebastião Pereira Filho, representante da UFMG na parceria acima mencionada. Obrigado pela confiança em mim depositada, pela orientação neste trabalho e pela farta transferência de conhecimento em toda nossa convivência.

Agradeço ao Engenheiro Jorge Miguel Ordacgi Filho, autor de um brilhante estudo de análise relés de distância, que foi o ponto de partida para a criação do projeto de pesquisa e desenvolvimento já citado. Seus estudos nortearam esta dissertação de mestrado.

Agradeço ao amigo Izonel Henriques Pereira Júnior, engenheiro de proteção da Cemig Distribuição, por toda a ajuda na implementação computacional do relé Mho polarizado. Divido com você o sucesso neste trabalho!

Agradeço a todos que, de uma maneira ou outra, ajudaram em minha formação profissional, dando-me condições para empreender o esforço necessário para a conclusão deste estudo.

Finalizo agradecendo a DEUS, por me proporcionar mais uma vez a magnífica oportunidade de estudar.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar a estudantes e profissionais da área de proteção de sistemas elétricos de potência alguns dos impactos que os modos típicos de polarização utilizados pelos relés de distância tipo Mho promovem em suas características de operação. A característica de operação do relé Mho não é sempre estática e ela varia sensivelmente com o local da falta, com o tipo da falta, com as características do sistema elétrico e com o tipo de polarização utilizada. A necessidade de definição da direção da falta é o principal foco deste estudo. Num sistema elétrico “malhado”, conectado em anel com diversas fontes distintas, definir a direção do curto-circuito em relação ao objeto protetor, isto é, o relé de proteção, é fator preponderante para se poder desligar a menor porção possível do sistema elétrico e isolar o defeito. Por isso este estudo apresenta a importância da definição direcional para o relé de proteção, as formas tradicionais de se proporcionar ao relé o comportamento direcional, os modos típicos de polarização normalmente utilizados pelo relé de distância tipo Mho, além de apresentar graficamente e matematicamente suas características de operação. Os assuntos abordados são apenas uma pequena introdução ao estudo do relé Mho polarizado. Vários temas que impactam no comportamento da característica de operação do relé Mho polarizado, como o carregamento pré-falta, linhas magneticamente acopladas, condições dinâmicas de carga, efeito da componente DC, a influência da impedância da fonte atrás do relé, efeito da variação da frequência e vários outros não puderam ser aqui analisados. Portanto ainda há um imenso campo de estudos relacionados aos relés de distância tipo Mho, sem esquecer que os relés poligonais também oferecem campo idêntico. Além disso, a análise comparativa do comportamento entre as características Mho e poligonal é algo extremamente importante e interessante, permitindo avaliar os prós e os contras de cada uma. Além de todos esses temas, estudos de novas formas de polarização de relés de distância são extremamente interessantes e merecem trabalhos que entrem em escopo mais avançado.

ABSTRACT

This paper has the purpose of presenting to students and specialists on power system protection some effects of typical polarization methods on Mho characteristic of distance relays. The operational characteristic of the polarized Mho relay is not always static, varying according to fault location, type of fault, power system characteristics and polarization method. The need for determination the direction of fault is the main target of this work. The direction of short circuit currents regarding the protection relay, in network power systems with several sources connected, is very important for tripping the smaller portion of the system, necessary for segregate the defect. Therefore this work shows the importance of directional definition for the protective relay, the usual polarization types used by Mho distance relays and their graphic and mathematic operational characteristics. The topics addressed are merely a little introduction to the study of the Mho polarized relay. Some issues which have no impact on the behavior of the Mho relay operational characteristic are not analyzed, like pre-fault conditions, magnetic coupled transmission lines, dynamic load conditions, DC component effect, influence of the source impedance behind the relay, frequency variation effect and others. Thus there is a wide range for investigations related to Mho type distance relays, not to be forgotten that the polygonal relays are equally an open field. The comparative analysis of Mho and polygonal characteristics behavior is some extremely important and interesting, once allows assessing pros and cons of each one. These topics, besides researches on new distance relays polarization methods are fitted to advanced scopes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	A IMPORTÂNCIA DA DIRECIONALIDADE	5
2.1	O Comparador de Fases Tipo Cosseno.....	8
2.2	O Plano de Impedâncias, ou Plano Z.....	10
3	COMPONENTES DE FASE (TENSÕES E CORRENTES) SOB FALTAS CLÁSSICAS.....	12
3.1	Curto-circuito Trifásico (ABCT) na LT	13
3.2	Curto-circuito Bifásico (BC) na LT	15
3.3	Curto-circuito Monofásico (AT) na LT	17
3.4	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT) na LT	19
3.5	Curto-circuito Trifásico Reverso (ABCT).....	21
4	O EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DO RELÉ MHO TIPICAMENTE POLARIZADO	23
4.1	Autopolarização	24
4.1.1	- Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente	25
4.1.1.1	Loop AB Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	25
4.1.1.2	Loop BC Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	25
4.1.1.3	Loop CA Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	25
4.1.1.4	Loop AT Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	26
4.1.1.5	Loop BT Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT).....	26
4.1.1.6	Loop CT Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT).....	26
4.1.2	- Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente	27
4.1.2.1	Loop AB Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	27
4.1.2.2	Loop BC Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	27
4.1.2.3	Loop CA Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	27
4.1.2.4	Loop AT Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	28
4.1.2.5	Loop BT Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	28
4.1.2.6	Loop CT Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	28
4.1.3	- Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente	29
4.1.3.1	Loop AB Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	29
4.1.3.2	Loop BC Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	29
4.1.3.3	Loop CA Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	29
4.1.3.4	Loop AT Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	30
4.1.3.5	Loop BT Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	30

4.1.3.6	Loop CT Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	31
4.1.4	- Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)	31
4.1.4.1	Loop AB Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	31
4.1.4.2	Loop BC Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	32
4.1.4.3	Loop CA Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	32
4.1.5	- Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa.....	32
4.1.5.1	Loop AB Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	32
4.1.5.2	Loop BC Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	33
4.1.5.3	Loop CA Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	33
4.1.5.4	Loop AT Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	33
4.1.5.5	Loop BT Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	34
4.1.5.6	Loop CT Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	34
4.2	Polarização Singela Por Tensão de Quadratura.....	35
4.2.1	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT).....	36
4.2.1.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	36
4.2.1.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	36
4.2.1.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	36
4.2.1.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	37
4.2.1.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	37
4.2.1.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	37
4.2.2	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	38
4.2.2.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	38
4.2.2.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	38
4.2.2.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	39
4.2.2.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	39
4.2.2.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	39
4.2.2.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	40
4.2.3	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	40
4.2.3.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	40
4.2.3.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	41
4.2.3.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	41
4.2.3.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	42
4.2.3.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	42
4.2.3.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	43
4.2.4	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	44
4.2.4.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	44
4.2.4.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	44
4.2.4.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	44
4.2.5	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	45
4.2.5.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	45
4.2.5.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	45
4.2.5.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	46
4.2.5.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	46
4.2.5.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	46
4.2.5.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	47
4.3	Polarização Singela Por Tensão de Memória	48
4.3.1	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	50
4.3.1.1	Loop AB Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	50
4.3.1.2	Loop BC Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	50
4.3.1.3	Loop CA Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	50

4.3.1.4	Loop AT Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	51
4.3.1.5	Loop BT Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	51
4.3.1.6	Loop CT Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)	51
4.3.2	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	52
4.3.2.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	52
4.3.2.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	52
4.3.2.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)	53
4.3.2.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	53
4.3.2.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	53
4.3.2.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC).....	54
4.3.3	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	54
4.3.3.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	54
4.3.3.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	55
4.3.3.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	55
4.3.3.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT).....	56
4.3.3.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	56
4.3.3.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)	57
4.3.4	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)	58
4.3.4.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	58
4.3.4.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)	58
4.3.4.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT).....	58
4.3.5	- Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	59
4.3.5.1	Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	59
4.3.5.2	Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	59
4.3.5.3	Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	60
4.3.5.4	Loop AT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)	60
4.3.5.5	Loop BT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	60
4.3.5.6	Loop CT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT).....	61

5	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO RELÉ MHO TIPICAMENTE POLARIZADO	62
5.1	O Sistema Elétrico Modelado	62
5.2	O Programa para Simulação do Relé Mho.....	64
5.3	Polarizações Singelas e Faltas	65
5.3.1	- Autopolarização.....	66
5.3.1.1	Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica na LT (ABCT)	68
5.3.1.1.1	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, sem Resistência de Falta	68
5.3.1.1.2	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, com 2 Ω de Resistência de Falta	70
5.3.1.2	Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica (BC).....	71
5.3.1.2.1	Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta	71
5.3.1.2.2	Curto-circuito Bifásico (BC) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).....	73
5.3.1.3	Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Monofásica (AT)	75
5.3.1.3.1	Curto-circuito Monofásico (AT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta	75
5.3.1.3.2	Curto-circuito Monofásico (AT) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 0 \Omega$ e $R_G = 2 \Omega$)	77
5.3.1.4	Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica-Terra (BCT).....	79
5.3.1.4.1	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta	79

5.3.1.4.2	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, com $R_{\phi} = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$	82
5.3.1.5	Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa	84
5.3.1.5.1	Curto-circuito Trifásico a 1% da LT Atrás do Relé ($R_F = 0 \Omega$).....	84
5.3.1.5.2	Curto-circuito Trifásico a 1% da LT Atrás do Relé ($R_F = 2 \Omega$).....	86
5.3.2	- Polarização Singela por Tensão de Quadratura	88
5.3.2.1	Relé Mho Polarizado em Quadratura e Sob Falta Trifásica (ABCT).....	90
5.3.2.1.1	Curto-circuito trifásico, a 1% da LT, sem resistência de falta.....	90
5.3.2.1.2	Curto-circuito trifásico, a 1% da LT, com 2Ω de resistência de falta	92
5.3.2.2	Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Bifásica (BC) na LT	93
5.3.2.2.1	Curto-circuito bifásico (BC), a 1% da LT, sem resistência de falta.....	93
5.3.2.2.2	Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Com 2Ω de Resistência de Falta.....	95
5.3.2.3	Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Monofásica (AT) na LT	96
5.3.2.3.1	Curto-circuito Monofásico (AT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta.....	96
5.3.2.3.2	Curto-circuito Monofásico (AT) a 1% da LT e com $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$)	98
5.3.2.4	Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Bifásica-terra na LT.....	99
5.3.2.4.1	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta.....	99
5.3.2.4.2	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, com $R_{\phi} = 1,0 \Omega$ e $R_G = 1,0 \Omega$	101
5.3.2.5	Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa.....	103
5.3.2.5.1	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Sem Resistência de Falta.....	103
5.3.2.5.2	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT Atrás do Relé e com $R_F = 2 \Omega$	105
5.3.3	- Polarização Singela por Tensão de Memória	106
5.3.3.1	Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica na LT.....	108
5.3.3.1.1	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Sem Resistência de Falta.....	108
5.3.3.1.2	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Com 2Ω de Resistência de Falta	110
5.3.3.2	Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica na LT	111
5.3.3.2.1	Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta	111
5.3.3.2.2	Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Com 2Ω de Resistência de Falta.....	113
5.3.3.3	Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica na LT	115
5.3.3.3.1	Curto-circuito Monofásico (AT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta	115
5.3.3.3.2	Curto-circuito Monofásico (AT) a 1% da LT e Com $R_F = 2 \Omega$ ($R_{\phi} = 0 \Omega$ e $R_G = 2 \Omega$)	117
5.3.3.4	Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra na LT.....	118
5.3.3.4.1	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta	118
5.3.3.4.2	Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Com $R_{\phi} = 1,0 \Omega$ e $R_G = 1,0 \Omega$	120
5.3.3.5	Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa	122
5.3.3.5.1	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Sem Resistência de Falta.....	122
5.3.3.5.2	Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT Atrás do Relé e Com $R_F = 2 \Omega$	124
5.4	Comparação Entre as Polarizações Singelas Típicas	125
5.4.1	- Curto-circuito Trifásico (ABCT) à Frente do Relé Mho.....	126
5.4.2	- Curto-circuito Bifásico (BC) à Frente do Relé Mho.....	127
5.4.3	- Curto-circuito Monofásico (AT) à Frente do Relé Mho	128
5.4.4	- Curto-circuito Bifásico-terra (BCT) à Frente do Relé Mho	129
5.4.5	- Curto-circuito Trifásico (ABCT) Atrás do Relé Mho.....	131

6	CONCLUSÕES.....	132
----------	------------------------	------------

6.1	Considerações Finais.....	132
6.2	Sugestões de Continuidade	134
7	BIBLIOGRAFIA	136

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: SISTEMA MONOFÁSICO DE FONTE DUPLA.....	5
FIGURA 2.2: FALTA NA BARRA B DO CIRCUITO MONOFÁSICO DE FONTE DUPLA.	6
FIGURA 2.3: FALTA ENTRE AS BARRAS A E B NO CIRCUITO MONOFÁSICO DE FONTE DUPLA.	6
FIGURA 2.4: FALTA NA BARRA D DO CIRCUITO MONOFÁSICO DE FONTE DUPLA.....	7
FIGURA 2.5: FALTA NA BARRA E DO CIRCUITO MONOFÁSICO DE FONTE DUPLA.	7
FIGURA 2.6: REGIÃO DE OPERAÇÃO DEFINIDA POR UM COMPARADOR COSSENO	9
FIGURA 2.7: RELÉ MHO CLÁSSICO EM LIMAR DE OPERAÇÃO NO PLANO DE IMPEDÂNCIAS.	11
FIGURA 3.1: UNIFILAR DO SISTEMA DE FONTE DUPLA (EM ANEL) SOB CONDIÇÃO DE FALTA NO PUNTO F.	12
FIGURA 3.2: CIRCUITO DE SEQUÊNCIA POSITIVA QUE REPRESENTA O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EQUILIBRADO.	13
FIGURA 3.3: DISTRIBUIÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS NO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EQUILIBRADO. ...	13
FIGURA 3.4: REPRESENTAÇÃO DE FALTA BIFÁSICA ATRAVÉS DA CONEXÃO DOS CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA.	15
FIGURA 3.5: DISTRIBUIÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS NO CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO.	15
FIGURA 3.6: REPRESENTAÇÃO DE FALTA MONOFÁSICA ATRAVÉS DA CONEXÃO DOS CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA.	17
FIGURA 3.7: CONEXÃO DA IMPEDÂNCIA DE FALTA NO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO.	17
FIGURA 3.8: REPRESENTAÇÃO DE FALTA BIFÁSICA-TERRA ATRAVÉS DA CONEXÃO DOS CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA.	19
FIGURA 3.9: CONEXÃO DAS IMPEDÂNCIAS DE FALTA EM UM CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA.	19
FIGURA 3.10: REPRESENTAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EQUILIBRADO REVERSO.....	21
FIGURA 4.1: A AÇÃO DE MEMÓRIA PARA UMA FALTA SÓLIDA PRÓXIMA. [19]	49
FIGURA 5.1: SISTEMA ELÉTRICO MODELADO NO SOFTWARE ONELINER®.	62
FIGURA 5.2: JANELA COM ENTRADA DE DADOS DE LT NO PROGRAMA ONE LINER®.	63
FIGURA 5.3: TELA INICIAL DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO RELÉ MHO.	64
FIGURA 5.4: CAIXA DE ENTRADA DA AUTOPOLARIZAÇÃO, POLARIZAÇÃO POR QUADRATURA E POLARIZAÇÃO POR MEMÓRIA.....	64
FIGURA 5.5: APRESENTAÇÃO DO MENU APÓS A ESCOLHA DO MODO DE POLARIZAÇÃO SINGELA.	65
FIGURA 5.6: CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO.	66
FIGURA 5.7: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT, SEM RESISTÊNCIA DE FALTA.	68
FIGURA 5.8: LOOP AB DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	69
FIGURA 5.9: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	69
FIGURA 5.10: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).	70
FIGURA 5.11: LOOP AB DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).	70
FIGURA 5.12: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	71
FIGURA 5.13: LOOP BC DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	72
FIGURA 5.14: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	72
FIGURA 5.15: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 2 \Omega$).	73
FIGURA 5.16: LOOP BC DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).	73

FIGURA 5.17: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	75
FIGURA 5.18: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	76
FIGURA 5.19: LOOP BC DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	76
FIGURA 5.20: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$).	77
FIGURA 5.21: LOOP AB DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$.	77
FIGURA 5.22: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$.	78
FIGURA 5.23: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	79
FIGURA 5.24: LOOP BT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	80
FIGURA 5.25: LOOP CT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	80
FIGURA 5.26: LOOP BC DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	81
FIGURA 5.27: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	81
FIGURA 5.28: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT COM $R_\phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$.	82
FIGURA 5.29: LOOP BT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA A 1% DA LT ($R_\phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$).	82
FIGURA 5.30: LOOP CT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA A 1% DA LT ($R_\phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$).	83
FIGURA 5.31: LOOP BC DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA A 1% DA LT ($R_\phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$).	83
FIGURA 5.32: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO, A 1% DA LT REVERSA, SEM RESISTÊNCIA DE FALTA.	84
FIGURA 5.33: LOOP AB DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	85
FIGURA 5.34: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	85
FIGURA 5.35: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA TRIFÁSICA, A 1% DA LT REVERSA, COM $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).	86
FIGURA 5.36: LOOP AB DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 2 \Omega$ E $R_\phi = 1 \Omega$).	86
FIGURA 5.37: LOOP AT DO RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 2 \Omega$ E $R_\phi = 1 \Omega$).	87
FIGURA 5.38: CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE QUADRATURA.	89
FIGURA 5.39: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	90
FIGURA 5.40: LOOP CA DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	91
FIGURA 5.41: LOOP CT DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	91
FIGURA 5.42: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).	92

FIGURA 5.43: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT ($R_F = 2 \Omega$).	92
FIGURA 5.44: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT, SEM RESISTÊNCIA DE FALTA.	93
FIGURA 5.45: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	94
FIGURA 5.46: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 2 \Omega$).	95
FIGURA 5.47: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BC A 1% DA LT ($R_\phi = 1 \Omega$).	95
FIGURA 5.48: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA, SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) E A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	96
FIGURA 5.49: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	97
FIGURA 5.50: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE QUADRATURA SOB FALTA AT A 1% DA LT, COM $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$).	98
FIGURA 5.51: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA AT A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 2 \Omega$).	98
FIGURA 5.52: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	99
FIGURA 5.53: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE QUADRATURA SOB FALTA BCT A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	100
FIGURA 5.54: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BCT A 1% DA LT, COM $R_\phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$	101
FIGURA 5.55: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BCT A 1% DA LT ($R_\phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$).	101
FIGURA 5.56: LOOP BT DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BCT A 1% DA LT E COM $R_F = 2 \Omega$	102
FIGURA 5.57: LOOP CT DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BCT A 1% DA LT E COM $R_F = 2 \Omega$	102
FIGURA 5.58: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO, A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	103
FIGURA 5.59: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	104
FIGURA 5.60: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	104
FIGURA 5.61: RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA, A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 2 \Omega$ E $R_\phi = 1 \Omega$).	105
FIGURA 5.62: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 2 \Omega$).	105
FIGURA 5.63: CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA.	107
FIGURA 5.64: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	108
FIGURA 5.65: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	109
FIGURA 5.66: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).	110
FIGURA 5.67: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$	110
FIGURA 5.68: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	111

FIGURA 5.69: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA BIFÁSICA (BC) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	112
FIGURA 5.70: RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB CURTO-CIRCUITO BC A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_\Phi = 1 \Omega$).	113
FIGURA 5.71: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA BC A 1% DA LT, COM $R_F = 2 \Omega$ ($R_\Phi = 1 \Omega$).	113
FIGURA 5.72: LOOP BT DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA BC A 1% DA LT, COM $R_F = 2 \Omega$ ($R_\Phi = 1 \Omega$).	114
FIGURA 5.73: LOOP CT DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA BC A 1% DA LT, COM $R_F = 2 \Omega$ ($R_\Phi = 1 \Omega$).	114
FIGURA 5.74: RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) A 1% DA LT, SEM RESISTÊNCIA DE FALTA.	115
FIGURA 5.75: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	116
FIGURA 5.76: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA AT A 1% DA LT ($R_F = 2 \Omega$ E $V_M = 90\%$).	117
FIGURA 5.77: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA AT A 1% DA LT E $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$).	117
FIGURA 5.78: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	118
FIGURA 5.79: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA BCT A 1% DA LT ($R_F = 0 \Omega$).	119
FIGURA 5.80: RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA BCT A 1% DA LT, COM $R_\Phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$	120
FIGURA 5.81: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA BCT A 1% DA LT, COM $R_\Phi = 1 \Omega$ E $R_G = 1 \Omega$	121
FIGURA 5.82: RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO, A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	122
FIGURA 5.83: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	123
FIGURA 5.84: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 0 \Omega$).	123
FIGURA 5.85: RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 2 \Omega$ E $R_\Phi = 1 \Omega$).	124
FIGURA 5.86: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO POR MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA A 1% DA LT REVERSA ($R_F = 2 \Omega$).	124
FIGURA 5.87: LOOP AB DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA TRIFÁSICA (ABCT) À FRENTE DOS TCS.	126
FIGURA 5.88: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA (BC) À FRENTE DOS TCS.	127
FIGURA 5.89: LOOP AT DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA MONOFÁSICA (AT) À FRENTE DOS TCS.	128
FIGURA 5.90: LOOP BC DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) À FRENTE DOS TCS.	129
FIGURA 5.91: LOOP BT DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) À FRENTE DOS TCS.	130
FIGURA 5.92: LOOP CT DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) À FRENTE DOS TCS.	130
FIGURA 5.93: LOOP CT DO RELÉ MHO POLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) À FRENTE DOS TCS.	131

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: TENSÕES E CORRENTES EM COMPONENTES DE FASE, RESULTANTES DE FALTA TRIFÁSICA NA LT.....	14
TABELA 3.2: TENSÕES E CORRENTES EM COMPONENTES DE FASE, RESULTANTES DE FALTA BIFÁSICA NA LT.	16
TABELA 3.3: TENSÕES E CORRENTES EM CONDIÇÃO DE FALTA MONOFÁSICA (AT) NA LT.....	18
TABELA 3.4: TENSÕES E CORRENTES À ESQUERDA DA LT SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT).	20
TABELA 3.5: TENSÕES E CORRENTES À ESQUERDA DA LT SOB FALTA TRIFÁSICA REVERSA.	22
TABELA 5.1: IMPEDÂNCIAS DO SISTEMA ANALISADO.	63
TABELA 5.2: EXEMPLO DO ARQUIVO TEXTO QUE O PROGRAMA ONELINER® DISPONIBILIZA.	63
TABELA 5.3: EQUAÇÕES DO COMPARADOR COSSENO PARA RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.	68
TABELA 5.4: EQUAÇÕES DO COMPARADOR COSSENO PARA RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC).	71
TABELA 5.5: EQUAÇÕES DO COMPARADOR COSSENO PARA RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA MONOFÁSICA (AT).	75
TABELA 5.6: EQUAÇÕES DO COMPARADOR COSSENO PARA RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT).	79
TABELA 5.7: EQUAÇÕES DO COMPARADOR COSSENO PARA O RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA TRIFÁSICA REVERSA.	84
TABELA 5.8: EQUAÇÕES DOS COMPARADORES POLARIZADOS POR TENSÃO DE QUADRATURA SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.	90
TABELA 5.9: EQUAÇÕES DOS COMPARADORES PARA RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA BIFÁSICA (BC)	93
TABELA 5.10: EQUAÇÕES DO COMPARADOR PARA RELÉ MHO POLARIZADO EM QUADRATURA SOB FALTA MONOFÁSICA (AT).	96
TABELA 5.11: EQUAÇÕES DOS COMPARADORES COSSENO PARA RELÉ MHO, POLARIZADOS EM QUADRATURA, SOB FALTA BCT.	99
TABELA 5.12: EQUAÇÕES PARA O RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE QUADRATURA SOB FALTA TRIFÁSICA REVERSA.	103
TABELA 5.13: EQUAÇÕES DO COMPARADOR PARA RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA.	108
TABELA 5.14: EQUAÇÕES DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA BIFÁSICA (BC).	111
TABELA 5.15: EQUAÇÕES DO RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA MONOFÁSICA (AT).	115
TABELA 5.16: EQUAÇÕES DO COMPARADOR COSSENO PARA RELÉ MHO AUTOPOLARIZADO SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT).	118
TABELA 5.17: EQUAÇÕES PARA O RELÉ MHO POLARIZADO POR TENSÃO DE MEMÓRIA SOB FALTA TRIFÁSICA REVERSA.	122
TABELA 5.18: POLARIZAÇÕES SINGELAS TÍPICAS SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO À FRENTE DO RELÉ MHO (LOOP AB).	126
TABELA 5.19: POLARIZAÇÕES SINGELAS TÍPICAS SOB CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) À FRENTE DO RELÉ MHO (LOOP BC).	127
TABELA 5.20: POLARIZAÇÕES SINGELAS TÍPICAS SOB CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO À FRENTE DO RELÉ MHO (LOOP AT).	128
TABELA 5.21: POLARIZAÇÕES SINGELAS TÍPICAS SOB FALTA BIFÁSICA-TERRA (BCT) À FRENTE DO RELÉ MHO (LOOP BC).	129
TABELA 5.22: POLARIZAÇÕES SINGELAS TÍPICAS SOB FALTA TRIFÁSICA (ABCT) ATRÁS DO RELÉ MHO (LOOP CA).	131

SIGLAS E ABREVIATURAS

DC	Direct Current (corrente contínua).
Matlab®	Software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico.
One Liner®	Software de cálculo de curtos-circuitos e coordenação de proteção.
Pickup	Ajuste definido no relé para que a função de proteção venha a atuar.
Dropout	Valor da grandeza de operação abaixo do qual o relé sai da condição de pickup.
LT	Linha de transmissão.
ABB	Asea Brown Boveri.
GE	General Electric.
TP	Transformador de potencial.
TC	Transformador de corrente.
MVA	Megavolt-ampere.
kV	Quilovolt.
pu	Sistema “por unidade”.
R_F	Resistência de falta.
R_ϕ	Resistência de fase.
R_G	Resistência de terra.
SE	Subestação

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência operam na maior parte das vezes em configuração topológica de anel, em malhas mais ou menos complexas. Por causa disso, os relés de proteção de cada terminal das linhas de transmissão que interligam as subestações precisam ter definição direcional, para poder conseguir discernir se um eventual curto-circuito que vier a ocorrer no sistema estará à frente ou atrás de seus transdutores de corrente. Essa definição direcional permite desligar a menor porção possível do sistema elétrico, minimizando impactos negativos para componentes do sistema e mantendo o maior número possível de clientes energizados.

Relés de distância são os dispositivos de proteção que comumente protegem as linhas de transmissão de sistemas elétricos de potência conectados em anel, haja vista sua rapidez na atuação, facilidade de coordenação com outros dispositivos de proteção e melhor acomodação de condições severas de carga. Os modernos relés de distância costumam oferecer dois tipos de características de operação, a Mho e a poligonal. A característica de operação Mho é circular, definida normalmente em condições de regime permanente como uma circunferência passando pela origem de um plano de impedâncias, cujo diâmetro é definido pela impedância referente à porção do sistema elétrico que se deseja proteger. Já os relés de distância poligonais são definidos por quatro, cinco ou seis segmentos de retas, que também em condições de regime permanente definem uma área do primeiro, segundo e quarto quadrante do plano de impedâncias, passando também pela origem dos eixos. Os relés de distância operam com seis *loops* de falta diferentes, sendo três deles de fase (AB, BC e CA) e os outros três de terra (AT, BT e CT). Cada um desses *loops* define uma das características de operação do relé de distância. Portanto, um relé de distância opera com seis características circulares independentes, cada uma “medindo” uma impedância definida pelas tensões e correntes que lhe são próprias. Por exemplo, os sinais de operação de um *loop* de falta AB utiliza a tensão V_{AB} e a corrente I_{AB} , enquanto um *loop* de falta CT utiliza a corrente compensada I_{Comp} e a tensão V_C .

Este trabalho trata apenas do relé de distância Mho e como se define seu comportamento direcional. Os relés de distância Mho comumente utilizam comparadores de fase tipo cosseno para construir sua característica circular intrinsecamente direcional, desde que devidamente polarizados. A polarização é a definição de uma referência que permite ao relé concluir em que direção ocorre a falta. Os comparadores de fase tipo cosseno, como seu próprio nome informa, compara o ângulo de fase entre dois sinais, sendo aqui chamados de sinal de

operação e sinal de referência. Esses sinais são comparados e caso o ângulo entre eles for superior a 90° a falta é definida como externa à característica de operação. Se o ângulo entre os sinais for menor que 90° a falta está dentro da característica. Já uma falta igual a $+90^\circ$ ou -90° está sobre a linha que define a circunferência.

O sinal de polarização, que serve de referência para a definição do sentido direcional, é composto de uma tensão oriunda dos transdutores de tensão que estão conectados ao relé. Os três modos típicos de polarização que normalmente são utilizados por um relé de distância são a autopolarização, a polarização cruzada e a polarização por tensão de memória. Na autopolarização o relé utiliza como sinal de referência a própria tensão de cada *loop*, por exemplo, o *loop* BC é polarizado pela própria tensão V_{BC} , medida em tempo real. O problema é que no caso de uma falta sólida envolvendo as fases B e C, próxima do ponto onde estão conectados os transdutores de tensão, a tensão V_{BC} tende a zero, inviabilizando a definição direcional. Uma forma de se contornar essa limitação é utilizar a polarização cruzada no sinal de referência. Na polarização cruzada, também chamada de polarização por tensão em quadratura, o comparador de fases tipo cosseno do *loop* BC utiliza uma tensão que não a das fases B e C, consequentemente a tensão da fase A. Essa tensão V_A é multiplicada por raiz de três para ter o mesmo módulo da tensão V_{BC} na condição pré-falta, além de ser devidamente rotacionada para se conseguir o mesmo ângulo de fase que a tensão V_{BC} tinha antes da falta. Fazendo isso, na mesma condição de falta bifásica entre as fases B e C, próximas aos transdutores de tensão e sem resistência de falta, o comparador de fases tipo cosseno do *loop* BC passa a ter uma tensão de módulo suficientemente grande para compor seu sinal de referência e permitir uma decisão direcional. Procedimento análogo é utilizado nos demais *loops* de falta do relé Mho, fazendo com que qualquer tipo de falta assimétrica sólida e próxima possa ter sua direcionalidade definida. Mas ainda existe um problema, o da falta trifásica sem resistência de falta e próxima aos transdutores de tensão. Nesse caso todas as três tensões tendem a zero e nenhuma delas pode servir de referência em qualquer um dos seis *loops* de falta. Para resolver esse problema é utilizada a polarização por tensão de memória. A polarização por tensão de memória utiliza tensões armazenadas na condição pré-falta para serem utilizadas no momento da falta. Uma implementação típica para a definição de quando um *loop* do relé Mho deve lançar mão da tensão pré-falta armazenada é determinar um valor de tensão medida pelo próprio *loop*, abaixo da qual o relé deixa de operar como autopolarizado para utilizar amostras da tensão pré-falta. Há implementações onde se utilizam as tensões de cada uma das fases, sendo então que o *loop* AT utiliza a tensão V_A memorizada e o *loop* CA

utiliza a tensão V_{CA} . A utilização da tensão de sequência positiva memorizada antes da falta também é comum, só que devidamente rotacionada e com seu módulo adaptado de forma similar ao que se faz na polarização cruzada. Se o sistema é perfeitamente equilibrado na condição pré-falta, a utilização de tensão de memória de sequência positiva ou em componentes de fase não altera o resultado, pois a tensão de sequência positiva é a própria tensão da fase A.

Muitos profissionais de engenharia elétrica e estudantes acreditam que o relé Mho tem uma característica de operação exclusivamente estática, representada por uma circunferência passando pela origem dos eixos. As características de operação do relé Mho são estáticas e passam pela origem em condição de regime permanente, mas em condição de falta no sistema elétrico elas podem ter seu tamanho alterado, vindo a não passar mais pela origem dos eixos. Como e porque essas variações acontecem é o principal foco deste estudo. A comparação dessas variações entre os relés polarizados nos três modos típicos também é um dos objetivos.

Este trabalho irá tratar do relé Mho polarizado de forma singela, isso é, utilizando cada um dos modos típicos de polarização por vez. Essa abordagem será inicialmente matemática, definindo as equações dos comparadores de fase tipo cosseno durante condições de faltas clássicas numa linha de transmissão com fonte de ambos os lados. Para que isso seja feito, é necessário primeiro definir as equações de tensões e correntes em componentes de fase para cada um dos quatro tipos de faltas clássicas na linha de transmissão. Também é necessário definir as equações de tensões e correntes para uma falta trifásica atrás dos transdutores de corrente do relé Mho. Todas essas equações, desenvolvidas de forma literal, permitem a substituição por valores numéricos quaisquer. Este trabalho de definição das tensões e correntes pode ser encontrado na referência [23]. Em função da limitação do número de páginas imposto a uma dissertação de mestrado, o terceiro capítulo desta dissertação traz apenas as equações finais, sem o desenvolvimento necessário para se chegar até elas. De qualquer forma, o leitor que quiser se aprofundar mais um pouco poderá acessar a referência citada para mais detalhes.

Inserindo as equações das tensões e correntes utilizadas por cada um dos comparadores de fase de cada um dos *loops* do relé Mho, polarizado por cada um dos três modos típicos, configura-se seus específicos sinais de operação e referência. Essas equações dos comparadores de fase precisam ser manipuladas matematicamente para transformar equações de tensões e correntes em equações onde cada termo representa uma impedância. Esta alteração é obtida dividindo cada um dos termos dos sinais de operação e de referência do comparador de fases tipo cosseno pela corrente medida do próprio *loop*. Essa mudança é necessária para que se possa apresentar

o comportamento do comparador de fases tipo cosseno num plano de impedâncias. As equações dos comparadores de fase tipo cosseno em termos de impedâncias são apresentadas no quarto capítulo. O desenvolvimento matemático para se sair de termos que representam tensões para se chegar a termos que representam impedâncias também não será apresentado neste trabalho em função de sua extensão, mas trata-se de puro algebrismo e essa omissão não compromete o entendimento do tema abordado neste trabalho.

O próximo objetivo é criar, conforme apresentado no Capítulo 5, uma modelagem computacional do relé Mho polarizado. Um sistema elétrico de topologia idêntica ao utilizado no segundo capítulo para o desenvolvimento das equações de tensões e correntes é modelado no *software* de cálculo de curto-circuito *One Liner*®. Após a execução de faltas selecionadas no *One Liner*®, arquivos tipo texto com todos os dados resultantes desses curtos-circuitos são gerados. Um programa criado em *Matlab*® lê esses arquivos de falta e utiliza os dados de tensão e corrente para modelar as características de operação de relés de distância tipo Mho, polarizados de forma singela em cada um dos três modos típicos, sob faltas clássicas à frente e atrás dos transdutores de corrente. Os resultados dessas simulações podem então ser comparados com os resultados equacionados no quarto capítulo, validando as duas abordagens desenvolvidas, haja vista a concordância entre os resultados obtidos.

O sexto capítulo traz uma rápida comparação entre os três modos típicos de polarização e um quarto modo, sendo que este último nada mais é que uma simples mistura homogênea dos três modos típicos de polarização até então abordados. Essa forma mista é apresentada a título de curiosidade, haja vista que os relés de distância comerciais não operam polarizados de forma singela, mas misturando modos típicos e até métodos desenvolvidos pelo próprio fabricante.

Não é fácil encontrar livros que tratem da polarização de relés de distância com maior detalhamento. Cook (1985) [1] parece ser o livro com o estudo mais aprofundado. Há artigos que também apresentam uma ótima abordagem do assunto, como os de Ordacgi e Sollero (1995) [2], Wedepohl (1965) [4], Wilkinson e Mathews (1979) [8] e De Mesmaecker (1981) [16]. Essa dificuldade de encontrar uma referência sobre o assunto da polarização de relés de distância de forma bem aprofundada foi o principal incentivo para a elaboração deste estudo. Espera-se, portanto, conseguir apresentar de modo claro e objetivo os modos típicos de polarização do relé Mho, evidenciando as vantagens e desvantagens de cada um desses métodos, propiciando uma boa alternativa de consulta a estudantes e profissionais da área de proteção de sistemas elétricos.

2 A IMPORTÂNCIA DA DIRECIONALIDADE

Nos sistemas elétricos de potência as linhas de transmissão normalmente possuem fontes conectadas em suas extremidades. Sistemas assim são chamados “malhados” ou conectados em anel. O sistema elétrico representado na **Figura 2.1** apresenta uma linha de transmissão entre as subestações representadas pelas barras **A** e **B**, com um relé **R** conectado a transdutores de tensão e corrente na SE **A**. Apenas este relé está representado, mas numa situação real há relés em cada saída de LT de cada SE, voltados à proteção dessa LT. Dessa forma, espera-se que o relé **R** proteja a LT entre as barras **A** e **B**. É necessário que o relé **R** possa conseguir distinguir também uma falta que ocorra entre as barras **B** e **D** à jusante, temporizando sua atuação para evitar uma descoordenação com o relé na barra **B**. Outra condição muito importante é que o relé não atue de forma reversa, para faltas na LT entre as barras **E** e **A**.

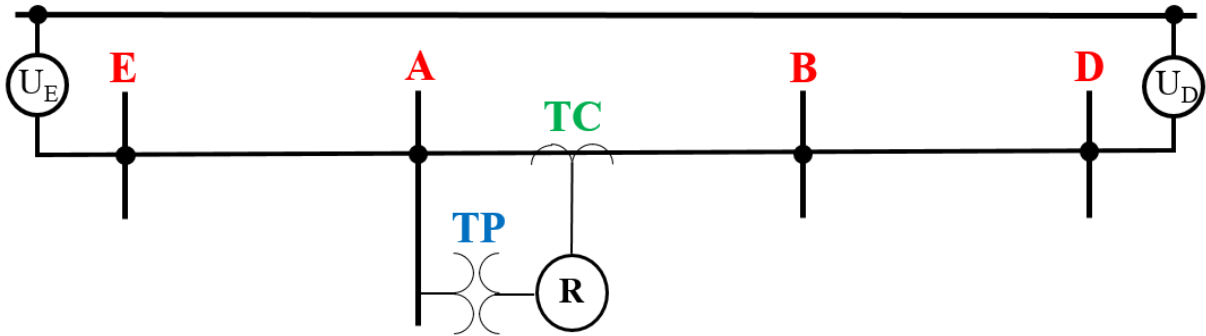


Figura 2.1: Sistema monofásico de fonte dupla.

Inicialmente, para simplificar a análise de como se pode garantir um comportamento direcional ao relé **R**, o circuito da **Figura 2.1** será considerado como monofásico. Este circuito possui duas fontes de tensão U_E e U_D , conectadas à barra **E** e **D**, respectivamente. As impedâncias de cada uma das três LTs serão consideradas de mesmo valor. Partindo dessas premissas, define-se o sinal de operação genérico para o relé **R** como:

$$S_1 = I_L Z_R - V_L$$

Equação 2.1

Onde:

- I_L = Corrente na linha, passando pelo TC.
- V_L = Tensão na barra na qual está conectado o TP.
- Z_R = Impedância réplica da linha de transmissão protegida.

A impedância réplica Z_R é a impedância ajustada no relé, de valor igual ao trecho da linha que se deseja proteger, neste caso, a impedância da LT entre as barras **A** e **B**.

Considere então uma falta na barra **B** conforme mostra a **Figura 2.2**. Neste caso, o valor da multiplicação da I_L por Z_R deve ser idêntico à tensão V_L , já que o relé está ajustado com impedância réplica de valor igual ao da LT entre as barras **A** e **B**. Isso faz com que o sinal S_I seja igual a zero.

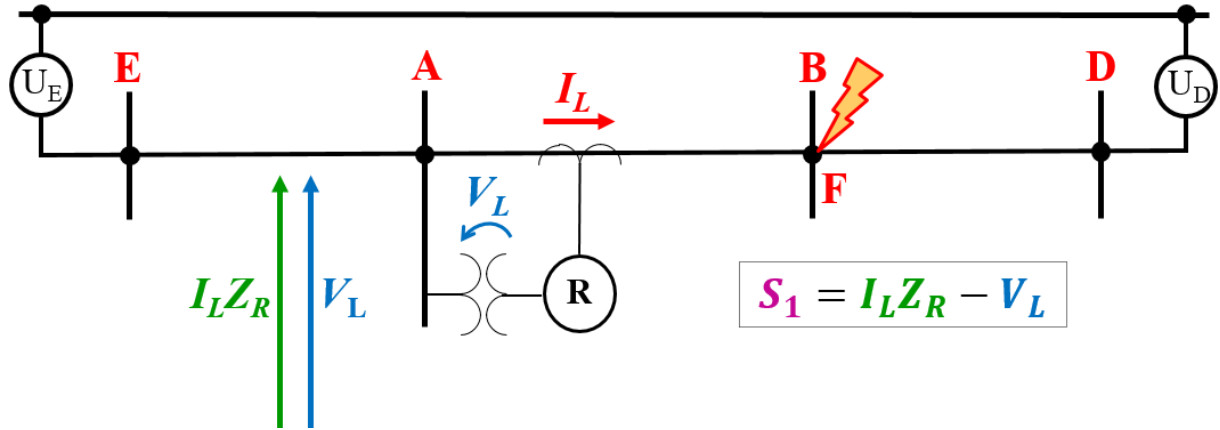


Figura 2.2: Falta na barra B do circuito monofásico de fonte dupla.

Considerando a falta a 50% da LT entre as barras **A** e **B** (**Figura 2.3**), o resultado da multiplicação de I_L por Z_R é maior que o da **Figura 2.2**, pois a corrente de falta I_L aumenta. Já a tensão V_L é menor que caso no anterior (**Figura 2.2**). Então, a tensão resultante no sinal S_I agora tem o mesmo sentido da queda de tensão na impedância réplica.

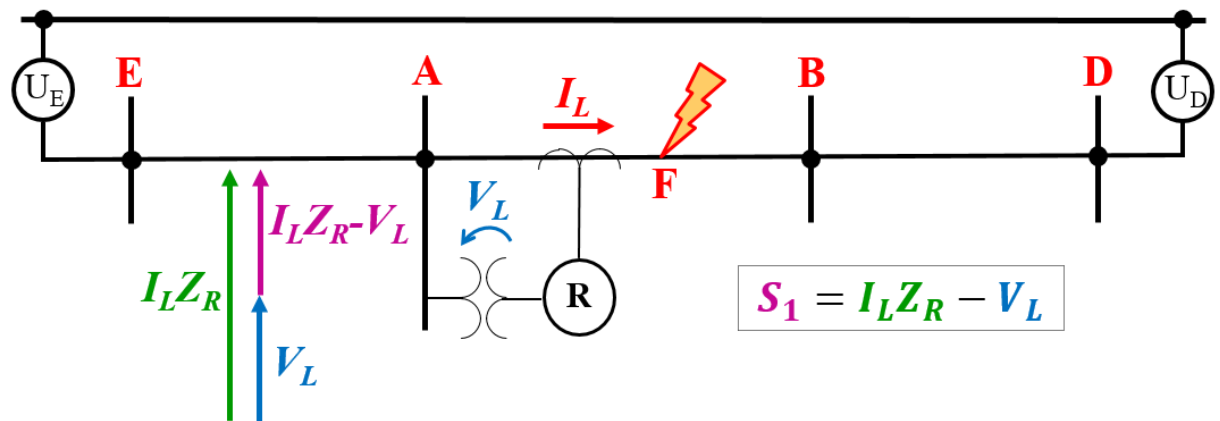


Figura 2.3: Falta entre as barras A e B no circuito monofásico de fonte dupla.

Para uma falta na barra **D** (**Figura 2.4**), a queda de tensão na impedância réplica Z_R tem valor menor que o verificado quando a falta ocorria na barra **B** (**Figura 2.2**), pois a corrente I_L passa a ter valor menor em módulo. Consequentemente a tensão V_L é maior agora. Avaliando o impacto disso na **Equação 2.1**, vê-se que a tensão resultante no sinal S_I passa a ter sentido contrário ao da tensão medida V_L .

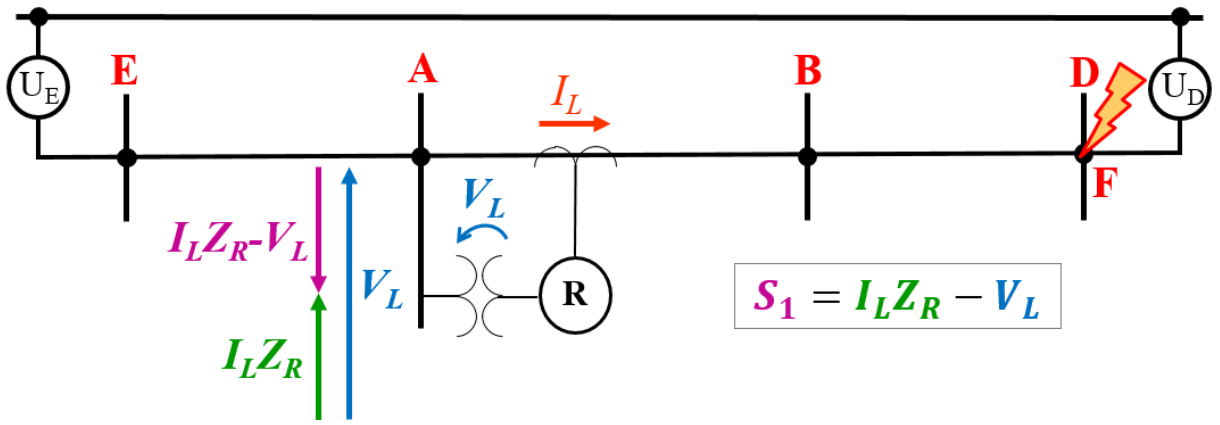


Figura 2.4: Falta na barra D do circuito monofásico de fonte dupla.

Esta análise preliminar é finalizada com uma falha na barra E, fora da linha protegida e de sentido reverso para o relé R (Figura 2.5). A queda de tensão na impedância réplica Z_R tem agora sentido contrário ao dos casos anteriores, pois a corrente neste caso passa pelo TC vinda da barra D, mas a tensão medida V_L não altera seu sentido. Assim, o sinal S_1 tem sempre sentido igual ao da queda de tensão em Z_R .

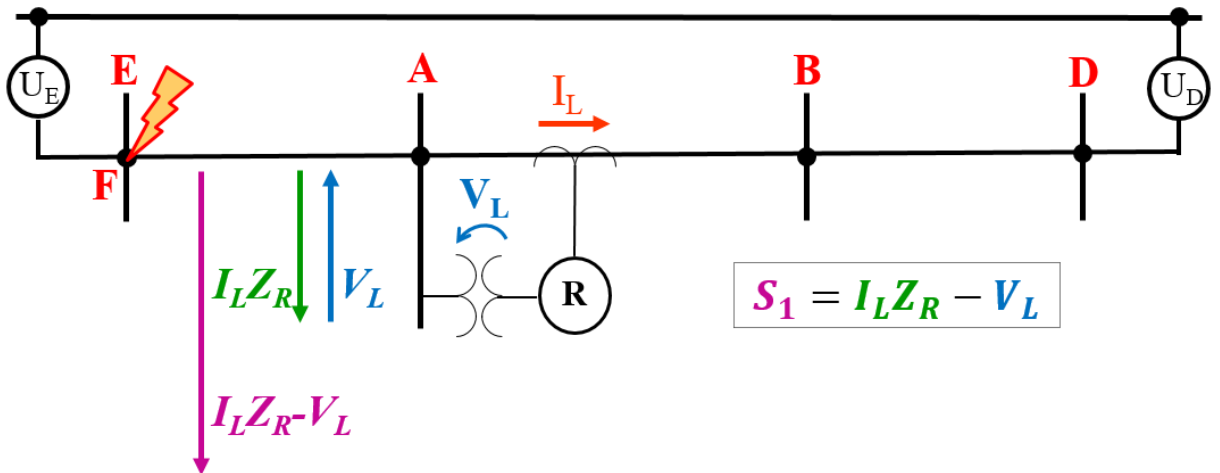


Figura 2.5: Falta na barra E do circuito monofásico de fonte dupla.

Portanto, a Equação 2.1 permite concluir que se a falha ocorre fora da LT entre as barras A e B, protegida pelo relé R, o sinal de operação S_1 terá sempre sentido inverso ao da tensão V_L . Com base nessa conclusão, pode-se definir um sinal de polarização ou de referência S_2 como a própria tensão V_L medida na barra A. Dessa forma, a comparação entre as direções dos sinais S_1 e S_2 indica se a falha está ou não dentro da linha protegida [2].

$$S_2 = V_L$$

Equação 2.2

2.1 O Comparador de Fases Tipo Cosseno

Na análise anterior, todas as considerações sobre a defasagem angular entre os sinais S_1 e S_2 foram feitas assumindo condições ideais, como a ausência de resistência de falta, de erros dos transdutores, erros do relé, influência da fonte na barra “D”, e etc. Essa análise simplificada define que numa falta onde o ângulo entre o sinal de operação S_1 e o sinal de polarização S_2 é igual a zero, o defeito está dentro da área protegida, e se o ângulo é igual a 180° a falta ocorre fora da área protegida, à frente ou atrás do ponto onde está instalado o relé.

A verificação da diferença angular entre dois sinais específicos que não estejam obrigatoriamente a 0° ou a 180° pode ser executada através dispositivos físicos ou implementações lógicas chamadas de comparadores de fase [21]. O foco deste estudo será direcionado sobre os comparadores de fase tipo cosseno, já que estes são comumente utilizados por relés comerciais.

Cabe frisar que as empresas de energia elétrica ao redor do mundo têm relés de diversas gerações tecnológicas protegendo suas linhas de transmissão. Cada uma dessas gerações de relés utilizava uma forma particular de definição direcional. Alguns exemplos da definição direcional utilizada pelos relés ao longo do tempo são citados abaixo:

- Nos relés eletromecânicos [5]:
 - ✓ Relé de bobina móvel.
 - ✓ Relé de disco e de cilindro de indução (princípio de Ferraris modificado por meio de defasamento).
- Nos relés estáticos [17]:
 - ✓ Ponte retificadora de onda completa com circuito integrador.
 - ✓ Circuito lógico combinacional com circuito integrador.
- Nos relés digitais [21]:
 - ✓ Implementação digital de comparação angular entre os sinais amostrados de tensão e corrente.

O comparador de fases tipo cosseno será abordado aqui através de sua implementação digital. Essa implementação digital é bastante simples, bastando apenas algumas linhas de programação. Os sinais analógicos amostrados de tensão e corrente são levados ao relé que os converte para a forma digital. Esses sinais, agora amostrados digitalmente, podem ter seus ângulos comparados. De forma generalizada, essa análise pode ser feita da seguinte forma:

$$\theta = \arg\left(\frac{S_1}{S_2}\right) = \alpha_1 - \alpha_2$$

Onde:

$$\begin{cases} S_1 = |S_1| \angle \alpha_1 \Rightarrow \text{Sinal de operação} \\ S_2 = |S_2| \angle \alpha_2 \Rightarrow \text{Sinal de referência} \end{cases}$$

As regiões de operação, não operação e limiar de operação são assim definidas:

$$\theta_2 < \theta < \theta_1 \Rightarrow \text{região de operação}$$

$$\theta = \theta_1 \text{ ou } \theta = \theta_2 \Rightarrow \text{região limite}$$

$$\theta > \theta_1 \text{ ou } \theta < \theta_2 \Rightarrow \text{região de não operação}$$

Adianta-se aqui que os valores de θ que definem a característica circular Mho são:

$$\theta_1 = 90^\circ$$

$$\theta_2 = -90^\circ$$

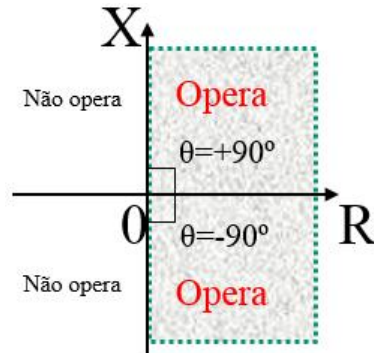


Figura 2.6: Região de operação definida por um comparador cosseno

Muitas outras implementações são possíveis, sejam com limites de operação diferentes de $\pm 90^\circ$, sinais de operação e referência diferentes dos aqui abordados, utilização de comparadores de fases tipo seno ou comparadores de amplitude, e etc [21].

2.2 O Plano de Impedâncias, ou Plano Z

A análise inicial, efetuada sobre o circuito monofásico da **Figura 2.1**, chegou a sinais de operação e referência em termos de tensões, os quais estão descritos abaixo ao modo de representação de um comparador de fases:

$$\begin{cases} S_1 = I_L Z_R - \dot{V}_L \\ S_2 = \dot{V}_L \end{cases} \quad \text{Equação 2.3}$$

Dividindo os sinais S_1 e S_2 pela corrente I_L , chega-se a dois novos sinais S'_1 e S'_2 , que são equivalentes, proporcionais aos sinais de operação e referência da **Equação 2.3**. Essa simples operação matemática permite sair da comparação de sinais de tensão para a análise de sinais em termos de impedâncias. Aparece agora a impedância medida Z_{Medida} , resultado da divisão da tensão medida V_L pela corrente medida I_L . Como a **Equação 2.4** origina-se da **Equação 2.3**, a primeira continua representando um sistema monofásico, onde os sinais de operação e referência podem estar em fase ou 180° defasados.

$$\begin{cases} S'_1 = \frac{\dot{I}_L Z_R}{\dot{I}_L} - \frac{\dot{V}_L}{\dot{I}_L} = Z_R - Z_{Medida} \\ S'_2 = \frac{\dot{V}_L}{\dot{I}_L} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 2.4}$$

De forma a generalizar essa análise para sinais defasados em qualquer condição, S''_1 e S''_2 são definidos utilizando a terminologia de *loop*. A estrutura da **Equação 2.5** é similar à da **Equação 2.4**, mas seus termos representam informações de tensões e correntes de um sistema trifásico. Se a tensão de polarização ($V_{polarização}$) for diferente da tensão medida pelo *loop* durante a falta (V_{Loop}), pode se reescrever a equação de S''_2 como a soma da tensão V_{Loop} com uma nova tensão V_S , responsável pelo aparecimento da impedância Z_S (impedância da fonte atrás do relé Mho), a qual é responsável pela variação da característica de operação do relé Mho polarizado.

$$\begin{cases} S''_1 = \frac{\dot{I}_{Loop} Z_R}{\dot{I}_{Loop}} - \frac{\dot{V}_{Loop}}{\dot{I}_{Loop}} = Z_R - Z_{Medida} \\ S''_2 = \frac{\dot{V}_{Polarização}}{\dot{I}_{Loop}} = \frac{\dot{V}_S + \dot{V}_{Loop}}{\dot{I}_{Loop}} = \frac{\dot{V}_S}{\dot{I}_{Loop}} + \frac{\dot{V}_{Loop}}{\dot{I}_{Loop}} = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 2.5}$$

Os relés de distância operam com seis *loops* de falta diferentes, sendo três deles de fase (AB, BC e CA) e os outros três de terra (AT, BT e CT). Cada um desses *loops* define uma das características de operação do relé de distância. Assim sendo, um relé de distância opera com seis características circulares independentes, cada uma medindo uma impedância definida pelas tensões e correntes que lhe são próprias. Por exemplo, os sinais de operação de um *loop* de falta AB utiliza a tensão V_{AB} e a corrente I_{AB} , enquanto um *loop* de falta CT utiliza a corrente compensada I_{Ccomp} ($I_C + k_0 I_{Neutro}$) e a tensão V_C [2].

Como a **Equação 2.5** é apresentada de forma generalizada, trazendo no sinal de referência S_2'' uma tensão de polarização qualquer, é possível deduzir que se a própria tensão do *loop* é utilizada como tensão de polarização, a característica do relé no plano de impedâncias pode ser definida assim, considerando os sinais de operação e de referência a 90° um do outro:

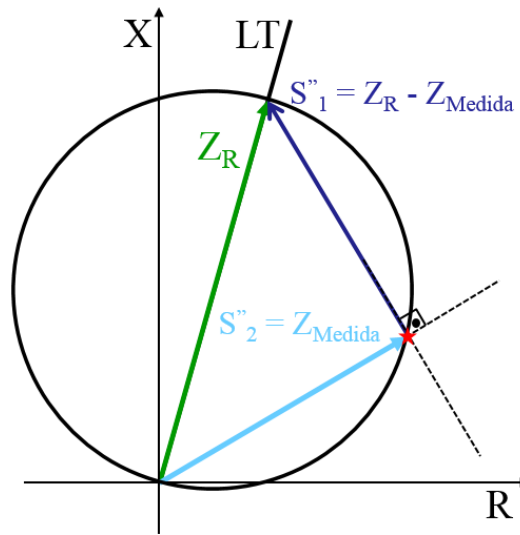


Figura 2.7: Relé Mho Clássico em limiar de operação no plano de impedâncias.

Da geometria analítica tem-se que um triângulo inscrito numa circunferência é retângulo [17]. A característica de operação circular de um relé de distância Mho, construída com a utilização de um comparador de fases tipo cosseno, é dada pelo lugar geométrico dos pontos do plano de impedâncias que atendem à condição de ortogonalidade entre os sinais S_1'' e S_2'' , sendo a linha dessa circunferência chamada de “limiar de operação” do relé Mho. Na **Figura 2.7** a estrela vermelha representa a impedância medida. Caso a impedância medida esteja dentro da característica de operação, o ângulo entre S_1'' e S_2'' será menor que 90° e tem-se a condição de *trip*. Se a impedância medida estiver fora da característica de operação, o ângulo será maior que 90° e não ocorre o *trip*. *Trip* é o nome dado ao sinal emitido pelo relé quando ele opera.

3 COMPONENTES DE FASE (TENSÕES E CORRENTES) SOB FALTAS CLÁSSICAS

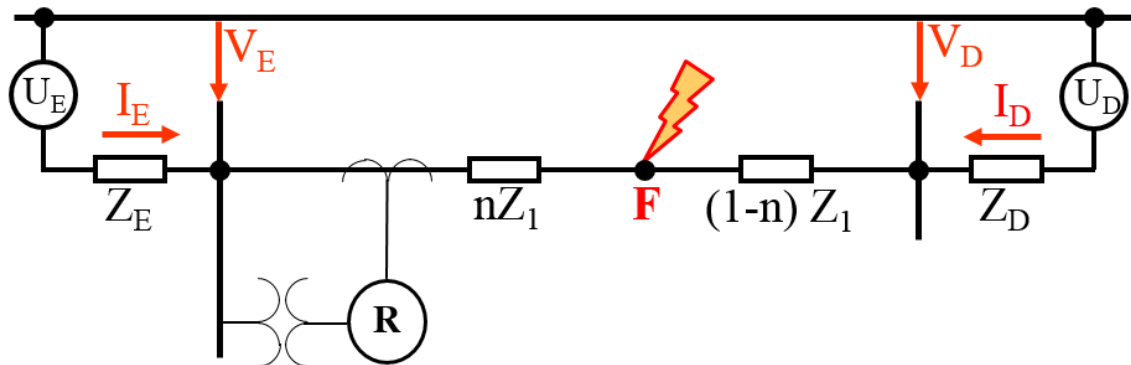


Figura 3.1: Unifilar do sistema de fonte dupla (em anel) sob condição de falta no ponto F.

O sistema de fonte dupla da **Figura 3.1** será utilizado para se obter as tensões e correntes medidas pelos transdutores que alimentam o relé **R** conectado à barra **E** (barra à esquerda) durante condições de faltas clássicas num ponto genérico **F** da LT, onde:

- U_E = Tensão do equivalente do sistema atrás (à esquerda) da barra **E**.
- U_D = Tensão do equivalente do sistema atrás (à direita) da barra **D**.
- I_E = Corrente elétrica que flui do equivalente U_E em direção à barra **E**.
- I_D = Corrente elétrica que flui do equivalente U_D em direção à barra **D**.
- V_E = Tensão na barra **E** (à esquerda).
- V_D = Tensão na barra **D** (à direita).
- **F** = Ponto onde ocorre a falta.
- n = fator multiplicador que varia de 0 (zero) até 1 (um).
- nZ_1 = Trecho da LT, da barra **E** ao ponto de falta **F**.
- $(1-n)Z_1$ = Trecho da LT, da barra **D** ao ponto de falta **F**.
- **R** = Relé de distância tipo Mho, conectado aos transdutores da barra **E**.

A seguir serão apresentadas equações literais de tensões e correntes desenvolvidas para cada tipo de falta clássica num ponto genérico **F**. O detalhamento completo para se chegar até essas equações pode ser acessado na referência [23]. As grandezas elétricas são definidas em componentes de fase. Essas equações de tensões e correntes alimentarão os comparadores de fase tipo cosseno de cada um dos seis *loops* de falta do relé Mho, em cada tipo de polarização.

3.1 Curto-circuito Trifásico (ABCT) na LT

O circuito de sequência positiva, conectado conforme mostra a **Figura 3.2**, é o ponto de partida para se calcular as grandezas elétricas resultantes de uma falta trifásica equilibrada em um ponto genérico da linha de transmissão entre as barras **D** e **E**. As relações próprias do teorema de Fortescue são utilizadas para a obtenção de equações de tensões e correntes em componentes de fase na forma literal, condizentes com os valores que seriam medidos pelos TPs conectados à barra **E** e os TCs conectados na saída da LT.

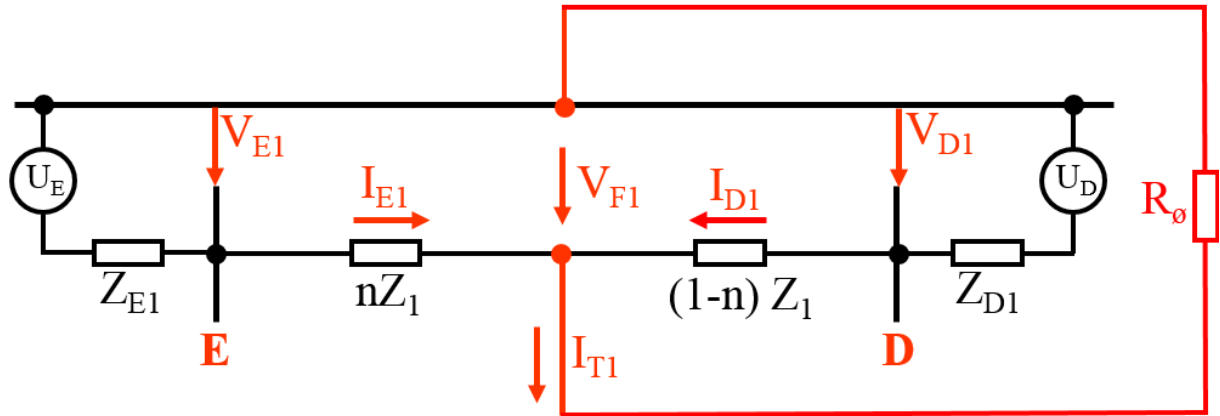


Figura 3.2: Circuito de sequência positiva que representa o curto-circuito trifásico equilibrado.

As resistências envolvidas na falta [14] são consideradas dispostas como mostra a **Figura 3.3**. Cada fase tem uma resistência R_ϕ , logo a resistência de falta R_F entre duas fases é duas vezes o valor de R_ϕ .

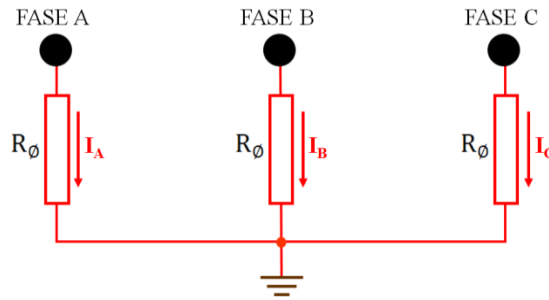


Figura 3.3: Distribuição das impedâncias no curto-circuito trifásico equilibrado.

Como já foi informado, não será apresentado o desenvolvimento matemático necessário para se chegar às equações de tensões e correntes exclusivamente pela limitação de número de páginas imposto para uma dissertação de mestrado. De qualquer forma, a compreensão do tema principal, que é a polarização do relé Mho, não será afetada por essa omissão. Além disso, a referência [23] traz a análise de curto-circuito de todas as faltas aqui abordadas.

Tabela 3.1: Tensões e correntes em componentes de fase, resultantes de falta trifásica na LT.

CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO (ABCT) NA LT [COMPONENTES DE FASE]	
$\dot{U}_E^{Fase A} = C_1 \dot{I}_{1T}(Z_{E1} + nZ_1) + \dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{U}_E^{Fase B} = a^2 \dot{U}_E^{Fase A} = a^2 [C_1 \dot{I}_{1T}(Z_{E1} + nZ_1) + \dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{Fase C} = a \dot{U}_E^{Fase A} = a [C_1 \dot{I}_{1T}(Z_{E1} + nZ_1) + \dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{AB} = \dot{U}_E^{Fase A} - \dot{U}_E^{Fase B} = (1 - a^2)\dot{U}_E = (1 - a^2)[C_1 \dot{I}_{1T}(Z_{E1} + nZ_1) + \dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{BC} = \dot{U}_E^{Fase B} - \dot{U}_E^{Fase C} = (a^2 - a)\dot{U}_E = (a^2 - a)[C_1 \dot{I}_{1T}(Z_{E1} + nZ_1) + \dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{CA} = \dot{U}_E^{Fase C} - \dot{U}_E^{Fase A} = (a - 1)\dot{U}_E = (a - 1)[C_1 \dot{I}_{1T}(Z_{E1} + nZ_1) + \dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{V}_E^{Fase A} = \dot{V}_{E1} = C_1 \dot{I}_{1T}nZ_1 + \dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{V}_E^{Fase B} = a^2 \dot{V}_E^{Fase A} = a^2 (C_1 \dot{I}_{1T}nZ_1 + \dot{I}_{1T}R_\phi)$	
$\dot{V}_E^{Fase C} = a \dot{V}_E^{Fase A} = a (C_1 \dot{I}_{1T}nZ_1 + \dot{I}_{1T}R_\phi)$	
$\dot{V}_E^{AB} = \dot{V}_E^{Fase A} - \dot{V}_E^{Fase B} = (1 - a^2)\dot{V}_{E1} = (1 - a^2)(C_1 \dot{I}_{1T}nZ_1 + \dot{I}_{1T}R_\phi)$	
$\dot{V}_E^{BC} = \dot{V}_E^{Fase B} - \dot{V}_E^{Fase C} = (a^2 - a)\dot{V}_{E1} = (a^2 - a)(C_1 \dot{I}_{1T}nZ_1 + \dot{I}_{1T}R_\phi)$	
$\dot{V}_E^{CA} = \dot{V}_E^{Fase C} - \dot{V}_E^{Fase A} = (a - 1)\dot{V}_{E1} = (a - 1)(C_1 \dot{I}_{1T}nZ_1 + \dot{I}_{1T}R_\phi)$	
$\dot{I}_E^{Fase A} = \dot{I}_{E1} = C_1 \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase B} = a^2 \dot{I}_E^{Fase A} = a^2 C_1 \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase C} = a \dot{I}_E^{Fase A} = a C_1 \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{AB} = \dot{I}_E^{Fase A} - \dot{I}_E^{Fase B} = (1 - a^2)\dot{I}_{E1} = (1 - a^2)C_1 \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{BC} = \dot{I}_E^{Fase B} - \dot{I}_E^{Fase C} = (a^2 - a)\dot{I}_{E1} = (1 - a^2)C_1 \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{CA} = \dot{I}_E^{Fase C} - \dot{I}_E^{Fase A} = (a - 1)\dot{I}_{E1} = (1 - a^2)C_1 \dot{I}_{1T}$	

A **Equação 3.1** representa o divisor de correntes do circuito de sequência positiva [23], definido de forma a simplificar os cálculos matemáticos e obter equações mais concisas.

$$C_1 = \frac{Z_{D1} + (1 - n)Z_1}{Z_{D1} + Z_1 + Z_{E1}} \quad \text{Equação 3.1}$$

Os operadores rotacionais abaixo também são utilizados na maioria das equações:

- $a = 1 \angle 120^\circ$: Rotaciona um fasor por 120° no sentido anti-horário.
- $a^2 = 1 \angle 240^\circ$: Rotaciona um fasor por 240° no sentido anti-horário.

As equações apresentadas na **Tabela 3.1** serão utilizadas para compor os sinais S_1'' e S_2'' do comparador de fases de cada um dos *loops* do relé Mho polarizado sob falta trifásica.

3.2 Curto-circuito Bifásico (BC) na LT

Para se chegar às equações de tensões e correntes durante condição de falta bifásica entre as fases B e C no ponto F do circuito da **Figura 3.1** é necessário conectar seus circuitos de sequência positiva e negativa em paralelo, como pode ser visto na **Figura 3.4**. A distribuição das impedâncias no curto-circuito bifásico [14] é apresentada na **Figura 3.5**.

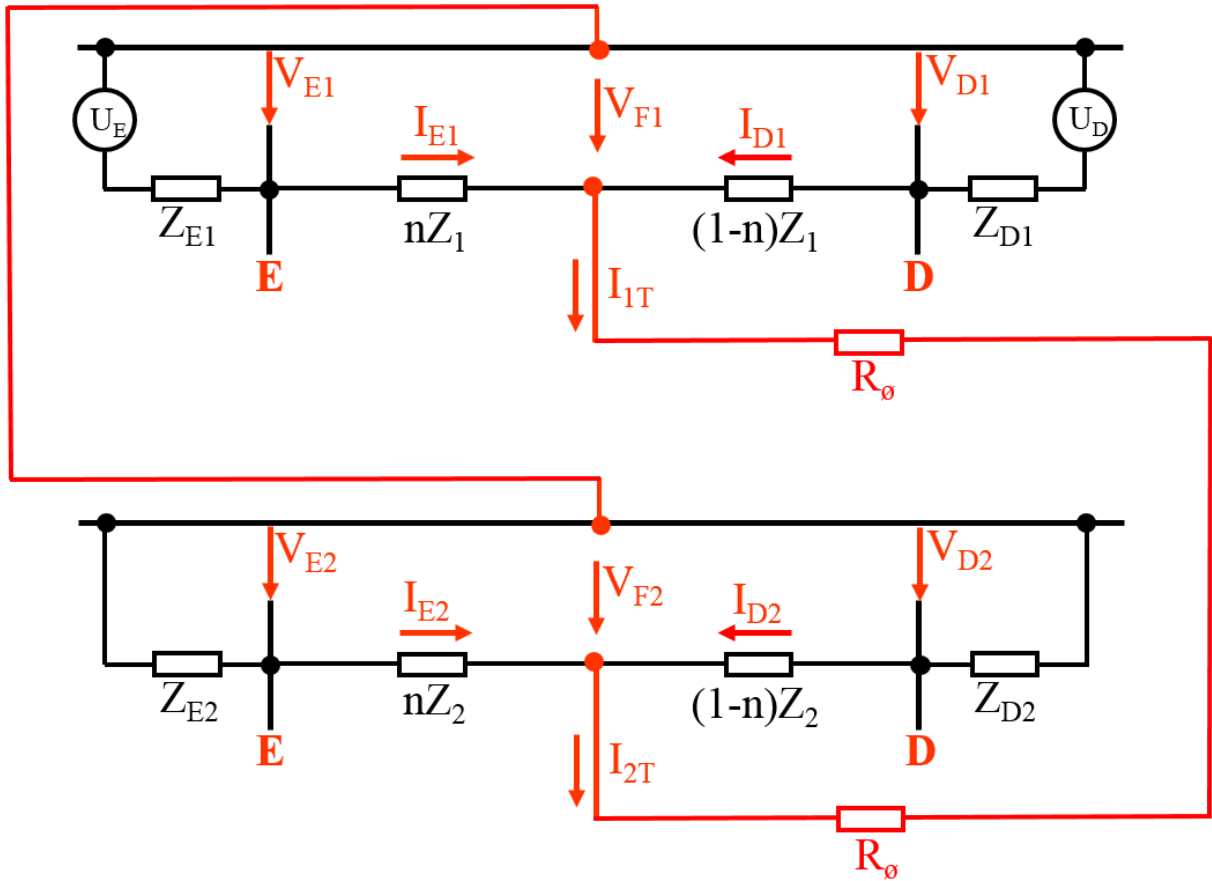


Figura 3.4: Representação de falta bifásica através da conexão dos circuitos de sequência.

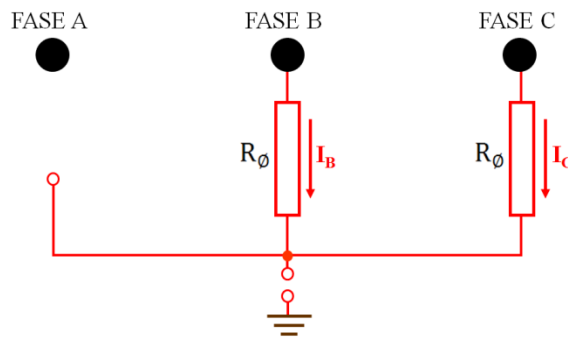


Figura 3.5: Distribuição das impedâncias no curto-circuito bifásico.

A **Figura 3.5** também traz resistência de fase $\mathbf{R}_\Phi$, agora somente nas fases B e C, que estão envolvidas no curto-circuito bifásico. A conexão com a terra está aberta, fazendo com que a falta seja bifásica “pura”. Dessa forma, a resistência de falta total é $\mathbf{R}_F$, que corresponde aqui a duas vezes o valor de $\mathbf{R}_\Phi$.

Tabela 3.2: Tensões e correntes em componentes de fase, resultantes de falta bifásica na LT.

CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) NA LT [COMPONENTES DE FASE]	
$\dot{U}_E^{Fase A} = \dot{U}_E = (C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{U}_E^{Fase B} = a^2\dot{U}_E^{Fase A} = a^2[(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F]$	
$\dot{U}_E^{Fase C} = a\dot{U}_E^{Fase A} = a[(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F]$	
$\dot{U}_E^{AB} = \dot{U}_E^{Fase A} - \dot{U}_E^{Fase B} = (1 - a^2)[(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F]$	
$\dot{U}_E^{BC} = \dot{U}_E^{Fase B} - \dot{U}_E^{Fase C} = (a^2 - a)[(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F]$	
$\dot{U}_E^{CA} = \dot{U}_E^{Fase C} - \dot{U}_E^{Fase A} = (a - 1)[(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F]$	
$\dot{V}_E^{Fase A} = \dot{V}_{E1} = (C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + 2C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + \dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{V}_E^{Fase B} = a^2\dot{V}_E^{Fase A} = a^2(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 - C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + a^2\dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{V}_E^{Fase C} = a\dot{V}_E^{Fase A} = a(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 - C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + a\dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{V}_E^{AB} = \dot{V}_E^{Fase A} - \dot{V}_E^{Fase B} = (1 - a^2)(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + 3C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1 - a^2)\dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{V}_E^{BC} = \dot{V}_E^{Fase B} - \dot{V}_E^{Fase C} = (a^2 - a)(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 + (a^2 - a)\dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{V}_E^{CA} = \dot{V}_E^{Fase C} - \dot{V}_E^{Fase A} = (a - 1)(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}nZ_1 - 3C_2\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (a - 1)\dot{I}_{1T}R_F$	
$\dot{I}_E^{Fase A} = \dot{I}_{E1} = (C_1 - C_2)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase B} = a^2\dot{I}_E^{Fase A} = (a^2C_1 - aC_2)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase C} = a\dot{I}_E^{Fase A} = (aC_1 - a^2C_2)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{AB} = \dot{I}_E^{Fase A} - \dot{I}_E^{Fase B} = (1 - a^2)(C_1 - aC_2)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{BC} = \dot{I}_E^{Fase B} - \dot{I}_E^{Fase C} = (a^2 - a)(C_1 + C_2)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{CA} = \dot{I}_E^{Fase C} - \dot{I}_E^{Fase A} = (a - 1)(C_1 + a^2C_2)\dot{I}_{1T}$	

É necessário definir também o divisor de correntes do circuito de sequência negativa, que tem configuração similar ao de sequência positiva (**Equação 3.1**), haja vista a simetria entre estes circuitos.

$$C_2 = \frac{Z_{D2} + (1 - n)Z_2}{Z_{D2} + Z_2 + Z_{E2}} \quad \text{Equação 3.2}$$

As equações de tensões e correntes apresentadas na **Tabela 3.2** irão compor os sinais de operação (S_1'') e de referência (S_2'') do comparador de fases tipo cosseno dos seis *loops* do relé Mho polarizado de forma singela por cada um dos modos típicos de polarização, quando expostos a um curto-circuito bifásico entre as fases B e C.

3.3 Curto-circuito Monofásico (AT) na LT

A análise de um curto-circuito monofásico entre a fase A e a terra num ponto genérico F da LT (**Figura 3.1**) exige a conexão em série dos circuitos de sequência positiva, negativa e zero (**Figura 3.6**).

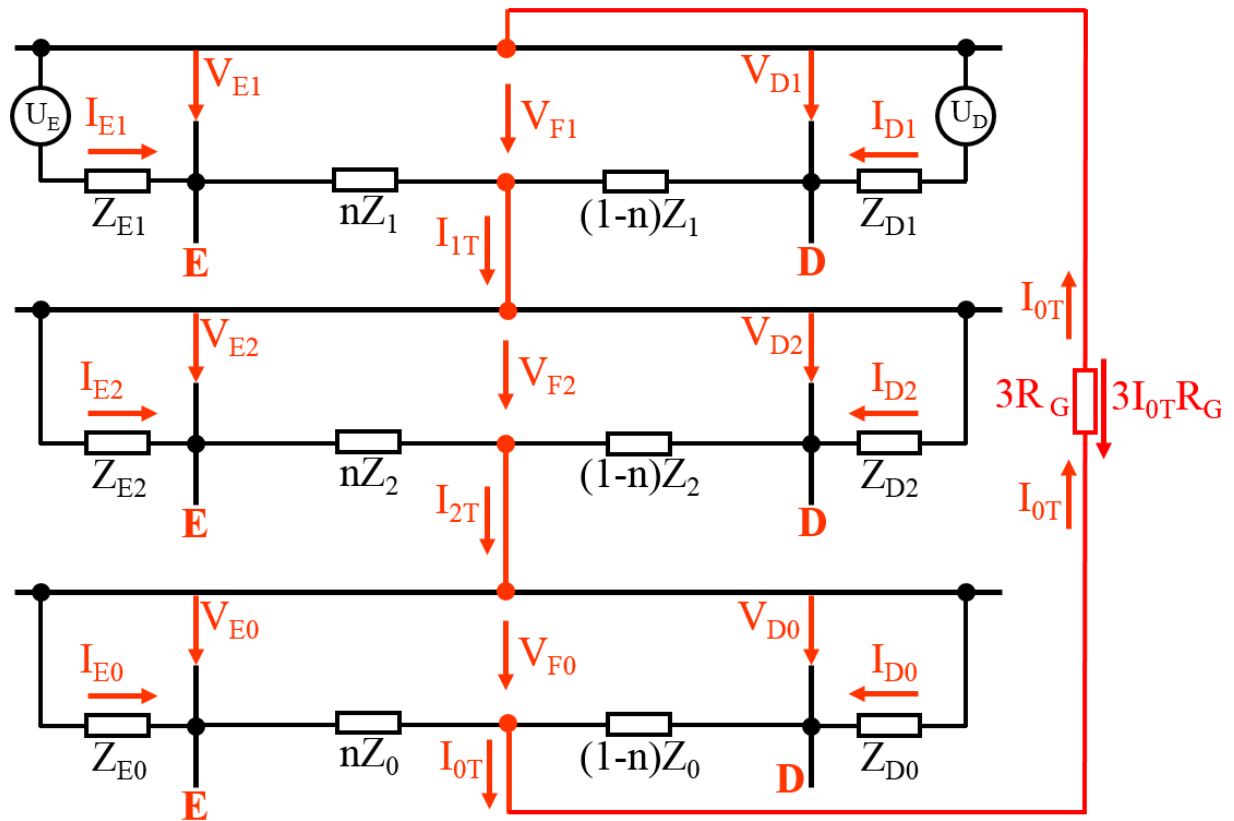


Figura 3.6: Representação de falta monofásica através da conexão dos circuitos de sequência.

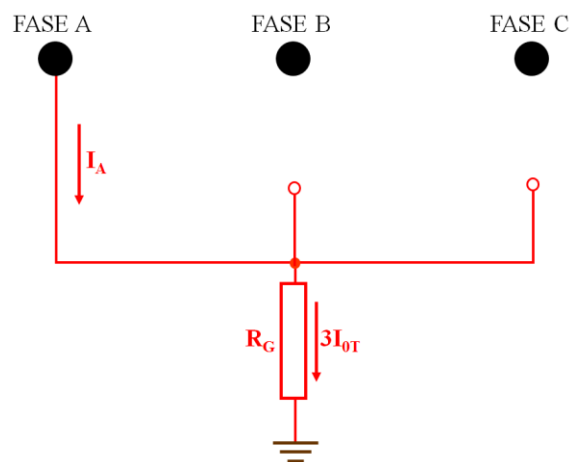


Figura 3.7: Conexão da impedância de falta no curto-circuito monofásico.

A **Figura 3.7** mostra como é considerada a conexão da resistência de falta à terra $\mathbf{R}_G$, que nas equações será apresentada como a resistência de falta $\mathbf{R}_F$.

Tabela 3.3: Tensões e correntes em condição de falta monofásica (AT) na LT.

CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) NA LT [COMPONENTES DE FASE]	
$\dot{U}_E^{Fase A} = [C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E1} + C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{U}_E^{Fase B} = a^2\{[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E1} + C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3\dot{I}_{0T}R_F\}$	
$\dot{U}_E^{Fase C} = a\{[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E1} + C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3\dot{I}_{0T}R_F\}$	
$\dot{U}_E^{AB} = (1 - a^2)\{[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E1} + C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3\dot{I}_{0T}R_F\}$	
$\dot{U}_E^{BC} = (a^2 - a)\{[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E1} + C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3\dot{I}_{0T}R_F\}$	
$\dot{U}_E^{CA} = (a - 1)\{[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E1} + C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3\dot{I}_{0T}R_F\}$	
$\dot{V}_E^{Fase A} = [C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + 3\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{V}_E^{Fase B} = a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + (a^2 - a)C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + (a^2 - 1)C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3a^2\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{V}_E^{Fase C} = a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + (a - a^2)C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + (a - 1)C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3a\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{V}_E^{AB} = (1 - a^2)[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + (a - a^2)C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + (1 - a^2)C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3(1 - a^2)\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{V}_E^{BC} = (a^2 - a)[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + 2(a^2 - a)C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + (a^2 - a)C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3(a^2 - a)\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{V}_E^{CA} = (a - 1)[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}nZ_1 + (a - a^2)C_2\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E2} + (a - 1)C_0\dot{I}_{0T}\dot{Z}_{E0} + 3(a - 1)\dot{I}_{0T}R_F$	
$\dot{I}_E^{Fase A} = (C_1 + C_2 + C_0)\dot{I}_{0T}$	$\dot{I}_E^{Fase A_{Comp}} = [C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}$
$\dot{I}_E^{Fase B} = (C_0 + a^2C_1 + aC_2)\dot{I}_{0T}$	$\dot{I}_E^{Fase B_{Comp}} = [a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}$
$\dot{I}_E^{Fase C} = (C_0 + aC_1 + a^2C_2)\dot{I}_{0T}$	$\dot{I}_E^{Fase C_{Comp}} = [aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0]\dot{I}_{0T}$
$\dot{I}_E^{AB} = (1 - a^2)C_1\dot{I}_{0T} + (1 - a)C_2\dot{I}_{0T}$	
$\dot{I}_E^{BC} = (a^2 - a)(C_1 - C_2)\dot{I}_{0T}$	
$\dot{I}_E^{CA} = (a - 1)C_1\dot{I}_{0T} + (a^2 - 1)C_2\dot{I}_{0T}$	

Como a falta monofásica envolve também o circuito de sequência zero, o divisor de correntes deste circuito precisa também ser apresentado:

$$C_0 = \frac{Z_{D0} + (1 - n)Z_0}{Z_{D0} + Z_0 + Z_{E0}} \quad \text{Equação 3.3}$$

O fator de compensação de terra k_0 , é definido por:

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad \text{Equação 3.4}$$

Três correntes aparecem como novidade na **Tabela 3.3**. Trata-se das correntes compensadas de fase [23]. Essas correntes compensadas de fase são as que realmente compõem os sinais dos comparadores de fase tipo cosseno dos *loops* AT, BT e CT.

3.4 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT) na LT

As equações de tensões e correntes em componentes de fase para uma falta do tipo bifásica-terra entre as fases B, C e a terra são calculadas conectando os circuitos de sequência positiva, negativa e zero em paralelo, como mostra a **Figura 3.8**.

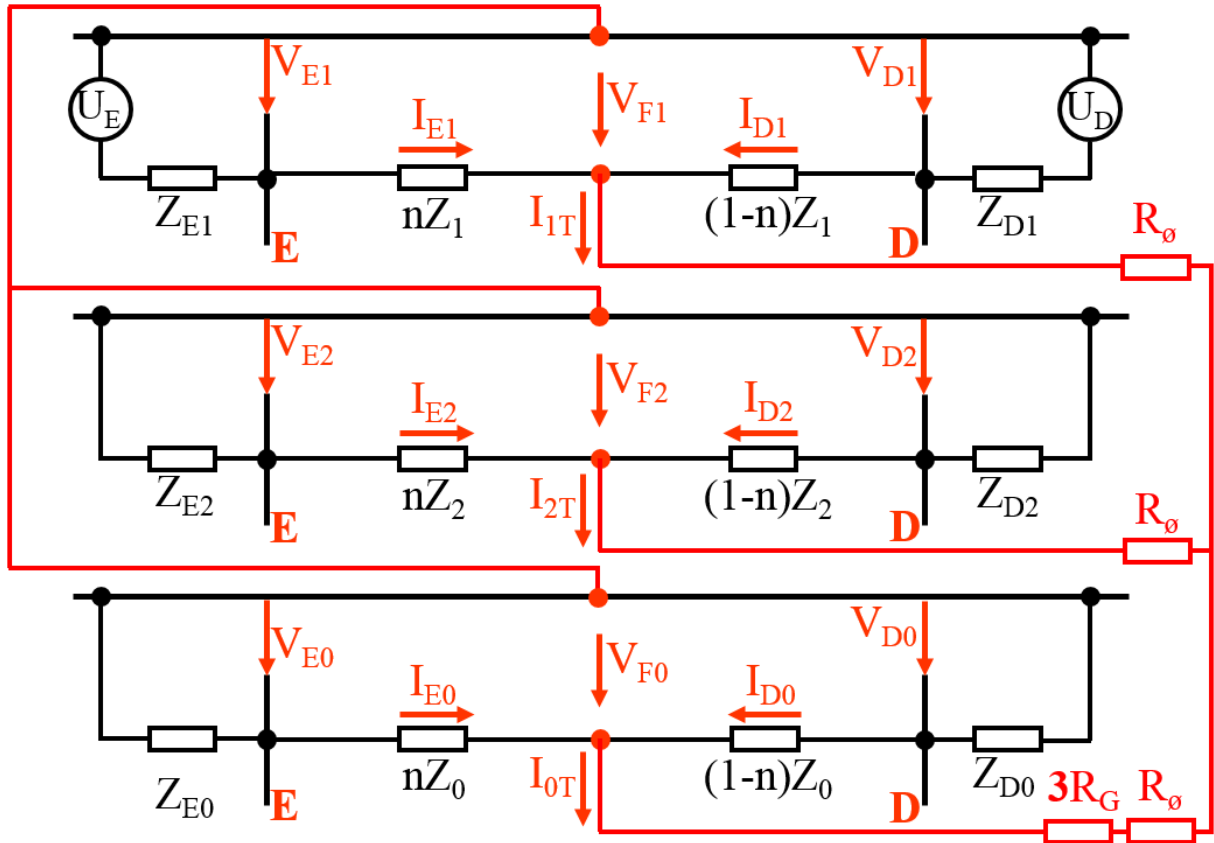


Figura 3.8: Representação de falta bifásica-terra através da conexão dos circuitos de sequência.

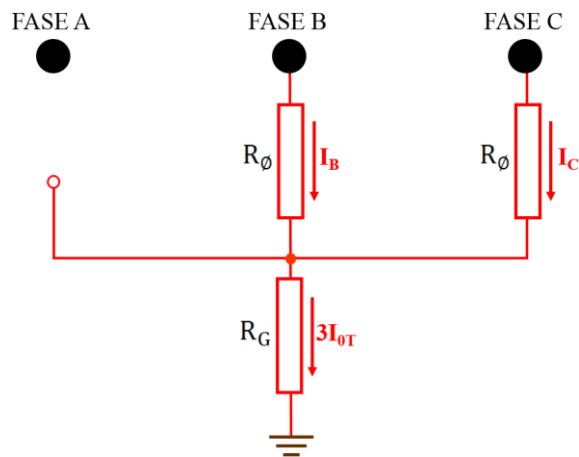


Figura 3.9: Conexão das impedâncias de falta em um curto-circuito bifásico-terra.

Tabela 3.4: Tensões e correntes à esquerda da LT sob falta bifásica-terra (BCT).

CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA (BCT) NA LT [COMPONENTES DE FASE]	
$\dot{U}_E^{Fase A} = (C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1+C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{U}_E^{Fase B} = a^2[(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1+C)\dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{Fase C} = a[(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1+C)\dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{AB} = (1 - a^2)[(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1+C)\dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{BC} = (a^2 - a)[(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1+C)\dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{U}_E^{CA} = (a - 1)[(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + C_1\dot{I}_{1T}Z_{E1} + C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1+C)\dot{I}_{1T}R_\phi]$	
$\dot{V}_E^{Fase A} = (C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + 2C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + C_0(1 - C)\dot{I}_{1T}Z_{E0} + (1 + C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{V}_E^{Fase B} = a^2(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 - C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + C_0(1 - C)\dot{I}_{1T}Z_{E0} + a^2(1 + C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{V}_E^{Fase C} = a(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 - C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + C_0(1 - C)\dot{I}_{1T}Z_{E0} + a(1 + C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{V}_E^{AB} = (1 - a^2)(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + 3C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (1 - a^2)(1 + C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{V}_E^{BC} = (a^2 - a)(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 + (a^2 - a)(1 + C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{V}_E^{CA} = (a - 1)(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}nZ_1 - 3C_2C\dot{I}_{1T}Z_{E2} + (a - 1)(1 + C)\dot{I}_{1T}R_\phi$	
$\dot{I}_E^{Fase A} = [C_1 - C_2C - C_0(1 - C)]\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase B} = [a^2C_1 - aC_2C - C_0(1 - C)]\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase C} = [aC_1 - a^2C_2C - C_0(1 - C)]\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{AB} = (1 - a^2)(C_1 + aC_2C)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{BC} = (a^2 - a)(C_1 + C_2C)\dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{CA} = (a - 1)(C_1 + a^2C_2C)\dot{I}_{1T}$	

Durante o cálculo das equações de tensões e correntes em componentes de fase para um curto-circuito bifásico-terra é definido um novo divisor de correntes, denominado aqui por divisor de corrente dos circuitos de sequência negativa e zero (Equação 3.5). Como as equações dos comparadores de fase tipo cosseno serão desenvolvidas em função dos loops AB, BC e CA, este divisor de correntes incorpora a influência que o circuito de sequência zero na falta. Mais detalhes sobre como chegar a ele podem ser obtidos na referência [23].

$$C = \frac{Z_0 + 3R_G + R_\phi}{Z_0 + Z_2 + 3R_G + 2R_\phi} \quad \text{Equação 3.5}$$

O curto-circuito bifásico-terra é o de cálculo mais complexo. Apesar de essa falta também envolver a terra, não se vê na **Tabela 3.4** as equações de correntes compensadas de fase que aparecem na **Tabela 3.3**. Analiticamente não é possível conseguir desenvolver essas equações em função somente de uma corrente. De qualquer forma, os relés de distância comerciais costumam operar pelos *loops* de falta AB, BC ou CA quando uma falta bifásica-terra é identificada. Esse assunto será abordado ao longo do texto com mais detalhes.

3.5 Curto-circuito Trifásico Reverso (ABCT)

O curto-circuito trifásico-terra à esquerda (atrás) dos TCs é calculado utilizando apenas o circuito de sequência positiva, de modo análogo ao cálculo do curto-circuito trifásico-terra na LT. A diferença aqui fica por conta do local onde ocorre a conexão da fase A do circuito unifilar à barra de terra (**Figura 3.10**), que é um ponto intermediário em meio à impedância equivalente da fonte de tensão U_E . É interessante observar que no curto-circuito trifásico reverso as correntes que passam através dos TCs são oriundas agora da fonte U_D .

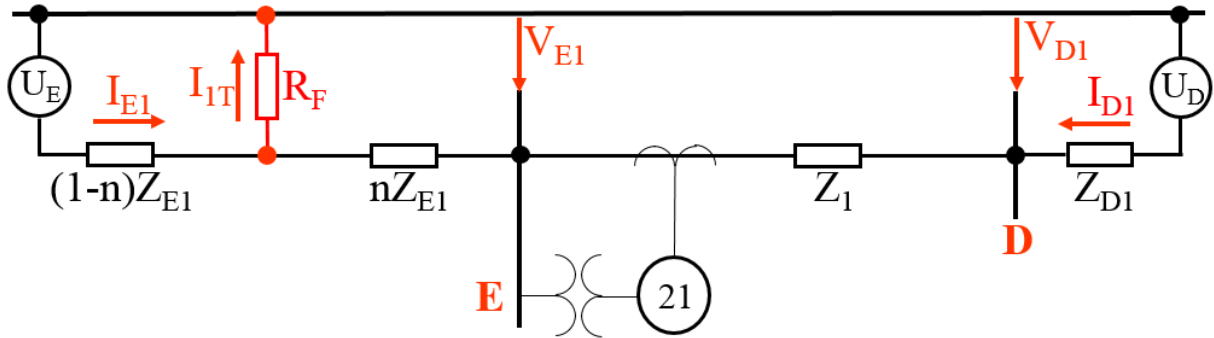


Figura 3.10: Representação do curto-circuito trifásico equilibrado reverso.

Esta análise das tensões e correntes para uma falta trifásica à esquerda (atrás) dos TCs do relé Mho permitirá observar um dos comportamentos mais interessantes do relé Mho, quando polarizado por tensão pré-falta memorizada antes da incidência do curto-circuito. Este comportamento peculiar poderá ser identificado nas equações apresentadas no capítulo 4 e também nas simulações do capítulo 5.

A distribuição das resistências de falta no curto-circuito trifásico reverso é definida da mesma forma que no curto-circuito trifásico na LT, conforme mostra a **Figura 3.3**.

O curto-circuito mais agressivo e problemático para a proteção é o trifásico, metálico e próximo aos TPs, imediatamente à frente ou atrás dos transdutores de corrente. Nestas condições a tensão medida pelo relé Mho tende a zero e isso pode fazer com que o sinal de referência ou polarização do relé seja anulado, dependendo do tipo de polarização utilizado. Assim, para garantir uma atuação segura do relé Mho na condição de falta trifásica sólida e próxima, a polarização por tensão memorizada antes da incidência do curto-circuito é o método indicado. As equações apresentadas na **Tabela 3.5** permitirão, juntamente com as da **Tabela 3.1**, chegar às equações dos comparadores de fase tipo cosseno para a análise dessas faltas.

As equações de tensões e correntes para os demais tipos de faltas reversas não serão definidas aqui. Será possível concluir no capítulo 5 que faltas monofásicas, bifásicas e bifásicas-terra imediatamente à frente ou atrás dos TCs, sólidas e próximas aos TPs podem ser identificadas pelo relé Mho polarizado com a utilização da polarização por tensão de quadratura (polarização cruzada).

Tabela 3.5: Tensões e correntes à esquerda da LT sob falta trifásica reversa.

CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO REVERSO (ABCT) [COMPONENTES DE FASE]	
$\dot{U}_D^{Fase A} = \dot{U}_E = C_1^R \dot{I}_{1T}(Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}) + \dot{I}_{1T}R_\emptyset$	
$\dot{U}_D^{Fase B} = a^2 \dot{U}_D^{Fase A} = a^2 [C_1^R \dot{I}_{1T}(Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}) + \dot{I}_{1T}R_\emptyset]$	
$\dot{U}_D^{Fase C} = a \dot{U}_D^{Fase A} = a [C_1^R \dot{I}_{1T}(Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}) + \dot{I}_{1T}R_\emptyset]$	
$\dot{U}_D^{AB} = \dot{U}_D^{Fase A} - \dot{U}_D^{Fase B} = (1 - a^2) [C_1^R \dot{I}_{1T}(Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}) + \dot{I}_{1T}R_\emptyset]$	
$\dot{U}_D^{BC} = \dot{U}_D^{Fase B} - \dot{U}_D^{Fase C} = (a^2 - a) [C_1^R \dot{I}_{1T}(Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}) + \dot{I}_{1T}R_\emptyset]$	
$\dot{U}_D^{CA} = \dot{U}_D^{Fase C} - \dot{U}_D^{Fase A} = (a - 1) [C_1^R \dot{I}_{1T}(Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}) + \dot{I}_{1T}R_\emptyset]$	
$\dot{V}_E^{Fase A} = \dot{V}_{E1} = C_1^R \dot{I}_{1T}nZ_{E1} + \dot{I}_{1T}R_\emptyset$	
$\dot{V}_E^{Fase B} = a^2 \dot{V}_E^{Fase A} = a^2 (C_1^R \dot{I}_{1T}nZ_{E1} + \dot{I}_{1T}R_\emptyset)$	
$\dot{V}_E^{Fase C} = a \dot{V}_E^{Fase A} = a (C_1^R \dot{I}_{1T}nZ_{E1} + \dot{I}_{1T}R_\emptyset)$	
$\dot{V}_E^{AB} = \dot{V}_E^{Fase A} - \dot{V}_E^{Fase B} = (1 - a^2) (C_1^R \dot{I}_{1T}nZ_{E1} + \dot{I}_{1T}R_\emptyset)$	
$\dot{V}_E^{BC} = \dot{V}_E^{Fase B} - \dot{V}_E^{Fase C} = (a^2 - a) (C_1^R \dot{I}_{1T}nZ_{E1} + \dot{I}_{1T}R_\emptyset)$	
$\dot{V}_E^{CA} = \dot{V}_E^{Fase C} - \dot{V}_E^{Fase A} = (a - 1) (C_1^R \dot{I}_{1T}nZ_{E1} + \dot{I}_{1T}R_\emptyset)$	
$\dot{I}_E^{Fase A} = -\dot{I}_D^{Fase A} = -\dot{I}_{D1} = -C_1^R \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase B} = -\dot{I}_D^{Fase B} = -a^2 \dot{I}_{D1} = -a^2 C_1^R \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{Fase C} = -\dot{I}_D^{Fase C} = -a \dot{I}_{D1} = -a C_1^R \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{AB} = \dot{I}_E^{Fase A} - \dot{I}_E^{Fase B} = (a^2 - 1) C_1^R \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{BC} = \dot{I}_E^{Fase B} - \dot{I}_E^{Fase C} = (a - a^2) C_1^R \dot{I}_{1T}$	
$\dot{I}_E^{CA} = \dot{I}_E^{Fase C} - \dot{I}_E^{Fase A} = (1 - a) C_1^R \dot{I}_{1T}$	

Note que a tensão da fonte na **Tabela 3.5** agora é da fonte à direita, $\mathbf{U}_D$. Todos os cálculos para se obter essas equações de tensões e correntes podem ser consultas em [23].

Um novo divisor de corrente é apresentado abaixo (**Equação 3.6**). Trata-se também de um divisor de corrente do circuito de sequência positiva, mas como a falta aqui é reversa, seus termos são diferentes dos da **Equação 3.1**.

$$C_1^R = \frac{(1 - n)Z_{E1}}{Z_{D1} + Z_1 + nZ_{E1}} \quad \text{Equação 3.6}$$

4 O EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO DO RELÉ MHO TIPICAMENTE POLARIZADO

Neste capítulo os modos típicos de polarização do relé Mho serão apresentados numa abordagem puramente matemática. Cada modo típico de polarização singela será apresentado e as equações dos comparadores de fase tipo cosseno de cada um dos seis *loops* do relé Mho poderão ser visualizadas, inicialmente em sua composição em termos de tensões, como mostra de forma genérica a **Equação 4.1**.

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} \end{cases} \quad \text{Equação 4.1}$$

Cada termo da **Equação 4.1** será substituído pela equação de tensão e pela equação de corrente correspondente, de acordo com cada *loop* de falta e com o tipo da polarização utilizada. Essas equações de tensões e correntes são as mesmas apresentadas no capítulo anterior, definidas para cada tipo de falta clássica. Após essas substituições, cada termo será dividido pela corrente do próprio *loop* e depois intensa manipulação algébrica, a qual não será aqui apresentada em razão da limitação de número de páginas imposta a uma dissertação de mestrado, chega-se enfim à configuração do comparador de fases tipo cosseno em termos de impedância, conforme já exposto de forma generalizada na **Equação 2.5**. Portanto, ao final deste capítulo cada *loop* de falta do relé Mho polarizado em cada um dos três modos típicos abordados neste estudo terá seu comparador de fases tipo cosseno devidamente equacionado em termos de impedâncias. Este equacionamento permitirá corroborar os resultados obtidos nas simulações que serão apresentadas no capítulo 5. A identidade entre os resultados equacionados e os resultados simulados permitirá confirmar que os dois métodos foram configurados adequadamente.

Um relé Mho é dito “polarizado de forma singela” quando utiliza somente um tipo de polarização. Esta é a forma que o relé Mho será analisado neste estudo. Os relés comerciais não são polarizados de forma singela, e sim por uma mescla dos três modos típicos ou variações desses mesmos modos típicos com implementações próprias de cada fabricante. A opção por estudar o relé Mho na forma singela ocorreu por motivos didáticos, com o objetivo evidenciar as vantagens e desvantagens de cada um dos três modos típicos de polarização.

4.1 Autopolarização

Um relé Mho autopolarizado utiliza como sinal de referência em cada um dos seus seis *loops* de falta a própria tensão medida por aquele *loop*. Por exemplo, o *loop* AB tem como tensão de polarização a própria tensão V_{AB} e o *loop* AT utiliza a tensão V_{AT} . Assim, o comparador de fases do relé Mho autopolarizado pode ser genericamente escrito como:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} \end{cases} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

- $\dot{V}_{Loop}$ = Tensão do próprio *loop*, medida durante a falta.
- l = Multiplicador para definição da quantidade de tensão de polarização utilizada.

A autopolarização já foi bastante usada nos relés de sistemas de distribuição em função dos custos. Apesar de suas limitações, ela dá a solução direcional mais clara, já que fica mais fácil definir o *loop* em falta. Isso é uma vantagem no caso de faltas complexas ou múltiplas [19]. É necessário ter em mente que durante faltas diretamente à frente ou atrás do ponto onde estão instalados os TPs, a impedância de falta tende a zero, o que impossibilita uma decisão segura sobre a direção da falta. Em relés eletromecânicos de bobina móvel ou mesmo em relés estáticos, a mínima tensão que lhes permitia uma decisão confiável para a direcionalidade ficava em torno de 0,1 volt. Para relés ainda mais antigos essa tensão era de no mínimo 1,0 volt [3]. A região onde a decisão segura acerca da direcionalidade já não é mais possível é chamada de “zona morta”. Para essas tensões de curto-circuito extremamente pequenas, a única solução residia na pré-seleção da direção da falta. Na Alemanha, os relés utilizavam uma pré-seleção para frente de modo a garantir o *trip* durante faltas próximas. Um risco introduzido com isso era que quando uma linha era fechada sob falta, todos os demais relés da barra emitiam *trip*. Em outros países a escolha era pela pré-seleção da direção reversa [3].

Como a autopolarização utiliza as tensões e correntes de mesma fase nas equações do comparador de fases tipo cosseno, ela acaba por não ser eficaz durante faltas sólidas próximas, já que a tensão da respectiva fase em falta iria tender a zero, o que impossibilitaria o relé de definir pela sua direção. Isso é o mesmo que dizer que a impedância de falta ficaria sobre o lugar geométrico da característica de operação do relé Mho, estando assim em limiar de operação, já que não se encontra nem dentro e nem fora da característica circular Mho.

4.1.1 - Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente

4.1.1.1 Loop AB Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.3}$$

4.1.1.2 Loop BC Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.4}$$

4.1.1.3 Loop CA Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.5}$$

4.1.1.4 Loop AT Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.6}$$

4.1.1.5 Loop BT Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (I_E^{Fase B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase B} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.7}$$

4.1.1.6 Loop CT Autopolarizado Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase C Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} = (I_E^{Fase C} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase C} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.8}$$

4.1.2 - Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente

4.1.2.1 Loop AB Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1 - a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1 - a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \end{cases} \quad \text{Equação 4.9}$$

4.1.2.2 Loop BC Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.10}$$

4.1.2.3 Loop CA Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a - 1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a - 1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \end{cases} \quad \text{Equação 4.11}$$

4.1.2.4 Loop AT Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} n Z_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} n Z_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \end{cases} \quad \text{Equação 4.12}$$

4.1.2.5 Loop BT Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (I_E^{Fase B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase B} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} n Z_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} n Z_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \end{cases} \quad \text{Equação 4.13}$$

4.1.2.6 Loop CT Autopolarizado Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase C Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} = (I_C + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase C} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} n Z_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} n Z_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \end{cases} \quad \text{Equação 4.14}$$

4.1.3 - Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente

4.1.3.1 Loop AB Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} \\ \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} \\ + \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.15

4.1.3.2 Loop BC Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.16

4.1.3.3 Loop CA Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$$

Equação 4.17

4.1.3.4 Loop AT Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.18

4.1.3.5 Loop BT Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (I_E^{Fase B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase B} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a^2 - a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} - \\ \frac{(a^2 - 1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' = \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a^2 - a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \\ \frac{(a^2 - 1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \end{array} \right.$$

Equação 4.19

4.1.3.6 Loop CT Autopolarizado Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho autopolarizado:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{Fase\ C\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (\dot{I}_E^{Fase\ C} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase\ C} \end{array} \right.$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \frac{a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a - a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} - \\ \frac{(a - 1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' = \frac{a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a - a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \\ \frac{(a - 1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \end{array} \right.$$

Equação 4.20

4.1.4 - Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

4.1.4.1 Loop AB Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho autopolarizado:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{array} \right.$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{(C_1 + C_2 C)}{(C_1 + a C_2 C)} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{(1 + C)}{(C_1 + a C_2 C)} R_\phi \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{(C_1 + C_2 C)}{(C_1 + a C_2 C)} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{(1 + C)}{(C_1 + a C_2 C)} R_\phi = Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.21

4.1.4.2 Loop BC Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi = Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.22

4.1.4.3 Loop CA Autopolarizado Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi = Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.23

4.1.5 - Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa

4.1.5.1 Loop AB Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.24}$$

4.1.5.2 Loop BC Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.25}$$

4.1.5.3 Loop CA Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.26}$$

4.1.5.4 Loop AT Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (i_E^{Fase A} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.27}$$

4.1.5.5 Loop BT Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (i_E^{Fase B} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase B} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.28}$$

4.1.5.6 Loop CT Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho autopolarizado:

$$\begin{cases} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase C Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} = (i_E^{Fase C} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase C} \end{cases}$$

Fazendo l igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.29}$$

4.2 Polarização Singela Por Tensão de Quadratura

A análise das equações finais dos comparadores de fase tipo cosseno de todos os *loops* de falta do relé Mho autopolarizado, sob cada uma das faltas clássicas, permite concluir que sob faltas sólidas próximas os *loops* correspondentes a cada tipo de falta perdem a capacidade de definir a direção do curto-circuito. Em termos de impedância, o sinal de referência torna-se igual à própria impedância medida, que tende a zero para faltas sólidas próximas. Logo, apesar de funcionar perfeitamente para faltas que não sejam muito próximas, a autopolarização não garante a estabilidade e segurança ao relé Mho polarizado em qualquer tipo de falta.

Uma solução que busca preencher essa lacuna é a chamada polarização cruzada, ou polarização por tensão de quadratura. A polarização cruzada utiliza tensões de fases sãs para compor a tensão de polarização de cada *loop*, adequadas em módulo e ângulo de forma a se assemelhar à própria tensão medida pelo *loop* na condição pré-falta. Assim o comparador de fases tipo cosseno passa a ter as seguintes expressões numa apresentação genérica:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = qk \dot{V}_{Extra-Loop}^{S\tilde{a}(s)} \end{cases} \quad \text{Equação 4.30}$$

Onde:

- q = Multiplicador para definição da quantidade de tensão de polarização utilizada.
- k = Número complexo que adequa em módulo e ângulo a tensão para a polarização.
- $\dot{V}_{Extra-Loop}^{S\tilde{a}(s)}$ = Tensão diferente da medida pelo próprio *loop*, seja de fase ou de linha.

O nome “polarização cruzada” vem do fato de que a tensão que é utilizada no sinal de referência sempre está num ângulo reto com a própria tensão medida no *loop*. Por exemplo, o *loop* AT é polarizado pela tensão V_{BC} e considerando que a tensão da fase A está na origem a tensão V_{BC} está em -90° . O mesmo ocorre com os demais pares de tensões. Assim, numa falta monofásica entre a fase A e a terra, o *loop* AT é polarizado pela tensão V_{BC} , que não está envolvida na falta e não terá seu módulo reduzido a ponto de inviabilizar a definição da direcionalidade. Essas afirmações serão confirmadas no capítulo 5, quando todos os *loops* de falta de um relé Mho polarizado de forma singela por tensão de quadratura serão expostos aos quatro tipos de faltas clássicas. É importante notar o aparecimento da impedância Z_S no sinal S_2'' quando a falta não é trifásica. Esta impedância Z_S é chamada de impedância da fonte atrás do relé e é responsável pela variação do diâmetro da característica de operação do relé Mho.

4.2.1 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

4.2.1.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase\ C} (\sqrt{3}\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.31}$$

4.2.1.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase\ A} (\sqrt{3}\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.32}$$

4.2.1.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase\ B} (\sqrt{3}\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.33}$$

4.2.1.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ A\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ A} = (\dot{I}_E^{Fase\ A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{BC} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.34}$$

4.2.1.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ B\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} = (\dot{I}_E^{Fase\ B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{CA} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.35}$$

4.2.1.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (I_E^{Fase\ C} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{AB} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.36}$$

4.2.2 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

4.2.2.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \sqrt{3} \dot{V}_E^{Fase\ C} (1 \angle -90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a C_2} n Z_1 + \frac{3 C_2}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{(a^2 - 3a - 1) C_2}{(a - 1)(C_1 + a C_2)} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a C_2} n Z_1 + \frac{3 C_2}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a C_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.37

4.2.2.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase\ A} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{2C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.38}$$

4.2.2.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase B} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2 C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2 C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{(3a^2 - a + 1)C_2}{(a^2 - 1)(C_1 + a^2 C_2)} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2 C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2 C_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.39

4.2.2.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{Fase A comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{BC}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) \\ S_2'' = \frac{2C_2}{C_2 - C_1} Z_{E2} + \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} \right) \end{cases} \quad \text{Equação 4.40}$$

4.2.2.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ B\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} = (i_E^{Fase\ B} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{CA}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{(3a^2 - a + 1)C_2}{(a - a^2)(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.41

4.2.2.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (i_E^{Fase\ C} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{AB}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{(4 - a^2)C_2}{(a - 1)(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.42

4.2.3 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

4.2.3.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q\sqrt{3}\dot{V}_E^{Fase\ C} (1 \angle -90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \\ \quad \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \\ \quad \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F + \frac{2(1-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(a-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} \end{cases}$$

Equação 4.43

4.2.3.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase A} (\sqrt{3}\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \left(\frac{2C_2}{C_2 - C_1} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_2 - C_1} Z_{E0} \right) + \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \right. \\ \quad \left. \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.44

4.2.3.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase B} (\sqrt{3}\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left\{ \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2 - a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \right. \\ \left. \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \right\} \\ S_2'' = \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2 - a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \\ \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F + \frac{2(1-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(a^2 - a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} \end{cases}$$

Equação 4.45

4.2.3.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{BC}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{2C_2}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \\ \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.46

4.2.3.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (\dot{I}_E^{Fase B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{CA}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a^2 - a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} - \\ \frac{(a^2 - 1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' = \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a^2 - a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \\ \frac{(a^2 - 1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F + \\ \frac{(a - a^2 - 1)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} \end{array} \right.$$

Equação 4.47

4.2.3.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (i_E^{Fase\ C} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{AB}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{array} \right.$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \frac{a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a - a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} - \\ \frac{(a - 1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' = \frac{a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a - a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \\ \frac{(a - 1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F + \\ \frac{(a^2 - a + 1)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} \end{array} \right.$$

Equação 4.48

4.2.4 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

4.2.4.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q\sqrt{3}\dot{V}_E^{Fase\ C}(1\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] \\ S_2'' = \left[\frac{(3a - a^2 + 1)C_2 C}{(1 - a)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{C_0(1 - C)}{a(C_1 + a C_2 C)} Z_{E0} \right] + \\ \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] \end{cases}$$

Equação 4.49

4.2.4.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q\dot{V}_E^{Fase\ A}(\sqrt{3}\angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) \\ S_2'' = \left[\frac{2 C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} + \frac{C_0(1 - C)}{C_1 + C_2 C} Z_{E0} \right] + \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) \end{cases}$$

Equação 4.50

4.2.4.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase B} (\sqrt{3} \angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1+C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] \\ S_2'' = \left[\frac{(3a^2 - a + 1) C_2 C}{(1-a^2)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{C_0(1-C)}{a^2(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E0} \right] + \\ \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1+C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] \end{cases}$$

Equação 4.51

4.2.5 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

4.2.5.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_{AB} Z_R - \dot{V}_{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \sqrt{3} \dot{V}_C (1 \angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \end{cases}$$

Equação 4.52

4.2.5.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase A} (\sqrt{3} \angle - 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] \\ S_2'' = - \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \end{cases} \quad \text{Equação 4.53}$$

4.2.5.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase B} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] \\ S_2'' = - \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \end{cases} \quad \text{Equação 4.54}$$

4.2.5.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{BC}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] \\ S_2'' = - \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \end{cases} \quad \text{Equação 4.55}$$

4.2.5.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ B\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} = (I_E^{Fase\ B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{CA}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \end{cases} \quad \text{Equação 4.56}$$

4.2.5.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado em quadratura:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (I_E^{Fase\ C} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \frac{\dot{V}_E^{AB}}{\sqrt{3}} (1 \angle 90^\circ) \end{cases}$$

Fazendo q igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] \\ S_2'' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \end{cases} \quad \text{Equação 4.57}$$

4.3 Polarização Singela Por Tensão de Memória

Pode-se adiantar que no caso de um curto-circuito trifásico sólido próximo aos TPs, esteja a falta à frente ou atrás dos transdutores de corrente, o relé Mho autopolarizado e o relé Mho polarizado por tensão de quadratura não são eficazes para garantir uma correta e segura atuação. Em um curto-circuito trifásico, sólido e próximo aos TPs, as tensões das três fases tendem a zero e não há tensão de fase a ser utilizada no sinal de referência do comparador de fases. Para contornar esse problema, a polarização por tensão pré-falta memorizada continua sendo um método tradicional e seguro, garantindo a correta atuação do relé de distância Mho nas condições de faltas mais severas. O comparador de fases tipo cosseno, polarizado por tensão de memória, apresenta a seguinte característica generalizada:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_{Loop}^{Memória} \end{cases} \quad \text{Equação 4.58}$$

Onde:

- $\dot{U}_{Loop}^{Memória}$ = Tensão do próprio *loop*, medida e memorizada antes da falta.
- m = Multiplicador para definição da quantidade de tensão de polarização utilizada.

Ao se utilizar a equação da tensão do próprio *loop* memorizada na condição pré-falta como tensão de polarização e dividir todos as parcelas dos sinais S_1'' e S_2'' da **Equação 4.58** pela corrente do *loop*, chega-se às equações que compõem o comparador de fases tipo cosseno em termos de impedância, que podem ser representadas de forma genérica pela **Equação 2.5**.

Desde a época dos relés eletromecânicos, uma providência para dar ao relé a condição de decisão em condição de faltas próximas foi tomada pelo uso da ação de memória, ou seja, a manutenção de uma amostra da tensão pré-falta por um tempo suficiente, de modo a assegurar a correta atuação do relé de distância. A implementação da ação de memória utilizava, para os relés analógicos, circuitos ressonantes na frequência fundamental [19]. Nesses relés o circuito “descarregava” nas unidades de medida a tensão previamente armazenada na condição pré-falta, propiciando ao relé a tensão de polarização no sinal de referência que expandia a característica de operação e em seguida colapsava novamente para a origem dos eixos ao fim da tensão armazenada (**Figura 4.1**). Nos relés digitais, os sinais amostrados de tensão são constantemente armazenados (memorizados) em um *buffer* para serem utilizados pelo relé em situações onde a tensão medida tenha seu módulo reduzido a um número inferior a um valor

definido pelo fabricante. Nesse momento então o relé passa a utilizar desses fasores amostrados e memorizados para tomar a decisão de *trip* ou não.

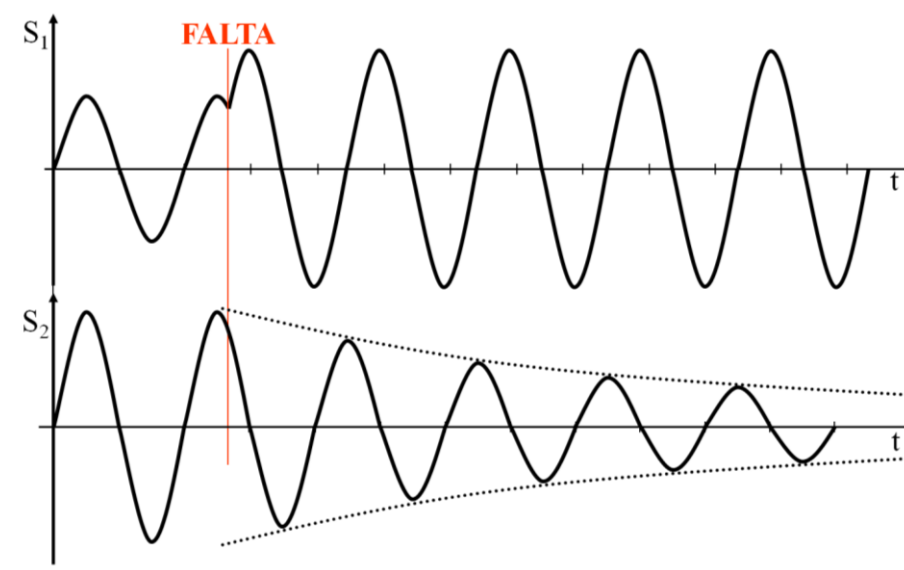


Figura 4.1: A ação de memória para uma falta sólida próxima. [19]

A utilização da tensão de memória pode ser feita de forma singela, isto é, utilizando somente os fasores pré-falta memorizados para compor o sinal S'_2 , ou um percentual desta tensão, somada com um sinal autopolarizado ou cruzado. A tensão de memória é de particular importância durante o fechamento do disjuntor sob falta trifásica (normalmente quando a linha está aterrada e os TPs encontram-se na LT) onde não há disponibilidade de tensão de fase sã. A utilização de tensão de memória entre 10 a 20% de tensão nominal é suficiente para garantir a operação do relé nesse caso. A utilização de tensão de memória de módulo igual a 100% da tensão nominal é, entretanto, necessária em linhas com compensação série, já que nessa condição a tensão de curto-circuito pode ser invertida e ter sinal negativo em relação à tensão de memória. Para uma detecção de falta seletiva, a tensão memorizada precisa ser maior que a maior tensão de curto-circuito com sentido negativo esperada [3].

Uma vez que não há necessidade de se impor retardo intencional para a atuação do relé de distância durante faltas sólidas e próximas, internas à área de operação da característica Mho, o recurso habitualmente empregado consiste em manter o sinal de tensão com frequência nominal por alguns ciclos, mesmo que a tensão primária medida seja nula. A capacidade de armazenar a tensão pré-falta recebe a denominação genérica de “ação de memória” e é muito simples de ser aplicada a comparadores de fase do tipo cosseno, produzindo características de operação completamente previsíveis [2].

4.3.1 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

4.3.1.1 Loop AB Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.59}$$

4.3.1.2 Loop BC Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.60}$$

4.3.1.3 Loop CA Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.61}$$

4.3.1.4 Loop AT Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.62}$$

4.3.1.5 Loop BT Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (I_E^{Fase B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase B} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.63}$$

4.3.1.6 Loop CT Polarizado Por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica à Frente (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase C Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} = (I_E^{Fase C} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase C} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.1**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.64}$$

4.3.2 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

4.3.2.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(1 - a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} - \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{C_1}{C_1 + aC_2} Z_{E1} + \frac{3C_2}{(1 - a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F - \frac{(a^2 + 2)C_2}{(1 - a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} \end{cases}$$

Equação 4.65

4.3.2.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} \right) + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.66}$$

4.3.2.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2 C_2} n Z_1 - \frac{3 C_2}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2 C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + a^2 C_2} Z_{E1} + \frac{(a+2)C_2}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2)} Z_{E2} \right] + \\ \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2 C_2} n Z_1 - \frac{3 C_2}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2 C_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.67

4.3.2.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} n Z_1 + \frac{2 C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 - C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_2 - C_1} Z_{E2} \right) + \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} n Z_1 + \frac{2 C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) \end{cases}$$

Equação 4.68

4.3.2.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (I_E^{Fase B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase B} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{aC_1}{aC_1 - C_2} Z_{E1} + \frac{(a^2 + 1)C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.69

4.3.2.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica à Frente (BC)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C_{Comp}} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (I_E^{Fase\ C} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase\ C} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.2**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 - aC_2} Z_{E1} + \frac{(a + 1)C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] \end{cases}$$

Equação 4.70

4.3.3 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

4.3.3.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \\ \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(1-a^2)C_1}{3(C_1 + C_2)} Z_{E1} + \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \\ \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F + \frac{(1-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} \end{array} \right.$$

Equação 4.71

4.3.3.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{V}_E^{BC} \end{array} \right.$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{C_1}{C_1 - C_2} Z_{E1} - \frac{C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \right. \\ \left. \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \end{array} \right.$$

Equação 4.72

4.3.3.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{V}_E^{CA} \end{array} \right.$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a^2 - a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \\ \quad \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \left[\frac{(1-a)C_1}{3(C_1 + C_2)} Z_{E1} + \frac{(1-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} \right] + \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \\ \quad \frac{(a^2 - a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \end{array} \right.$$

Equação 4.73

4.3.3.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (I_E^{Fase A} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{V}_E^{Fase A} \end{array} \right.$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] \\ \quad + \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \end{array} \right.$$

Equação 4.74

4.3.3.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase B Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} = (I_E^{Fase B} + k_0 I_N) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{V}_E^{Fase B} \end{array} \right.$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{aligned} S_1'' &= Z_R - \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a^2 - a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} - \\ &\quad \frac{(a^2 - 1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' &= \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{a^2C_1}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E1} + \\ &\quad \frac{(a^2 - a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a^2 - 1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} + \\ &\quad \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F + \frac{aC_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \\ &\quad \frac{C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} \end{aligned} \right.$$

Equação 4.75

4.3.3.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica à Frente (AT)

Seja o comparador de fases do loop CT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\left\{ \begin{aligned} S_1'' &= \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C_{Comp}} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (i_E^{Fase\ C} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' &= \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase\ C} \end{aligned} \right.$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.3**, vem:

$$\left\{ \begin{aligned} S_1'' &= Z_R - \frac{a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a - a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} - \\ &\quad \frac{(a - 1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' &= \frac{a[C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{aC_1}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E1} + \\ &\quad \frac{(a - a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a - 1)C_0}{maC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} + \\ &\quad \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F + \frac{a^2C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \\ &\quad \frac{C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} \end{aligned} \right.$$

Equação 4.76

4.3.4 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

4.3.4.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{AB} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + a C_2 C} Z_{E1} + \frac{(a^2 + 2) C_2 C}{(a^2 - 1)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} \right] + \\ \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] \end{cases}$$

Equação 4.77

4.3.4.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{BC} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2 C} Z_{E1} + \frac{C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} \right) + \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.78

4.3.4.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra à Frente (BCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{CA} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.4**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1+C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + a^2 C_2 C} Z_{E1} + \frac{(a+2)C_2 C}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} \right] + \\ \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a-1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1+C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] \end{cases}$$

Equação 4.79

4.3.5 - Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

4.3.5.1 Loop AB Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_D^{AB} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 4.80

4.3.5.2 Loop BC Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = i_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_D^{BC} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.81}$$

4.3.5.3 Loop CA Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop CA do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_D^{CA} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.82}$$

4.3.5.4 Loop AT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop AT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase A Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_D^{Fase A} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\emptyset \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.83}$$

4.3.5.5 Loop BT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do loop BT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ B\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} = (I_E^{Fase\ B} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_D^{Fase\ B} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.84}$$

4.3.5.6 Loop CT Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa (ABCT)

Seja o comparador de fases do *loop* CT do relé Mho polarizado por tensão de memória:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_E^{Fase\ C\ Comp} Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} = (I_E^{Fase\ C} + k_0 I_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase\ C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_D^{Fase\ C} \end{cases}$$

Fazendo m igual a 1 e utilizando os valores de tensão e corrente da **Tabela 3.5**, vem:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 4.85}$$

5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO RELÉ MHO TIPICAMENTE POLARIZADO

Após abordar os modos típicos de polarização do relé Mho, o próximo objetivo é criar uma modelagem computacional do relé Mho polarizado. Um sistema elétrico de topologia idêntica ao da **Figura 3.1** é modelado no *software* de cálculo de curto-circuito *One Liner*®. Após a execução de faltas selecionadas no *One Liner*®, arquivos tipo texto com todos os dados resultantes desses curtos-circuitos são gerados. Um programa criado em *Matlab*® lê esses arquivos de falta e utiliza os dados de tensão e corrente para modelar relés de distância tipo Mho, polarizados nos modos típicos. A visualização do comportamento da característica de operação do relé Mho é disponibilizada na tela de várias formas, seja com a apresentação de todos os seis *loops* de falta ao mesmo tempo ou cada um dos *loops* separadamente.

5.1 O Sistema Elétrico Modelado

A **Figura 5.1** mostra o sistema que foi modelado no *software One Liner*®.



Figura 5.1: Sistema elétrico modelado no software OneLiner®.

O sistema elétrico da **Figura 5.1** apresenta as impedâncias em *pu*, nas bases de 100 MVA e 138 kV. Para poder simular faltas reversas foram criadas linhas com impedâncias iguais aos dos equivalentes das fontes à esquerda e à direita da linha central e as fontes foram inseridas com impedâncias transitórias, subtransitórias e síncronas iguais a 0,00001 pu, configurando uma modelagem de barra infinita.

A **Tabela 5.1** traz as informações mais importantes do sistema. A **Tabela 5.2** é um exemplo de como é o arquivo texto que o *OneLiner*® disponibiliza os dados de curto-circuito.

A **Figura 5.2** apresenta janelas para a configuração das linhas de transmissão. Janelas similares permitem a inclusão dos geradores e demais componentes do sistema.

Tabela 5.1: Impedâncias do sistema analisado.

IMPEDÂNCIAS DO SISTEMA ESTUDADO			
Z_R	$(0,00956 + j0,00440)pu$	$(1,821 + j8,384)\Omega_{prim}$	$(8,579\angle 77,75^\circ)\Omega_{prim}$
Z_1	$(0,01195 + j0,05503)pu$	$(2,276 + j10,480)\Omega_{prim}$	$(10,724\angle 77,75^\circ)\Omega_{prim}$
Z_2	$(0,01195 + j0,05503)pu$	$(2,276 + j10,480)\Omega_{prim}$	$(10,724\angle 77,75^\circ)\Omega_{prim}$
Z_0	$(0,05167 + j0,19250)pu$	$(9,840 + j36,660)\Omega_{prim}$	$(37,957\angle 74,97^\circ)\Omega_{prim}$
Z_{E1}	$(0,00396 + j0,02913)pu$	$(0,754 + j5,548)\Omega_{prim}$	$(5,599\angle 82,26^\circ)\Omega_{prim}$
Z_{E2}	$(0,00396 + j0,02913)pu$	$(0,754 + j5,548)\Omega_{prim}$	$(5,599\angle 82,26^\circ)\Omega_{prim}$
Z_{E0}	$(0,01091 + j0,04645)pu$	$(2,078 + j8,846)\Omega_{prim}$	$(9,087\angle 76,78^\circ)\Omega_{prim}$
Z_{D1}	$(0,00731 + j0,06186)pu$	$(1,392 + j11,781)\Omega_{prim}$	$(11,863\angle 83,26^\circ)\Omega_{prim}$
Z_{D2}	$(0,00731 + j0,06186)pu$	$(1,392 + j11,781)\Omega_{prim}$	$(11,863\angle 83,26^\circ)\Omega_{prim}$
Z_{D0}	$(0,01627 + j0,08038)pu$	$(3,098 + j15,308)\Omega_{prim}$	$(15,618\angle 78,56^\circ)\Omega_{prim}$

Tabela 5.2: Exemplo do arquivo texto que o programa OneLiner® disponibiliza.

1. Interm. Fault on: 0 S 138.kv - 0 G 138.kv 1L 3LG 1.00%															
+ SEQ			- SEQ			0 SEQ			A PHASE			B PHASE		C PHASE	
17514.0@ -81.9			0.0@ 0.0			0.0@ 0.0			17514.0@ -81.9			17514.0@ 158.1		17514.0@ 38.1	
0.64314+j4.50346			0.64369+j4.50396			1.86167+j7.81733									

Transmission Line Data
ESQUERDA 138.kv - REMOTA-E 138.kv
Name=|Equiv. Esq. Ckt ID=|1
Length=|0| km Type |
Branch Parameters
R=|0.00396| X=|0.02913| Recompute from table
R0=|0.01091| X0=|0.04645|
G1=|0| B1=|0| G2=|0| B2=|0|
G10=|0| B10=|0| G20=|0| B20=|0|
Current Ratings (A)
A: |0| B: |0| C: |0| D: |0|
I²T Rating =|0| Amp² Sec
Metered at: |ESQUERDA 138.kv|
Memo:
Equivalente do sistema à esquerda da LT central, protegida pelo relé Mho em questão.
Tags: |None|
Mutuals... OK Cancel Help
Last changed Jul 22, 2014

Transmission Line Data
ESQUERDA 138.kv - DIREITA 138.kv
Name=|LT Central Ckt ID=|1
Length=|22.8| km Type |
Branch Parameters
R=|0.01195| X=|0.05503| Recompute from table
R0=|0.05167| X0=|0.1925|
G1=|0| B1=|0| G2=|0| B2=|0|
G10=|0| B10=|0| G20=|0| B20=|0|
Current Ratings (A)
A: |0| B: |0| C: |0| D: |0|
I²T Rating =|0| Amp² Sec
Metered at: |ESQUERDA 138.kv|
Memo:
Linha de transmissão protegida pelo relé Mho estudado.
Tags: |None|
Mutuals... OK Cancel Help
Last changed Jul 22, 2014

Transmission Line Data
DIREITA 138.kv - REMOTA-D 138.kv
Name=|Equiv. Dir. Ckt ID=|1
Length=| | km Type |
Branch Parameters
R=|0.00731| X=|0.06186| Recompute from table
R0=|0.01627| X0=|0.08038|
G1=|0| B1=|0| G2=|0| B2=|0|
G10=|0| B10=|0| G20=|0| B20=|0|
Current Ratings (A)
A: |0| B: |0| C: |0| D: |0|
I²T Rating =|0| Amp² Sec
Metered at: |DIREITA 138.kv|
Memo:
Equivalente do sistema à direita da LT central, a qual é protegida pelo relé Mho estudado aqui.
Tags: |None|
Mutuals... OK Cancel Help
Last changed Apr 01, 2014

Figura 5.2: Janela com entrada de dados de LT no programa One Liner®.

5.2 O Programa para Simulação do Relé Mho

O programa desenvolvido no *Matlab*® para simular o comportamento do relé de distância, quando chamado à execução apresenta uma barra de botões igual à da **Figura 5.3**:



Figura 5.3: Tela inicial do programa de simulação do relé Mho.

O primeiro passo é a escolha do arquivo texto com os dados da falta, obtidos do programa de cálculo de curto-circuito. Isso pode ser feito clicando na caixa “**Leitura Dados Aspen**”. Passa-se então para a escolha do tipo de polarização. As opções são “**Autopolarização**”, “**Tensão de Memória**” e “**Tensão de Quadratura**”, “**Tensão de Sequência Positiva**”, “**Tensão Mista**” e também o botão “**Todos**”. Somente as três primeiras opções serão utilizadas neste estudo (**Figura 5.3**).

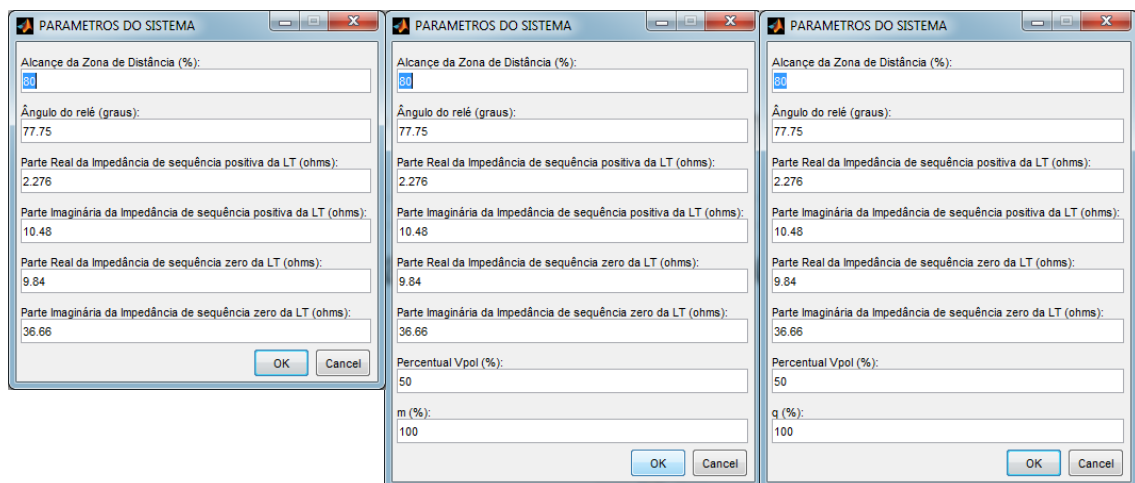


Figura 5.4: Caixa de entrada da Autopolarização, Polarização por Quadratura e Polarização por Memória.

As caixas que definem os dados para a simulação dos três modos típicos de polarização singela (**Figura 5.4**) permitem escolher o alcance percentual que terá o relé Mho em relação à linha protegida, além dos dados de impedância dessa linha. Quando se escolhe as polarizações por quadratura e por tensão de memória, o relé somente irá utilizar um desses métodos de polarização se a tensão medida em cada *loop* cair abaixo de um valor estabelecido nas caixas acima, que é o “*Percentual Vpol (%)*”. Caso a tensão num determinado *loop* de falta não cair abaixo do valor escolhido o relé continua a operar como autopolarizado, isso é, continua a utilizar a tensão e a corrente do *loop* escolhido. Quando o relé está operando no modo autopolarizado a característica de operação está na cor preta, mas assim que a tensão medida

no *loop* cai abaixo do valor estabelecido em “*Percentual Vpol (%)*” o relé passa a utilizar a respectiva tensão do modo de polarização escolhido e a característica de operação passa a ter a cor magenta. Além disso, a segunda e a terceira caixa da **Figura 5.4** trazem os parâmetros “*m (%)*” e “*q (%)*”, respectivamente. O fator “*m (%)*” define o percentual da tensão memorizada que será utilizada pelo relé e o fator “*q (%)*” o percentual de tensão de quadratura. Escolher 100% do fator “*m (%)*” ou do fator “*q (%)*” resulta em utilizar toda a tensão de memória ou toda a tensão de quadratura no sinal S_2 .

Carregado o arquivo de falta selecionado e definida a polarização escolhida, o programa trata os dados e desenha na tela os seis *loops* de falta no plano de impedâncias. Se a opção for observar cada *loop* separadamente, pode-se clicar nos botões correspondentes (**Figura 5.5**).



Figura 5.5: Apresentação do menu após a escolha do modo de polarização singela.

Esse estudo não tem a pretensão de criar um *software* de um relé de distância que opere de forma similar aos dos relés comerciais. O objetivo é puramente didático e para tanto o foco aqui está sobre os esquemas de polarização singela. Cada fabricante define detalhes em seus programas que nem sempre são divulgados, sendo tratados como segredos industriais. Deseja-se apenas compreender melhor como um relé Mho polarizado de forma singela tem sua característica de operação afetada em condições de falta diversas, como ele “enxerga” a impedância da falta e comparar o resultado de cada um dos tipos de polarização singela típica. Outro objetivo é comparar os resultados obtidos nessa implementação computacional com as equações apresentadas no capítulo anterior.

5.3 Polarizações Singelas e Faltas

A seguir serão apresentados os resultados das simulações dos quatro tipos de faltas clássicas na LT e também de curto-circuito trifásico reverso, atrás dos TCs, primeiro com o relé na condição de autopolarização, depois polarizado por tensão de quadratura e por último polarizado por tensão de memória. As simulações são efetuadas nas condições de curtos-circuitos metálicos e também com a presença de resistência de falta. Todos os *loops* de falta serão visualizados em cada uma das simulações de curto-circuito e aqueles que apresentarem comportamentos notáveis terão seus desempenhos mais detalhadamente avaliados.

5.3.1 - Autopolarização

A composição dos sinais do comparador de fases tipo cosseno para o relé autopolarizado em termos de tensões é:

$$\begin{cases} S_1'' = \dot{V}_{Operação} = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = \dot{V}_{Loop} \end{cases}$$

O programa em *Matlab*® lê a tensão e a corrente referente a cada um dos seis *loops* de falta do arquivo texto gerado pelo *OneLiner*® e depois substitui esses valores nas equações dos respectivos comparadores de fases tipo cosseno que modelam o relé Mho autopolarizado. As equações genéricas do comparador de fases tipo cosseno autopolarizado em termos de impedâncias estão na **Equação 5.1**.

$$\begin{cases} S_1'' = \frac{\dot{I}_{Loop} Z_R}{\dot{I}_{Loop}} - \frac{\dot{V}_{Loop}}{\dot{I}_{Loop}} = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{\dot{V}_{Loop}}{\dot{I}_{Loop}} = Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 5.1}$$

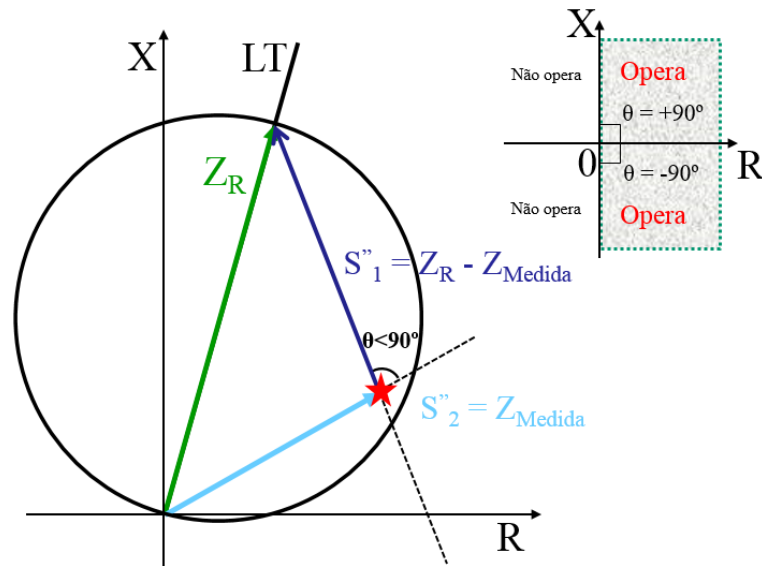


Figura 5.6: Característica de operação do relé Mho autopolarizado.

A **Figura 5.6** apresenta a característica de operação do relé Mho autopolarizado. As cores utilizadas na figura acima são as mesmas utilizadas pelo programa criado no *Matlab*®.

Os elementos da figura estão descritos logo abaixo:

- Z_R = Impedância réplica ou alcance do relé Mho.
- LT = Impedância total da linha de transmissão.
- S_1'' = Sinal de operação do comparador de fases tipo cosseno.
- S_2'' = Sinal de referência do comparador de fases tipo cosseno.
- Z_{Medida} = Impedância medida pelo relé de proteção

Caso a impedância medida, representada pela estrela na cor vermelha, fique sobre o lugar geométrico representado pela circunferência, o ângulo entre os sinais de operação e de referência será igual a 90° . Para ângulos menores que 90° a impedância medida estará dentro da característica de operação do relé Mho e para ângulos maiores que 90° a impedância medida ficará fora da característica de operação. Portanto, a decisão de operação do relé Mho é definida pelo ângulo entre os dois sinais.

À medida que a falta caminha para próximo do ponto onde estão instalados os transdutores de tensão do relé Mho polarizado, tem-se a impedância medida na **Figura 5.6** caminhando para próximo da origem dos eixos. Se a falta não apresenta nenhuma resistência adicional, a impedância medida caminharia sobre o lugar geométrico definido pela impedância réplica Z_R .

As simulações apresentadas a seguir permitem compreender as vantagens e deficiências de um relé Mho autopolarizado. O relé polarizado dessa forma utiliza tensão e corrente de mesma(s) fase(s) em cada um dos seis comparadores de fase. Os *loops* AB, BC, CA, AT, BT e CT utilizam respectivamente os seguintes pares de tensões e correntes: V_{AB} e I_{AB} , V_{BC} e I_{BC} , V_{CA} e I_{CA} , V_{AT} e I_{Acomp} , V_{BT} e I_{Bcomp} e finalmente V_{CT} e I_{Ccomp} . Dessa forma, se por exemplo ocorrer uma falta entre as fases A e B, o comparador de fases do *loop* AB verá sua corrente aumentar e sua tensão diminuir. Se esse curto-circuito for metálico e bem próximo aos TPs que alimentam o relé Mho, a tensão V_{AB} deverá tender a zero, comprometendo a medição no *loop*, pois o sinal de referência em termos de tensão tende a zero. Se a mesma análise for feita em termos de impedância, o sinal de referência tende ao infinito e o sinal de operação a menos infinito, o que também não ajuda a fazer com que o relé opere.

Adianta-se que os resultados simulados são plenamente compatíveis com o equacionamento definido no capítulo 4 e isso permitirá concluir que a abordagem matemática desenvolvida é robusta e que uma análise preliminar das equações dos comparadores de fase tipo cosseno de cada *loop* possibilita em muitos casos antever qual será o comportamento do relé Mho.

5.3.1.1 Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica na LT (ABCT)

Tabela 5.3: Equações do comparador cosseno para relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico.

Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Tensões e Correntes)	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = i_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (i_E^{Fase A} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase A} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (i_E^{Fase B} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase B} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (i_E^{Fase C} + k_0 i_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase C} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.1.1.1 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, sem Resistência de Falta

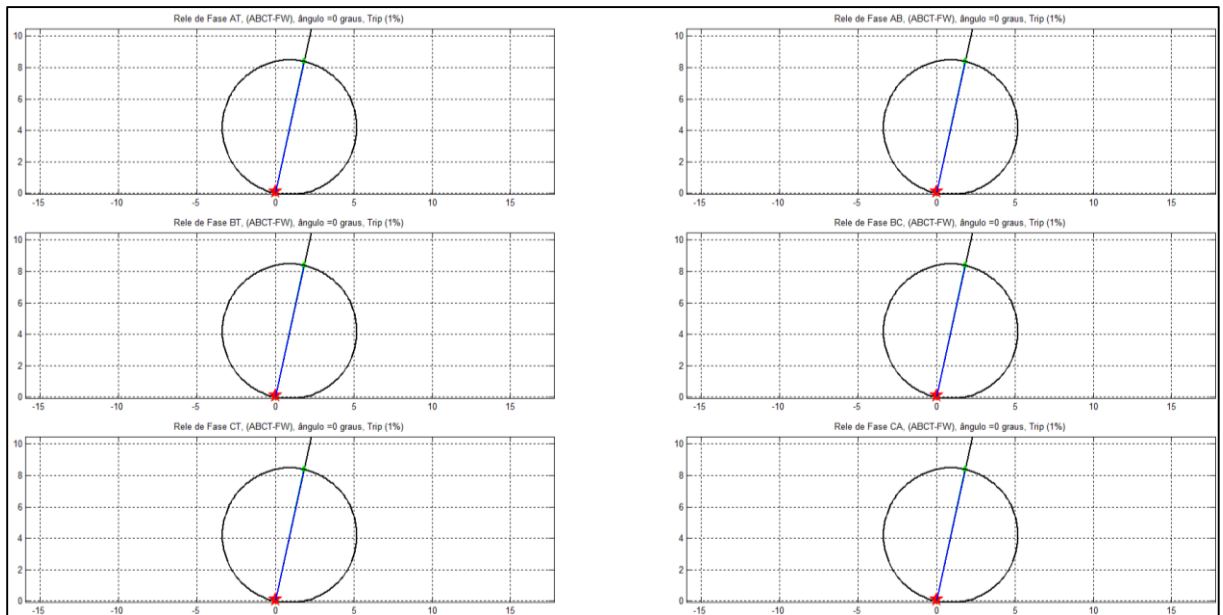


Figura 5.7: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico a 1% da LT, sem resistência de falta.

As características de operação da **Figura 5.7** corroboram os resultados da **Tabela 5.3**.

Todos os *loops* comportam-se de forma idêntica e definem pelo *trip*, mas em um relé comercial isso não ocorreria, pois os *loops* de terra seriam bloqueados por não apresentarem corrente residual medida acima de um limiar de ajuste que precisa ser parametrizado.

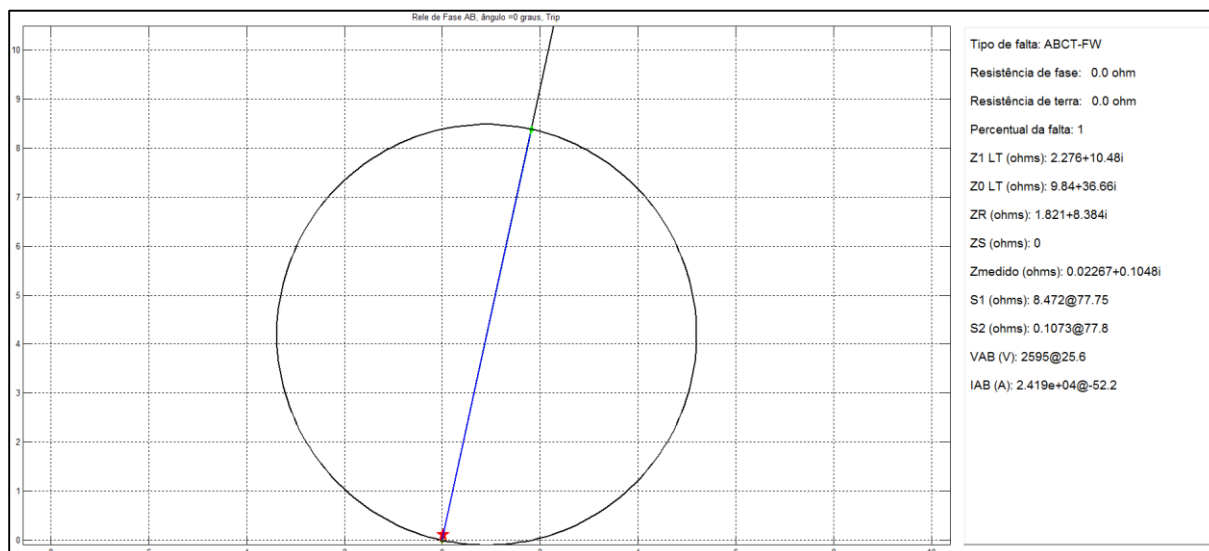


Figura 5.8: Loop AB do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A **Figura 5.8** apresenta a característica de operação do *loop* AB autopolarizado para uma falta a 1% da LT. A impedância medida calculada pelo programa é justamente 1% da impedância da LT e ela se encontra sobre o lugar geométrico que a representa.

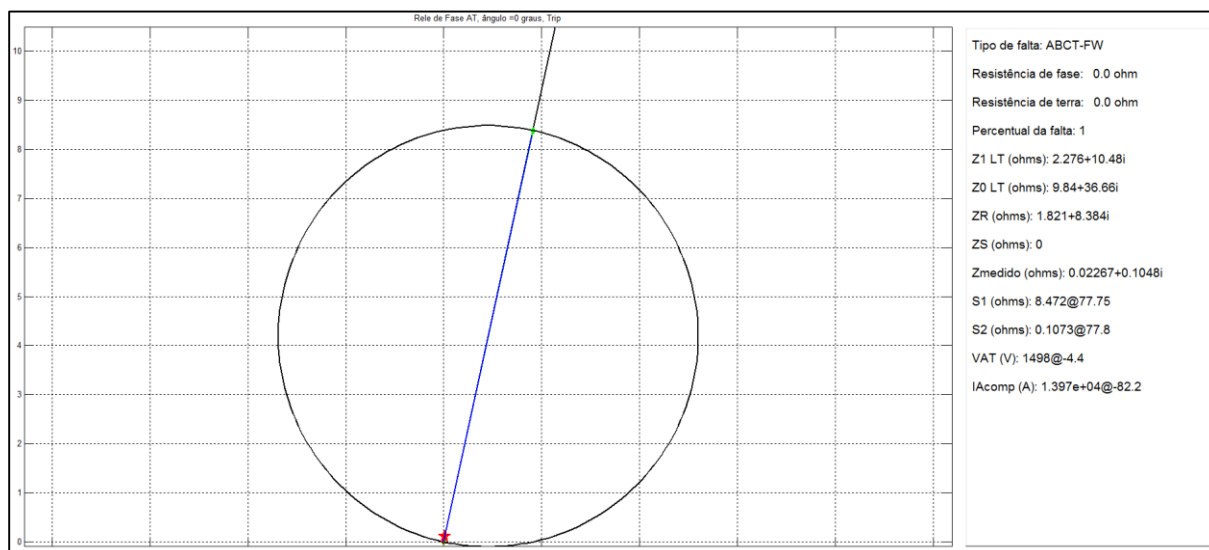


Figura 5.9: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Vê-se na **Figura 5.9** que as impedâncias calculadas pelo programa para o *loop* AT são idênticas às do *loop* AB (**Figura 5.8**), o que confere com o equacionamento exposto no capítulo 4 e também apresentado na **Tabela 5.3**.

5.3.1.1.2 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, com 2 Ω de Resistência de Falta

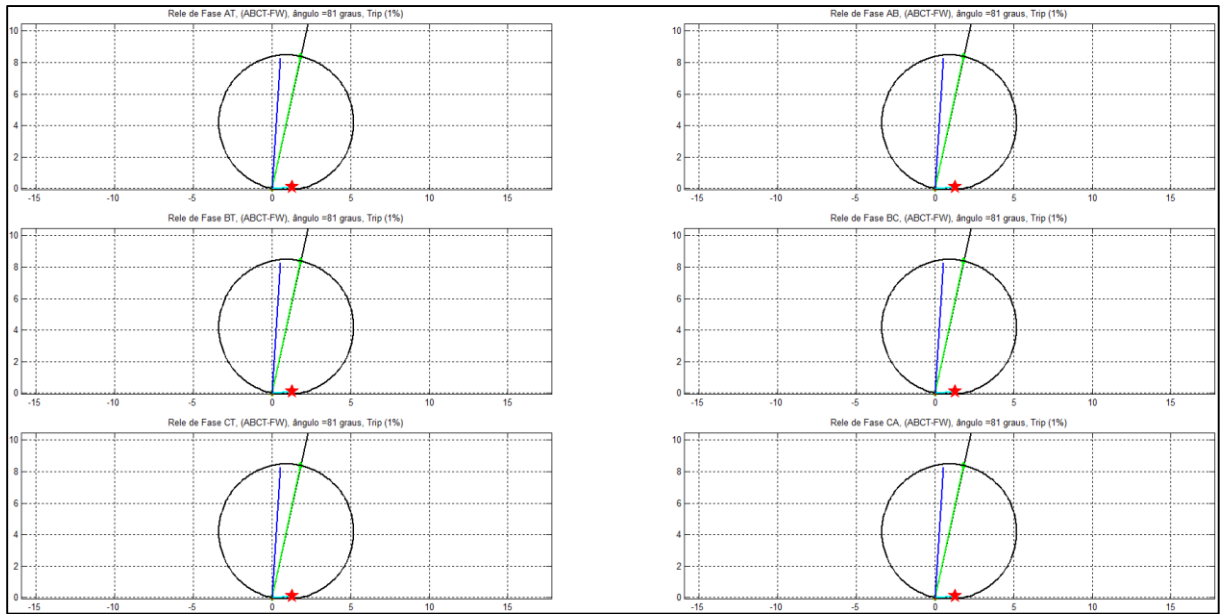


Figura 5.10: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).

Apenas 2 ohms de resistência de falta deixam a impedância medida perto do limiar de operação da característica do relé Mho autopolarizado. As características de operação de todos os *loops* são idênticas, mantendo o comportamento previsto pelas equações da **Tabela 5.3**.

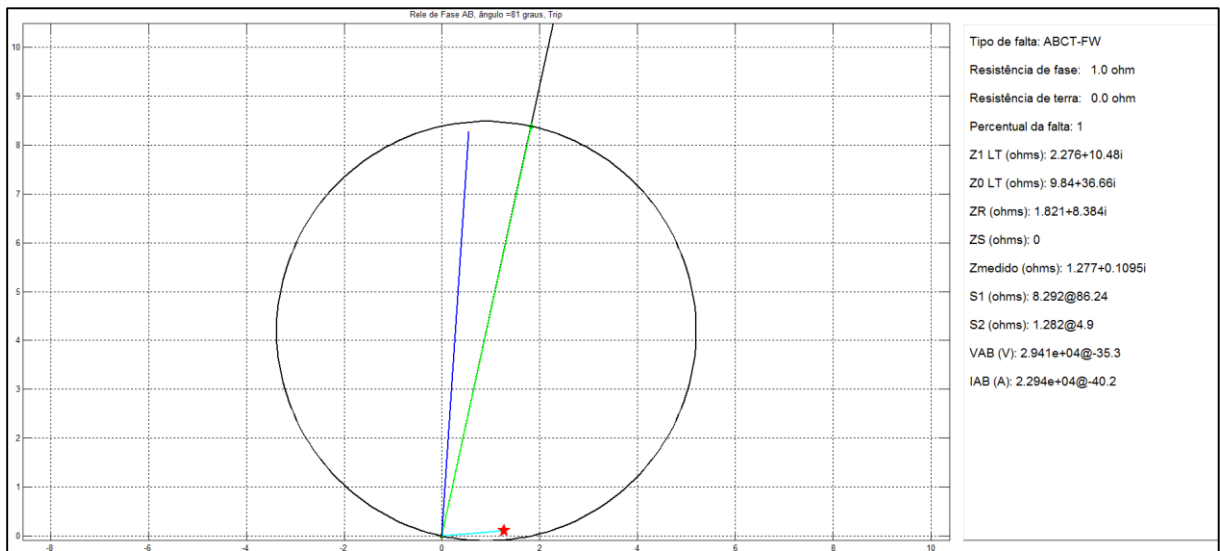


Figura 5.11: Loop AB do relé Mho autopolarizado sob falta trifásica a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).

Na **Figura 5.11** a impedância medida fica bem próxima ao limiar de operação da característica, apesar de a resistência ser de apenas 2 ohms. Os resultados obtidos nessa simulação também são concordantes com as equações da **Tabela 5.3**.

5.3.1.2 Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica (BC)

Tabela 5.4: Equações do comparador cosseno para relé Mho autopolarizado sob curto-circuito bifásico (BC).

AUTOPOLARIZAÇÃO [CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.1.2.1 Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

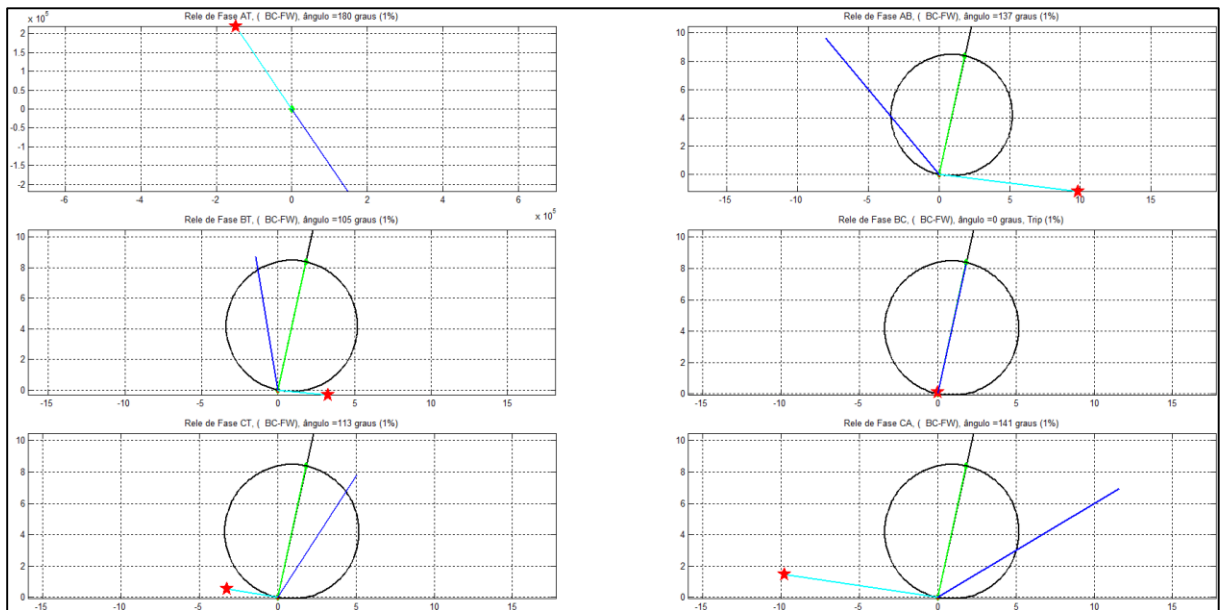


Figura 5.12: Relé Mho autopolarizado sob falta bifásica (BC) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

As impedâncias medidas pelos *loops* BT e CT estão simetricamente dispostas em relação ao lugar geométrico que representa a LT. O mesmo ocorre com os *loops* AB e CA.

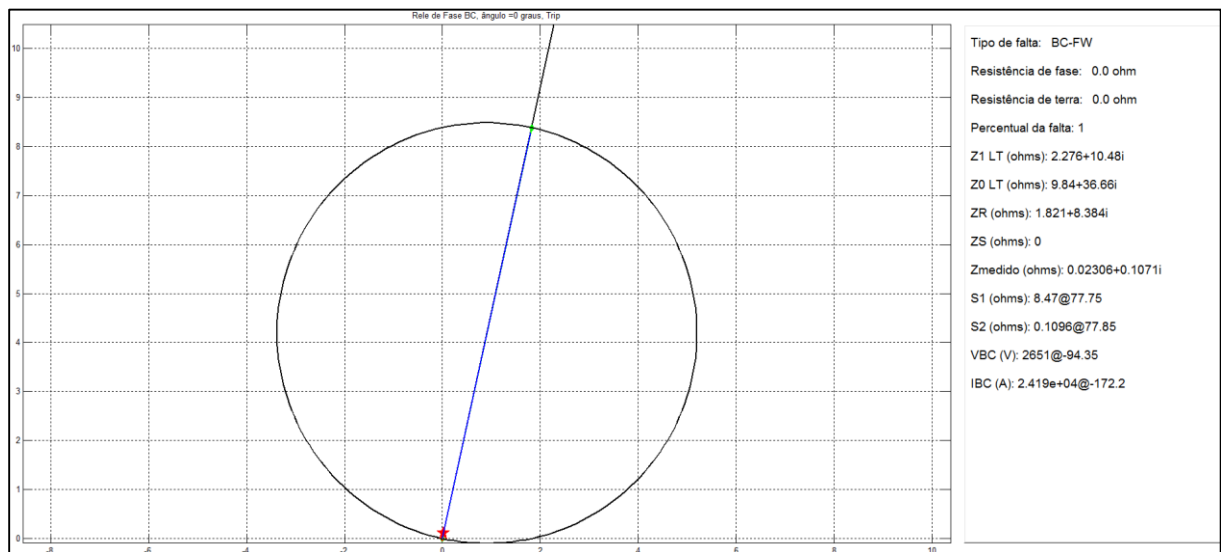


Figura 5.13: Loop BC do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito bifásico (BC) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Na ausência de resistência de falta, a impedância medida calculada pelo programa é 1% do valor da impedância da LT e localiza-se sobre a reta que a representa (**Figura 5.13**) e consequentemente dentro da característica de operação, apesar de muito próxima ao limiar de operação.

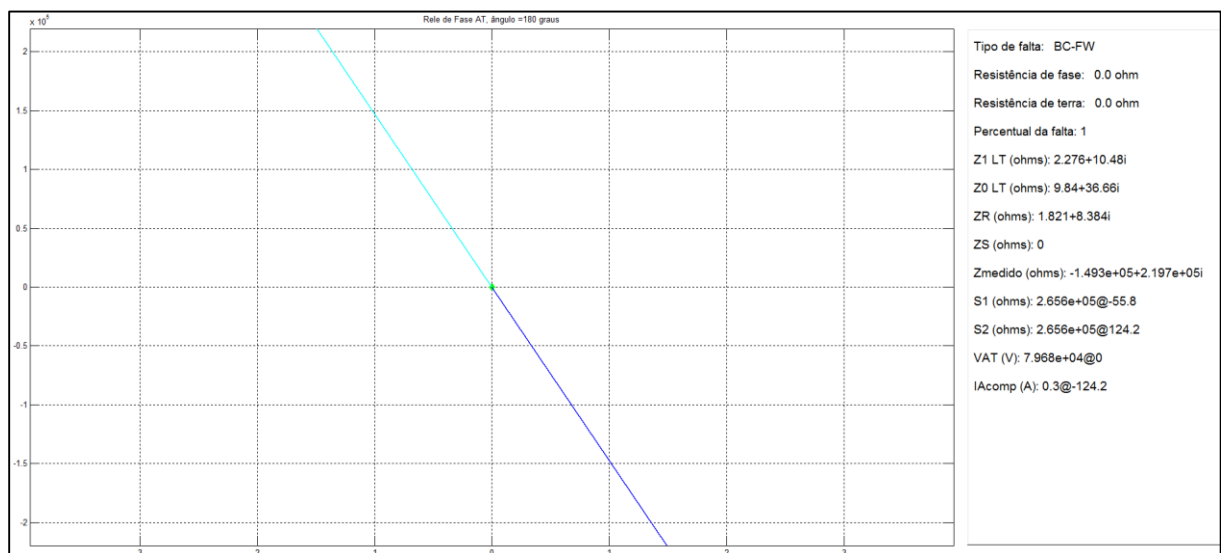


Figura 5.14: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito bifásico (BC) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A impedância medida pelo *loop* AT tende ao infinito (**Figura 5.14**). Como os divisores de corrente dos circuitos de sequência positiva e negativa têm valores idênticos, a impedância medida calculada pelo programa confere com o resultado da **Equação 4.12**.

5.3.1.2.2 Curto-circuito Bifásico (BC) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$)

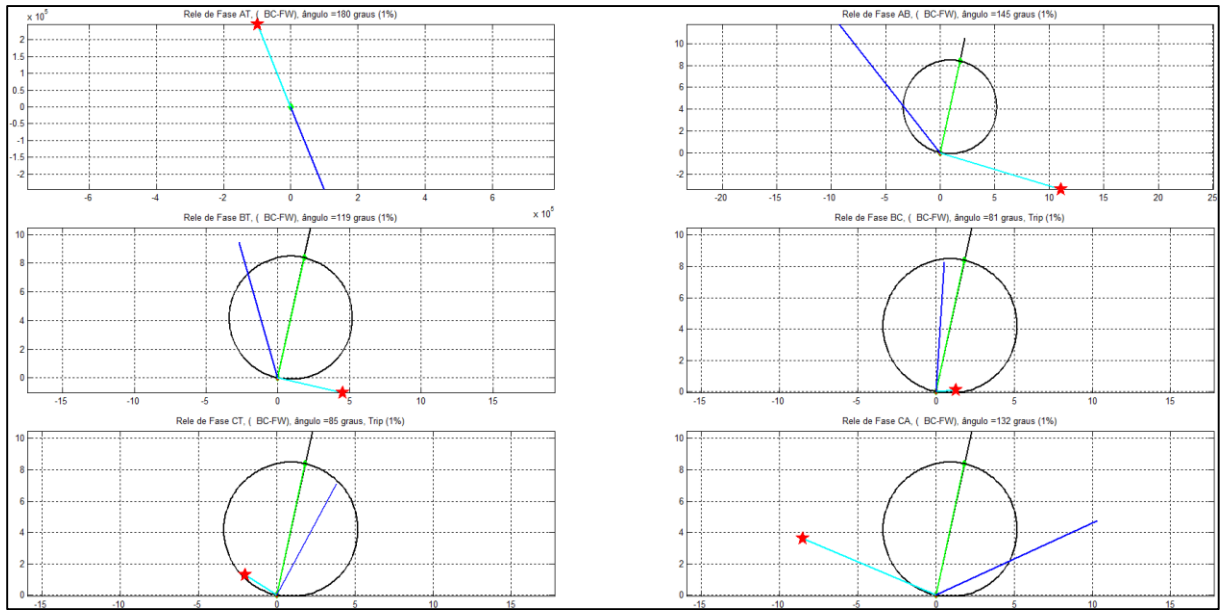


Figura 5.15: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito bifásico (BC) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 2 \Omega$).

As impedâncias nos *loops* BT e CT já não apresentam a mesma simetria observada na simulação do curto-circuito bifásico sem resistência de falta. A impedância medida no *loop* CT “cai” dentro da característica de operação do relé Mho. Devido à resistência de falta, o módulo da impedância medida diminui no *loop* CT e aumenta no *loop* BT. Novamente o *trip* não seria permitido pelo *loop* monofásico, haja vista a ausência de corrente residual de sequência zero.

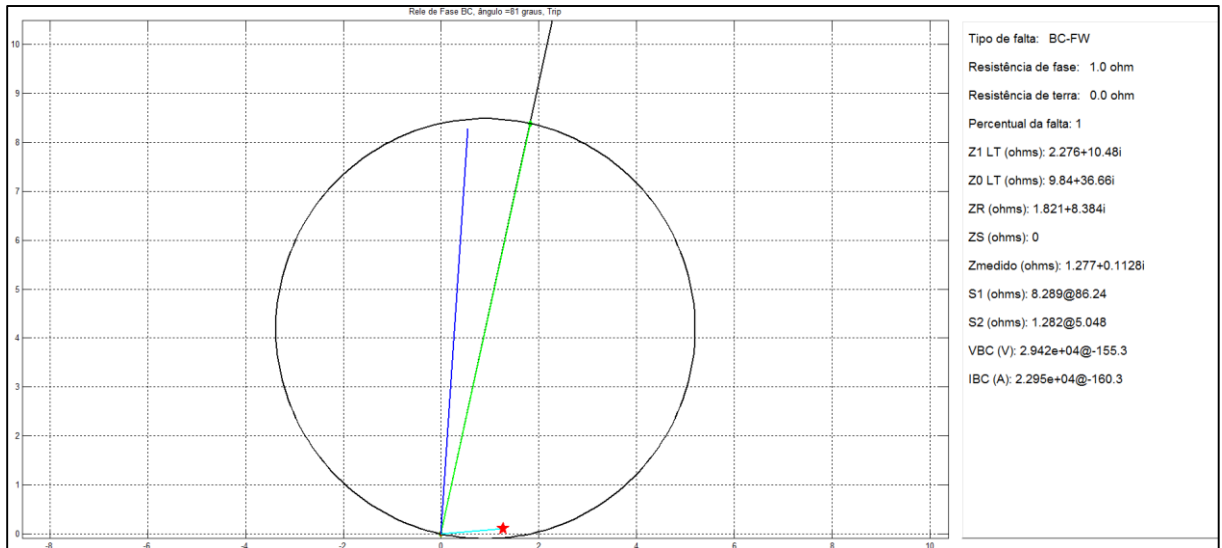


Figura 5.16: Loop BC do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica (BC) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).

A impedância medida pelo *loop* BC (**Figura 5.16**) tem o mesmo valor que a apresentada no curto-circuito trifásico com a mesma resistência de falta (**Figura 5.11**).

Da **Equação 4.4**, a impedância medida no *loop* BC para a falta trifásica é dada por:

$$Z_{Medida (Loop BC)}^{CC3\phi} = nZ_1 + \frac{R_F^{3\phi}}{C_1}$$

Já a impedância medida no *loop* BC (**Equação 4.10**) para a falta bifásica é:

$$Z_{Medida (Loop BC)}^{CC\phi\phi} = nZ_1 + \frac{R_F^{\phi\phi}}{C_1 + C_2}$$

Espera-se que as impedâncias medidas pelo *loop* BC em condições de curto-circuito trifásico e bifásico no mesmo ponto da LT e com a mesma resistência de falta sejam as mesmas, o que realmente ocorre, já que a resistência de falta no curto-circuito trifásico é igual à resistência de fase, pois só se utiliza o circuito de sequência positiva para a formulação. No curto-circuito bifásico a resistência de falta é duas vezes o valor da resistência de fase, pois conectam-se os circuitos de sequência positiva e negativa em paralelo. Reescrevendo a equação da impedância medida pelo *loop* BC no curto-circuito trifásico com base na **Figura 3.2**, vem:

$$Z_{Medida (Loop BC)}^{CC3\phi} = nZ_1 + \frac{R_F^{3\phi}}{C_1} = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1}$$

Fazendo o mesmo para o curto-circuito bifásico:

$$Z_{Medida (Loop BC)}^{CC\phi\phi} = nZ_1 + \frac{R_F^{\phi\phi}}{C_1 + C_2} = nZ_1 + \frac{2R_\phi}{2C_1} = nZ_1 + \frac{R_\phi}{C_1}$$

Portanto, a impedância medida nos dois casos é a mesma.

Vê-se que a simetria que existia na posição da impedância medida em relação à reta que representa a linha de transmissão já não ocorre na presença de resistência de falta. A impedância medida no *loop* CT apresenta módulo inferior ao medido pelo *loop* BT e se aproxima do lugar geométrico que define a LT. Enquanto isso a impedância medida no *loop* BT se afasta da LT.

Essa redução em módulo da impedância medida pelo *loop* BT faz com que ela venha a entrar na característica de operação, mas isso não representa risco de operação indevida desse *loop* de falta na condição de curto-circuito bifásico em aplicações reais, pois como não há corrente de sequência zero nesse caso, os *loops* de falta monofásicos não chegam ao *trip*.

A presença de resistência de falta faz com que a impedância medida nos *loops* BT e CT sejam rotacionadas no sentido anti-horário. Enquanto a primeira tende a sair da característica, a segunda tende a entrar com o aumento da resistência de falta.

5.3.1.3 Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Monofásica (AT)

Tabela 5.5: Equações do comparador cosseno para relé Mho autopolarizado sob falta monofásica (AT).

AUTOPOLARIZAÇÃO [CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO-TERRA (AT) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2'' = \frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a^2-a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} - \frac{(a^2-1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' = \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a^2-1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{a[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} - \frac{(a-1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \\ S_2'' = \frac{a[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a-1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$

5.3.1.3.1 Curto-circuito Monofásico (AT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

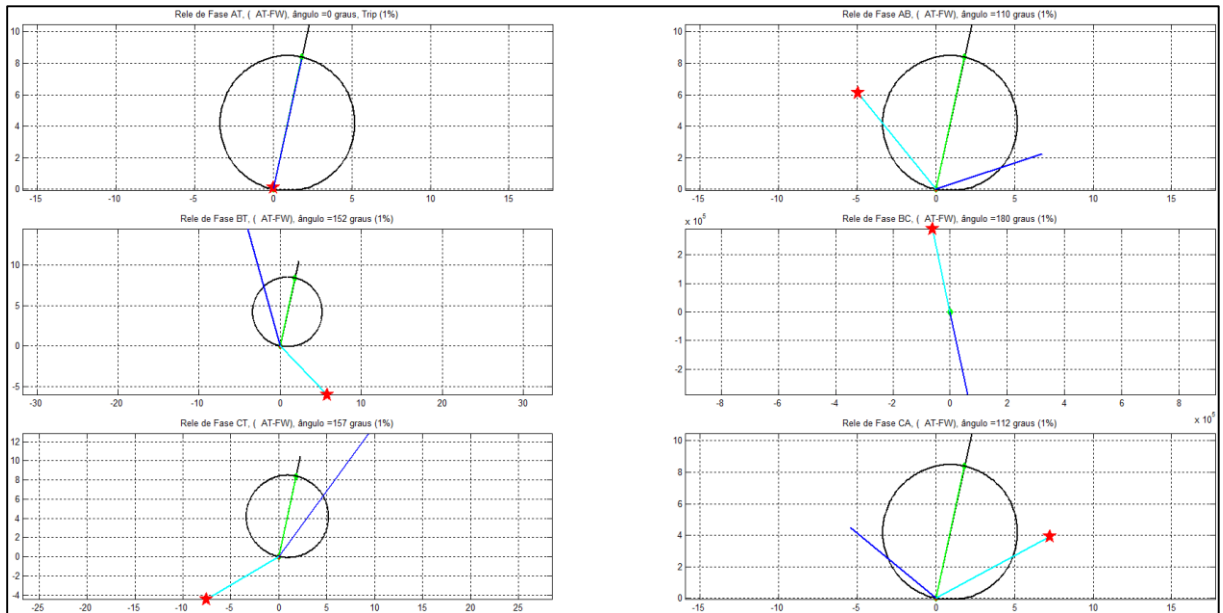


Figura 5.17: Relé Mho autopolarizado sob falta monofásica (AT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Como esperado, somente o *loop* AT chega ao *trip* e apresenta a impedância medida sobre o lugar geométrico definido pela LT, pois não há resistência de falta.

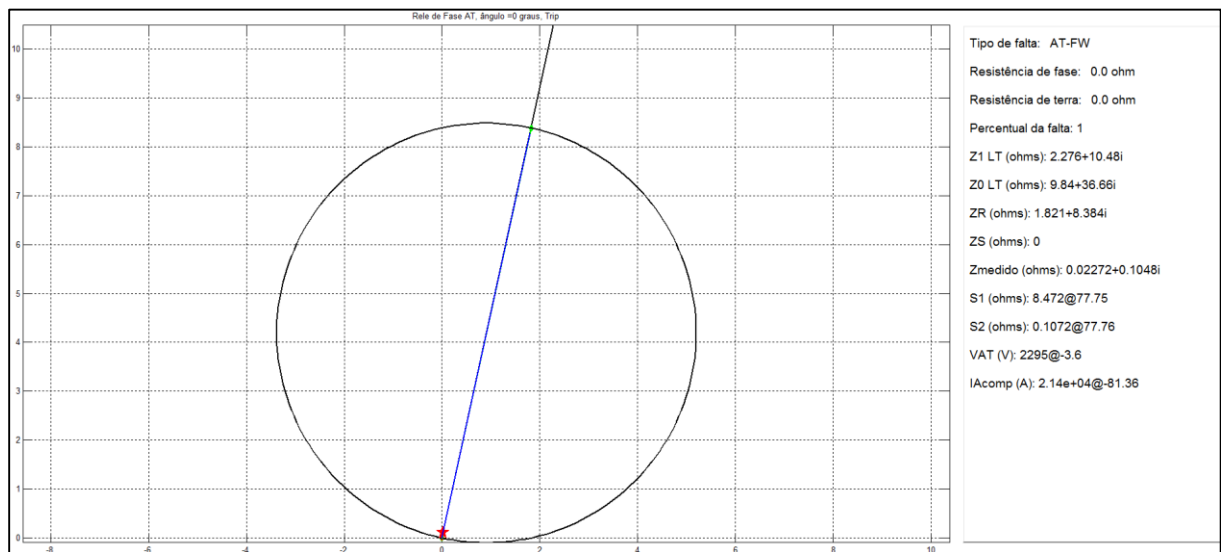


Figura 5.18: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito monofásico (AT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Nos *loops* de fase que envolvem a fase em falta, as impedâncias medidas aparecem simetricamente ao diâmetro da característica.

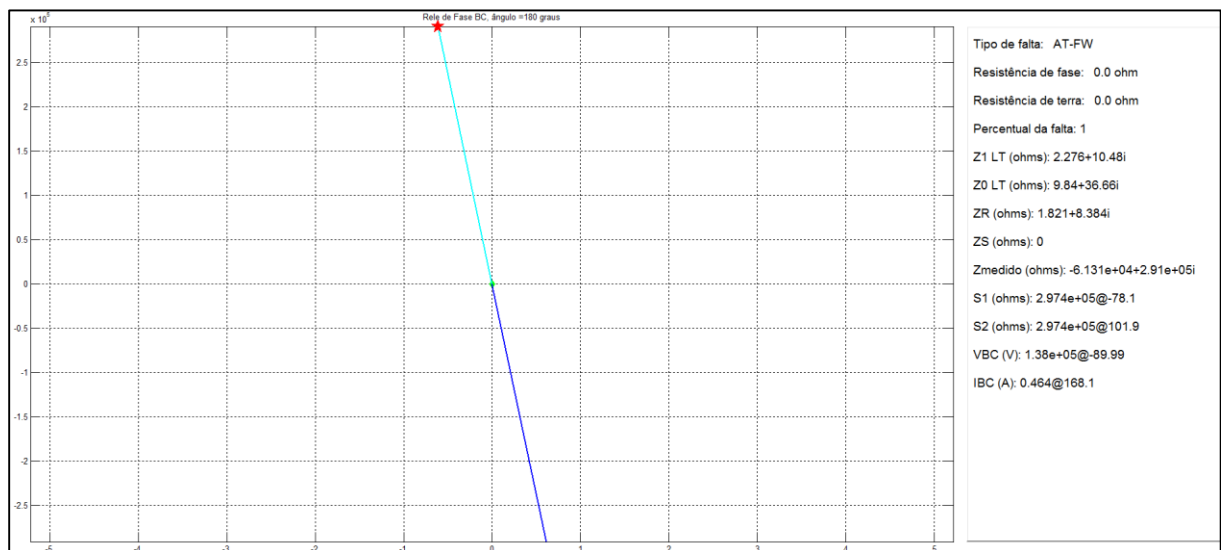


Figura 5.19: Loop BC do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito monofásico (AT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

No *loop* BC a impedância medida é enorme (**Figura 5.19**). Na **Equação 4.16** a impedância medida tem todos os seus denominadores compostos pela diferença entre C_1 e C_2 . Como no sistema analisado esses divisores de corrente têm valores idênticos, todos os denominadores tendem a zero, fazendo com que a impedância medida tenda ao infinito.

5.3.1.3.2 Curto-circuito Monofásico (AT) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 0 \Omega$ e $R_G = 2 \Omega$)

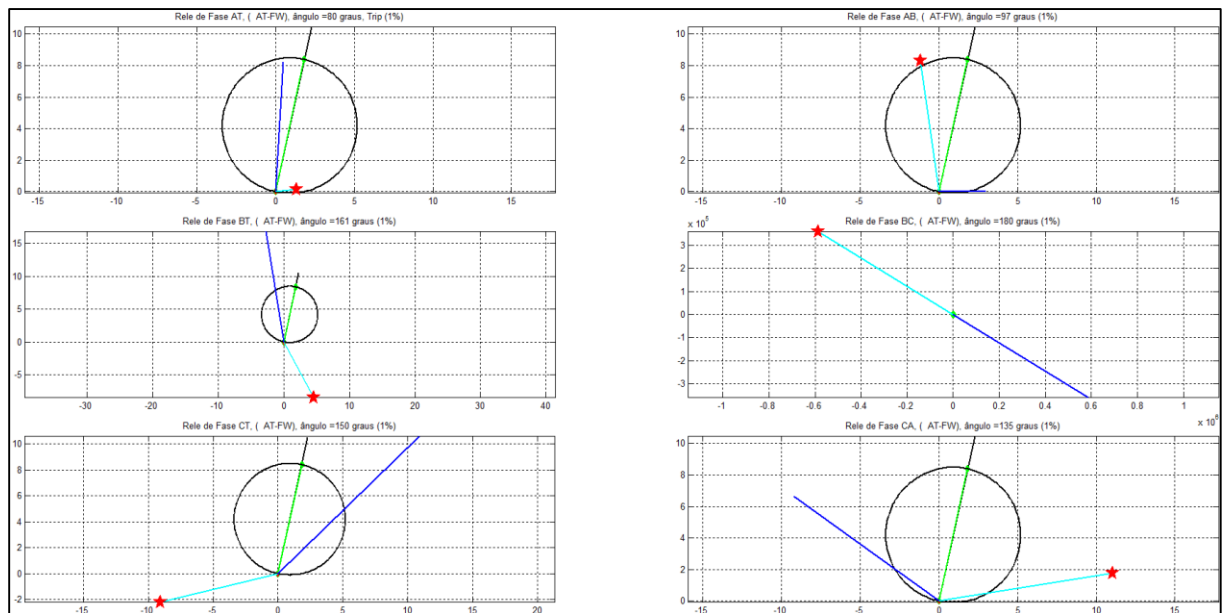


Figura 5.20: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito monofásico (AT) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$).

A resistência de falta destrói a simetria que ocorria em relação ao diâmetro da característica entre os *loops* BT e CT. O mesmo ocorre entre os *loops* AB e CA.

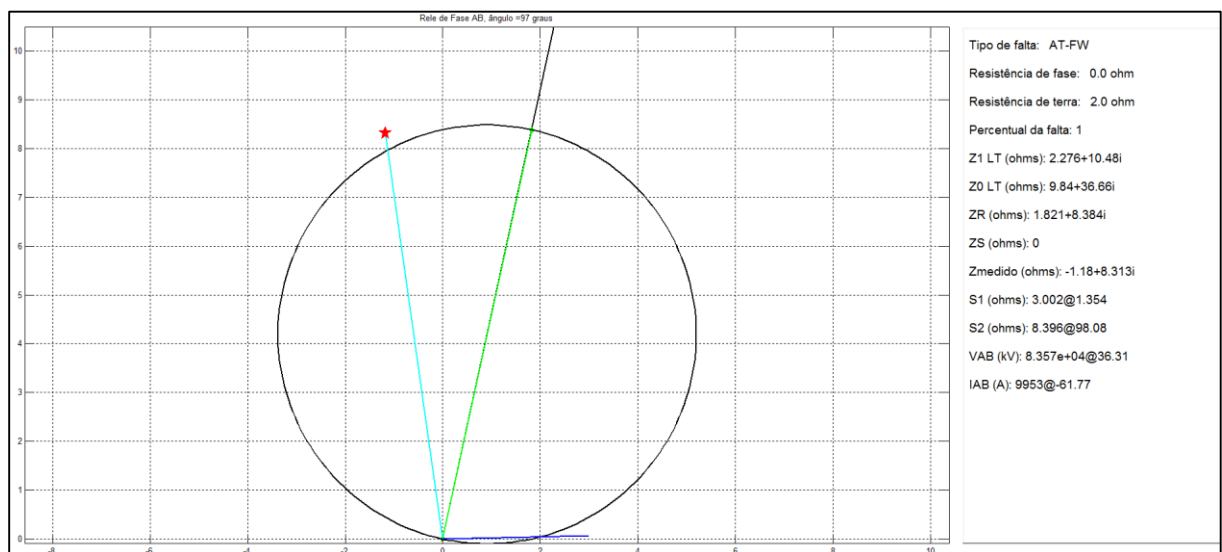


Figura 5.21: Loop AB do relé Mho autopolarizado sob falta monofásica (AT) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$.

A impedância medida fica bem próxima da característica de operação no *loop* AB (Figura 5.21). A implementação de um algoritmo de detecção de fase em falta é muito importante para evitar que o *trip* seja emitido pelo *loop* errado. Em linhas com religamento automático monopolar, o mesmo só ocorre em caso de operação de apenas um *loop* monofásico. Uma atuação indevida de um *loop* bifásico bloquearia o religamento automático indevidamente.

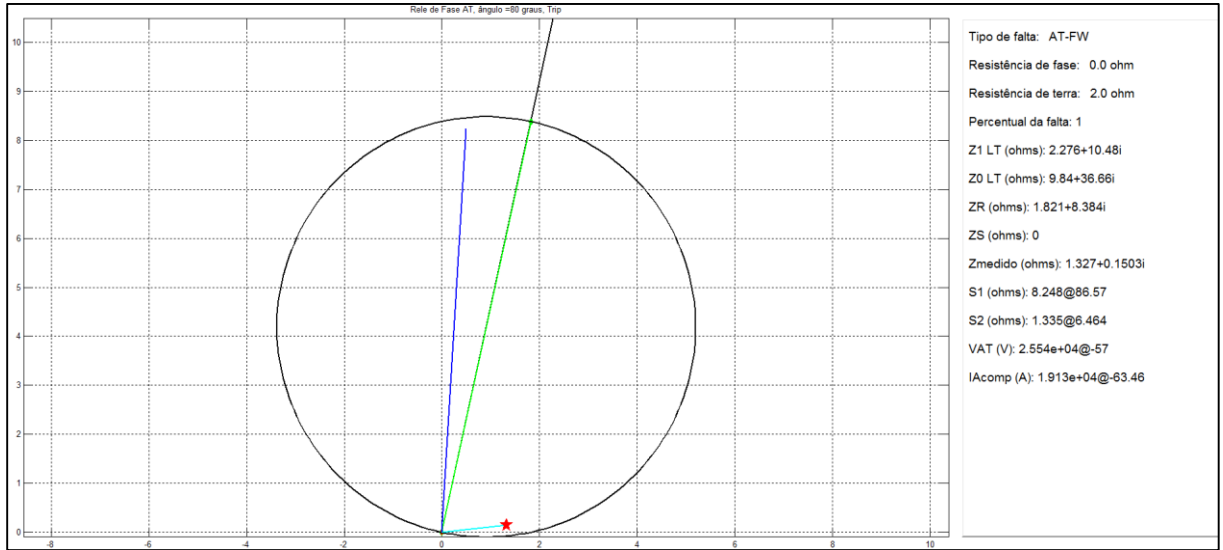


Figura 5.22: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob falta monofásica (AT) a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$.

A impedância de falta no loop AT (**Figura 5.22**) fica bem próximo do limiar de operação com apenas dois ohms de resistência de falta, mas o *trip* ainda ocorre. A equação da impedância medida pelo loop AT durante falta entre a fase A e a terra é:

$$S_2'' = nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F = Z_{Medida}$$

Sendo que:

$$C_1 = \frac{Z_{D1} + (1 - n)Z_1}{Z_{D1} + Z_1 + Z_{E1}} = 0,7974 - j0,0043$$

$$C_2 = \frac{Z_{D2} + (1 - n)Z_2}{Z_{D2} + Z_2 + Z_{E2}} = \frac{Z_{D1} + (1 - n)Z_1}{Z_{D1} + Z_1 + Z_{E1}} = 0,797 - j0,004$$

$$C_0 = \frac{Z_{D0} + (1 - n)Z_0}{Z_{D0} + Z_0 + Z_{E0}} = 0,8489 - j0,0015$$

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} = \frac{(9,840 + j36,660) - (2,276 + j10,480)}{3 \times (2,276 + j10,480)} = 0,8451 - j0,0571$$

Substituindo esses valores na equação da impedância medida:

$$S_2'' = 0,01 \times (2,276 + j10,480) + \frac{3}{4,5956 - j0,1592} \times 2 = 1,3268 + j0,1500 = Z_{Medida}$$

O resultado da equação é praticamente o mesmo calculado pelo programa (**Figura 5.22**).

5.3.1.4 Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Bifásica-Terra (BCT)

Tabela 5.6: Equações do comparador cosseno para relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT).

AUTOPOLARIZAÇÃO [CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA (BCT) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{(C_1 + C_2 C)}{(C_1 + a C_2 C)} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{(1 + C)}{(C_1 + a C_2 C)} R_\theta \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{(C_1 + C_2 C)}{(C_1 + a C_2 C)} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{(1 + C)}{(C_1 + a C_2 C)} R_\theta = Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\theta \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\theta = Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\theta \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\theta = Z_{Medida} \end{cases}$
AT	Corrente compensada não definida analiticamente.
BT	Corrente compensada não definida analiticamente.
CT	Corrente compensada não definida analiticamente.

5.3.1.4.1 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

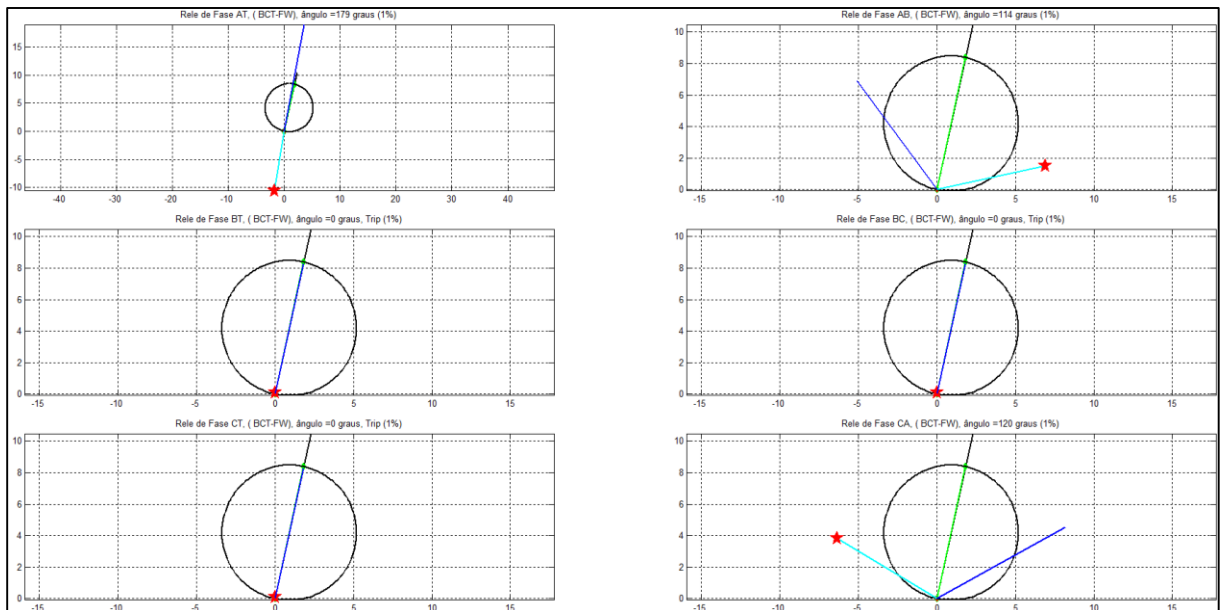


Figura 5.23: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito bifásico-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A **Figura 5.23** mostra os *loops* BT, CT e BC em condição de *trip*, já que uma falta bifásica-terra pode ser considerada como três faltas distintas, duas monofásicas e uma bifásica. Como não há resistência de falta, os *loops* AB e CA apresentam a impedância medida em posição diametralmente oposta de forma simétrica.

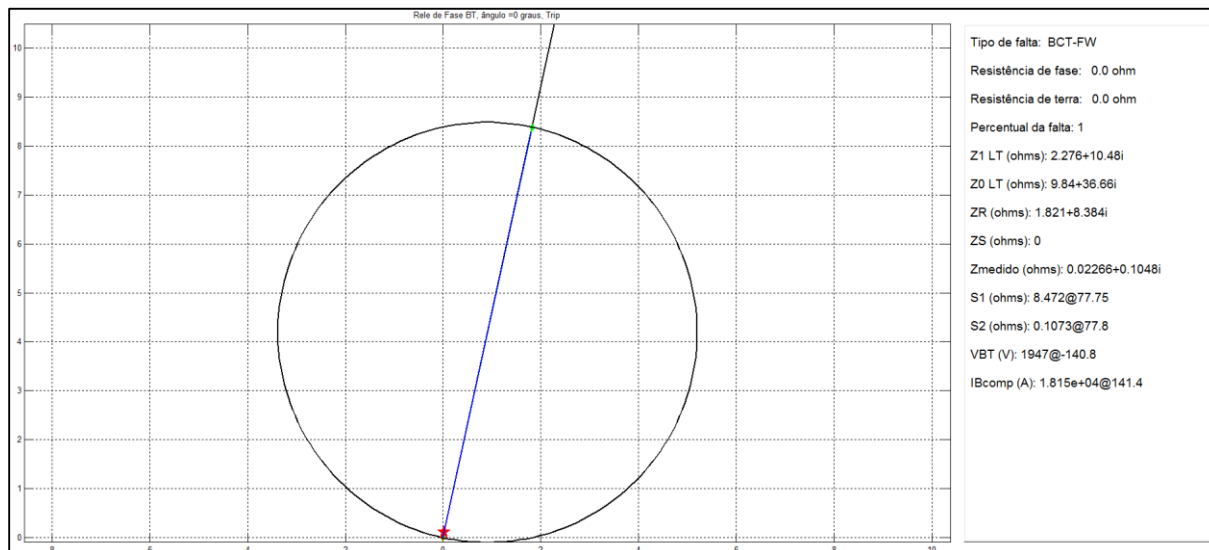


Figura 5.24: Loop BT do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

As impedâncias medidas pelo *loop* BT (**Figura 5.24**) e pelo *loop* CT (**Figura 5.25**) estão localizadas sobre o lugar geométrico que representa a LT, pois não há resistência de falta.

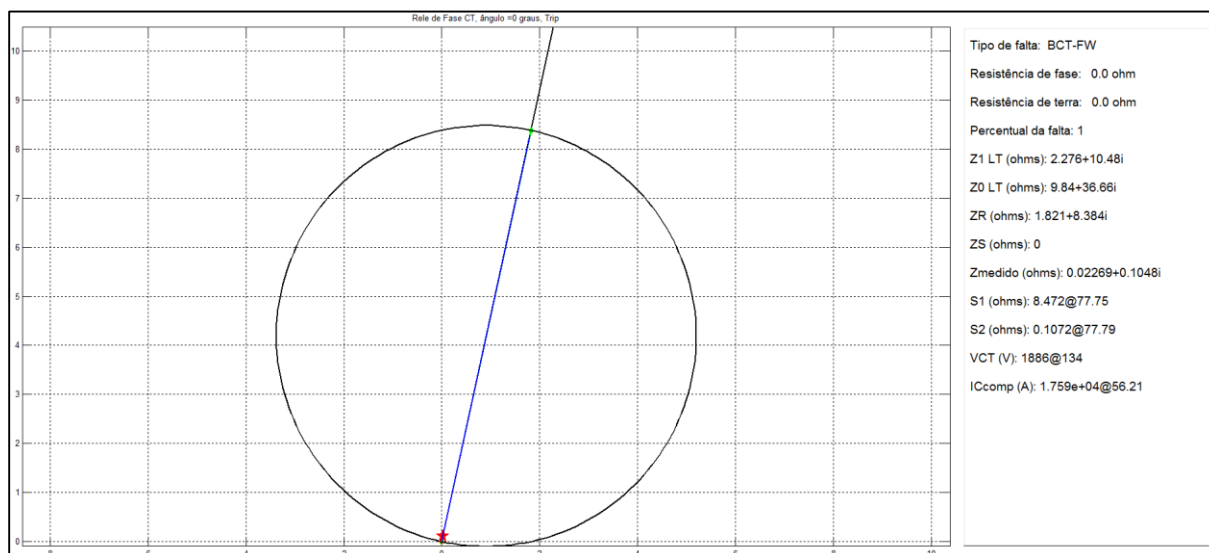


Figura 5.25: Loop CT do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Vê-se mais uma vez que apesar de os *loops* BT, CT e BC estarem em condição de *trip*, as impedâncias medidas nos três casos estão muito próximas do limiar de operação das características em cada *loop*. A tensão medida é muito baixa, em torno de 2% da tensão nominal. Em casos reais de falta o *trip* pode ser comprometido se o relé opera autopolarizado.

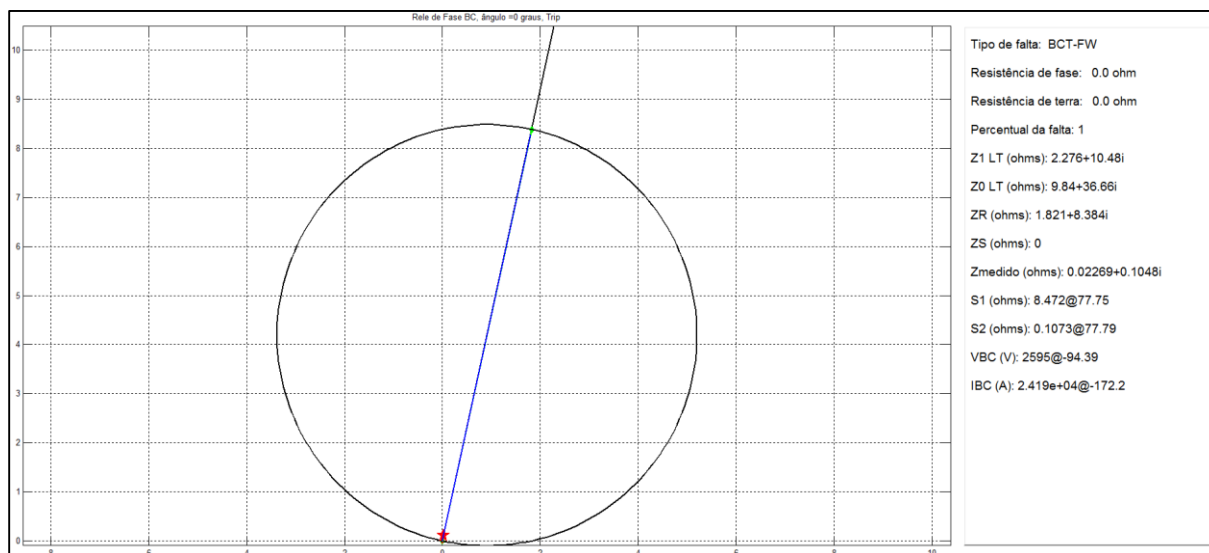


Figura 5.26: Loop BC do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Os relés comerciais normalmente não permitem o *trip* por *loops* monofásicos quando a falta é identificada como bifásica-terra. Havendo a operação de dois *loops* monofásicos e do *loop* bifásico correspondente, somente o *trip* do *loop* bifásico é considerado pelo relé, que bloqueia o *trip* nos *loops* monofásicos. Mais detalhes serão apresentados posteriormente, quando o relé estiver polarizado por quadratura e por tensão de memória.

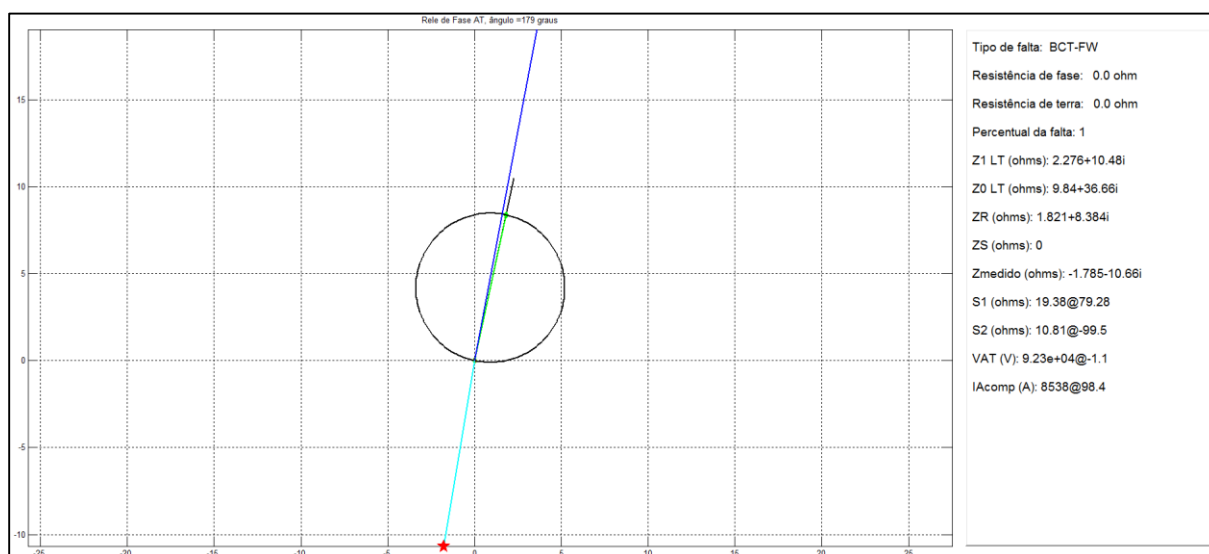


Figura 5.27: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A falta não envolve a fase A, mas a impedância medida pelo *loop* AT não tende ao infinito, pois os *loops* monofásicos não utilizam somente sua corrente da fase no cálculo da impedância medida, mas a corrente compensada de fase. Essa corrente compensada é função da corrente de sequência zero da falta e chega a 8538 amperes no *loop* AT (**Figura 5.27**).

5.3.1.4.2 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, com $R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$

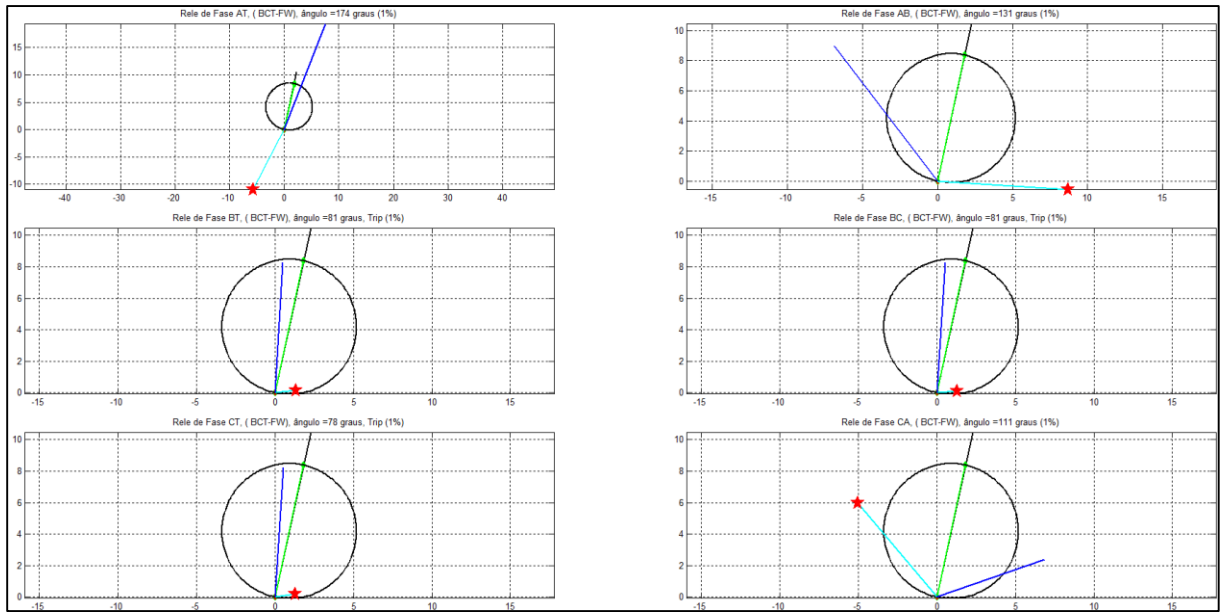


Figura 5.28: Relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT com $R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$.

Comparando as características de operação do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica (**Figura 5.15**) e sob falta bifásica-terra (**Figura 5.28**), ambas com a mesma resistência de falta, o que mais chama a atenção é o comportamento do *loop* BT. Na falta bifásica os *loops* BT e CT trazem as impedâncias medidas de lados opostos ao lugar geométrico que representa a LT, ao passo que na falta bifásica-terra essas impedâncias estão do mesmo lado e têm valores bem parecidos, como se representassem duas faltas monofásicas distintas no mesmo ponto. Vê-se também que o módulo da impedância medida no *loop* AB é maior que no *loop* CA.

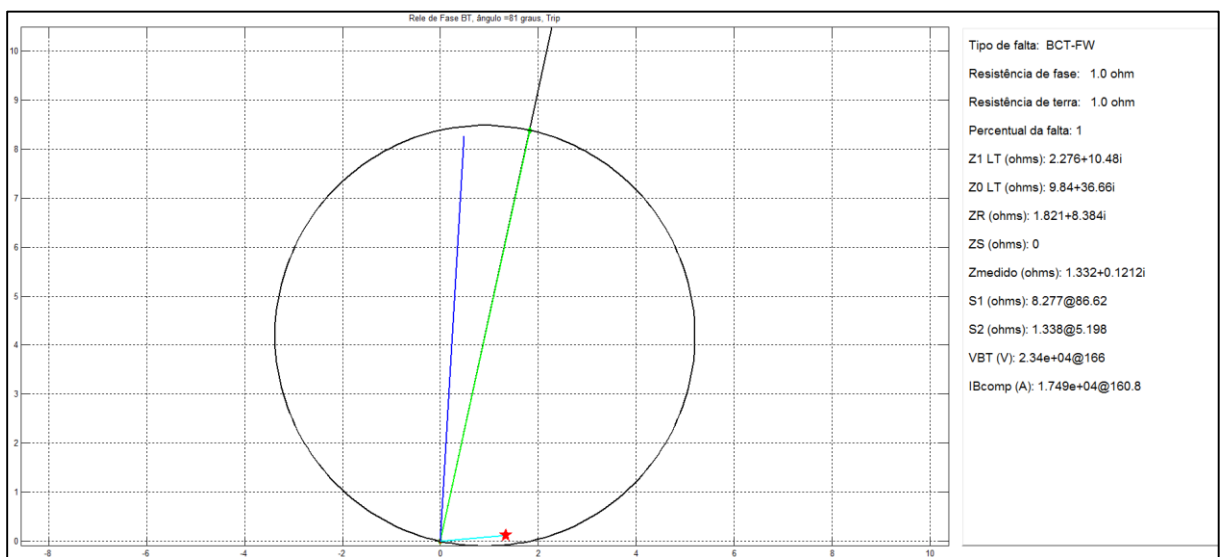


Figura 5.29: Loop BT do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra a 1% da LT ($R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$).

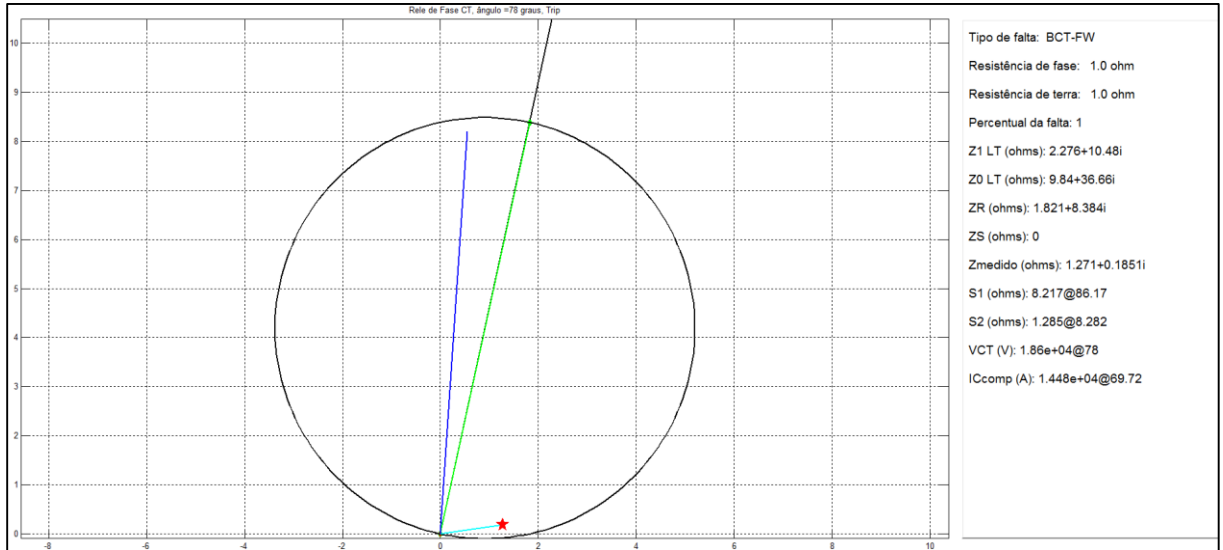


Figura 5.30: Loop CT do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra a 1% da LT ($R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$).

As características dos loops BT e CT são apresentadas na **Figura 5.29** e na **Figura 5.30**, respectivamente. Observa-se que o comportamento deles é praticamente idêntico.

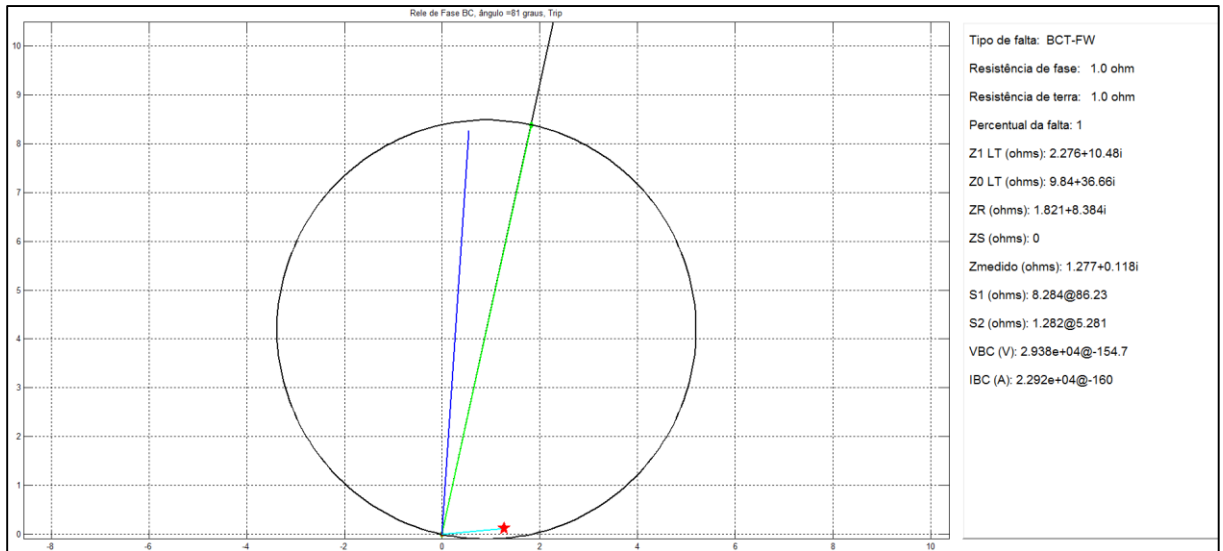


Figura 5.31: Loop BC do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra a 1% da LT ($R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$).

Da **Equação 4.22** tem-se que a impedância medida pelo loop BC numa falta bifásica-terra é:

$$Z_{Medida_{Loop BC}}^{Falta BCT} = nZ_1 + \frac{1+C}{C_1+C_2C} R_\phi = (0,02276 + j0,1048) + (1,254 + j0,00674)$$

$$Z_{Medida_{Loop BC}}^{Falta BCT} = (1,277 + j0,112) \Omega_{prim}$$

O valor obtido é praticamente o mesmo valor calculado pelo programa na **Figura 5.31**.

5.3.1.5 Relé Mho Autopolarizado Sob Falta Trifásica Reversa

Tabela 5.7: Equações do comparador cosseno para o relé Mho autopolarizado sob falta trifásica reversa.

AUTOPOLARIZAÇÃO [CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA (ABCT) ATRÁS DO RELÉ]		
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Tensões e Correntes)	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{AB} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{BC} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{CA} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase A} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase B} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase C} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_E^{Fase C} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.1.5.1 Curto-circuito Trifásico a 1% da LT Atrás do Relé ($R_F = 0 \Omega$).

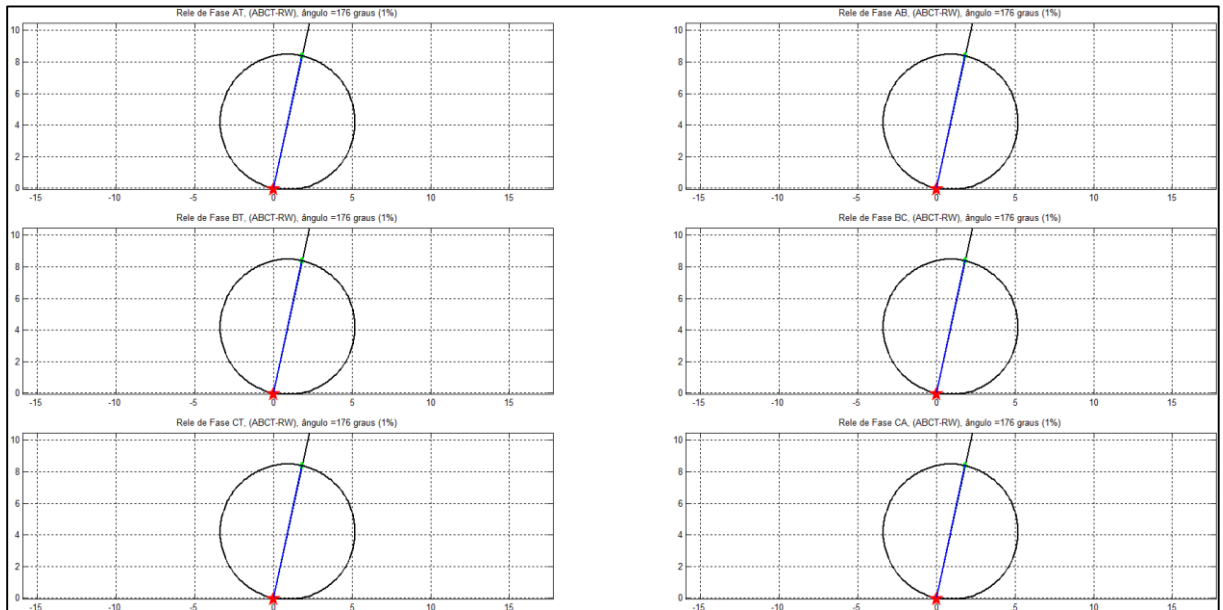


Figura 5.32: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico, a 1% da LT reversa, sem resistência de falta.

Devido à ausência de resistência de falta, a impedância medida é justamente 1% da impedância da fonte atrás do relé (**Figura 5.1**), o que pode ser visto na **Figura 5.33** e na **Figura 5.34**.

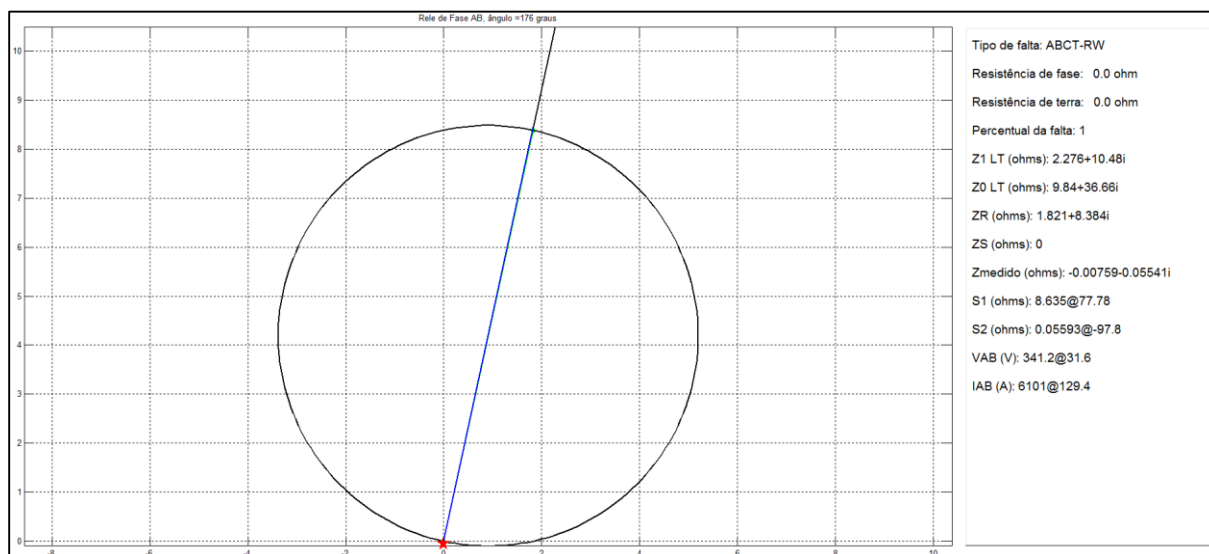


Figura 5.33: Loop AB do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

Como já foi enfatizado anteriormente, a autopolarização não dá a segurança necessária ao relé Mho para garantir um comportamento seguro para faltas próximas às características de operação de cada *loop*. As tensões medidas pelos TPs têm valores muito baixos, não permitindo que um relé Mho comercial possa tomar com segurança a decisão correta. Como indica a **Tabela 5.7**, todos os *loops* da **Figura 5.32** comportam-se da mesma forma e a impedância medida fica muito próxima ao limiar de operação, isso é, a região onde o ângulo entre o sinal S_1'' e S_2'' de cada comparador de fases é igual a 90° .

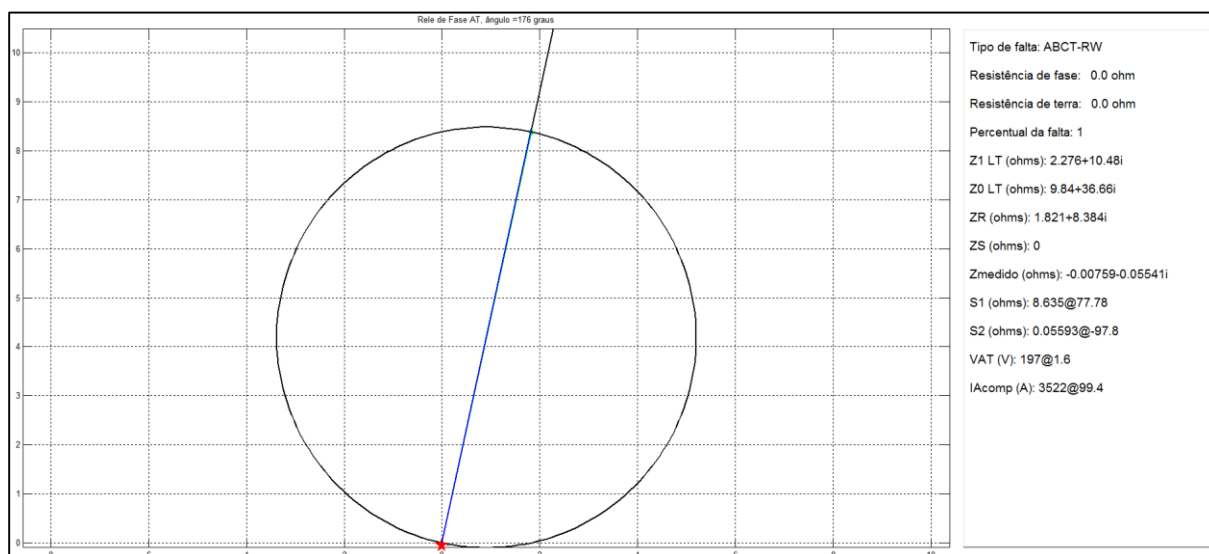


Figura 5.34: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

5.3.1.5.2 Curto-circuito Trifásico a 1% da LT Atrás do Relé ($R_F = 2 \Omega$).

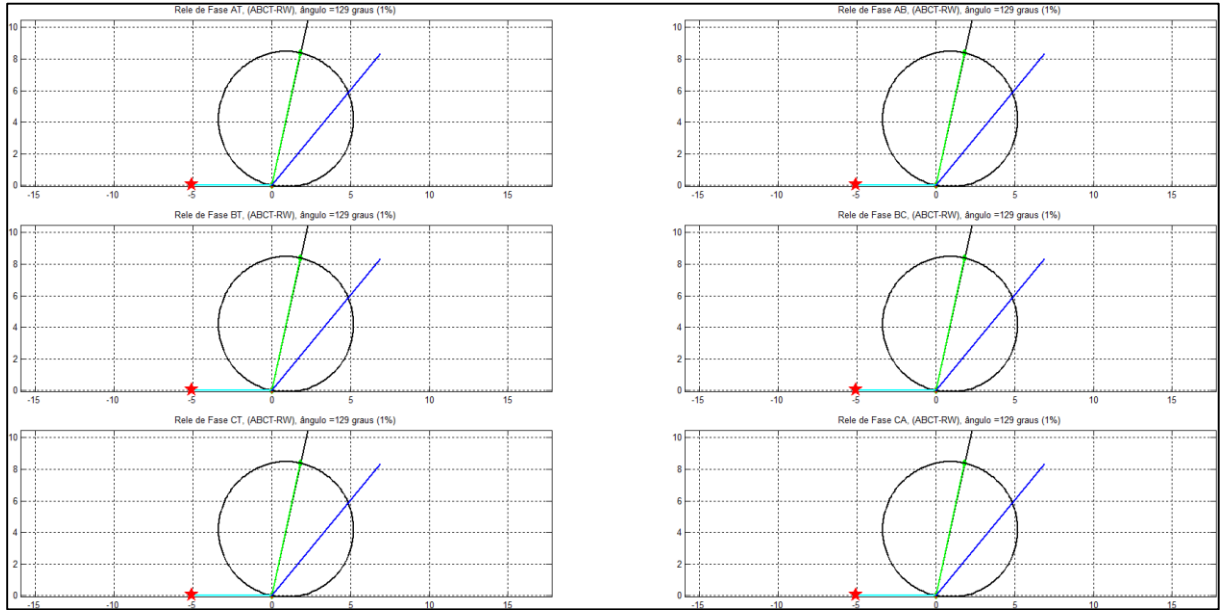


Figura 5.35: Relé Mho autopolarizado sob falta trifásica, a 1% da LT reversa, com $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).

Na **Figura 5.35** observa-se a simulação de um curto-circuito trifásico em 1% da LT reversa, agora com 2 ohms de resistência de falta. É interessante notar nos gráficos que por se tratar de uma falta reversa, a impedância medida tem valor negativo de resistência.

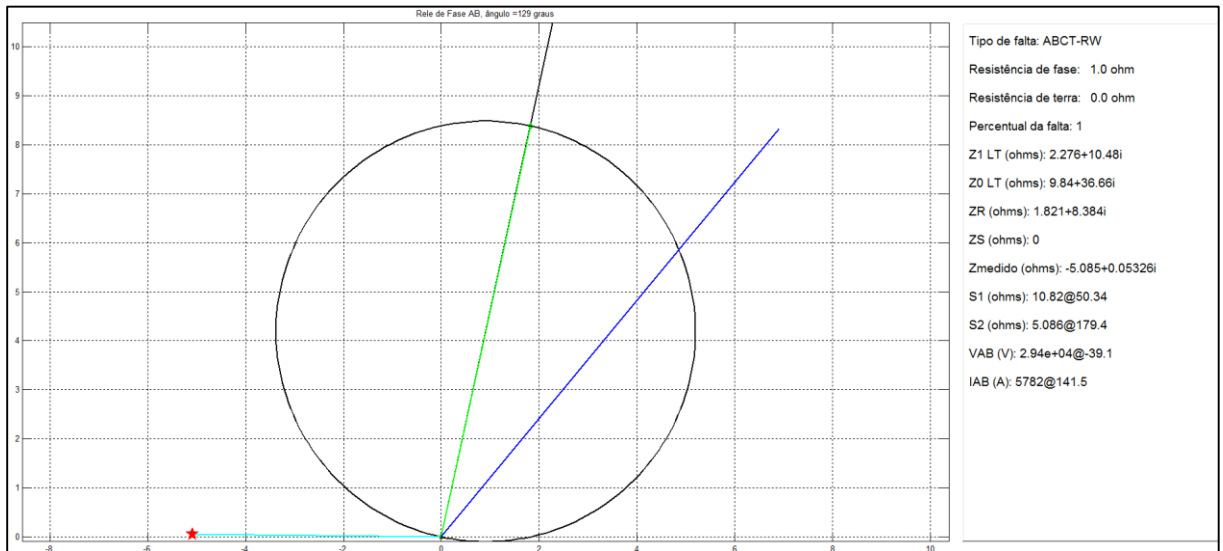


Figura 5.36: Loop AB do relé Mho autopolarizado sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 2 \Omega$ e $R_\phi = 1 \Omega$).

Da **Equação 4.24** tem-se que a impedância medida por todos os loops de falta do relé Mho autopolarizado sob curto-circuito trifásico reverso é dada por:

$$Z_{Medida}^{CC3\phi} = -nZ_{E1} - \frac{R_\phi}{C_1^R}$$

A **Equação 3.6** define o divisor de corrente de sequência positiva reversa. Utilizando os valores da **Tabela 5.1** vem:

$$C_1^{Reverso} = \frac{(1 - n)Z_{E1}}{Z_{E1} + Z_1 + Z_{D1}} = \frac{(1 - 0,01) \times (0,754 + j5,548)}{(0,754 + j5,548) + (2,276 + j10,480) + (1,392 + j11,781)}$$

$$C_1^{Reverso} = (0,1968 + j0,00445)$$

Agora a impedância medida pode ser calculada:

$$Z_{Medida}^{CC3\phi} = -nZ_{E1} - \frac{R_\phi}{C_1^R} = - \left[0,01 \times (0,754 + j5,548) + \frac{1}{(0,1968 + j0,00445)} \right]$$

$$Z_{Medida}^{CC3\phi} = (-5,0862 + j0,0594)\Omega_{prim}$$

O resultado confere com os dados da **Figura 5.36** e também da **Figura 5.37**. A inversão de sinal é resultado do sentido que a corrente agora apresenta, entrando na barra da esquerda, vindo da fonte da direita. A resistência de falta tira a impedância medida do limiar de operação, reduzindo a possibilidade de *trip* indevido. Essa pequena resistência de falta faz com que a tensão de polarização não caia tanto, ficando em torno de 20% da tensão nominal.

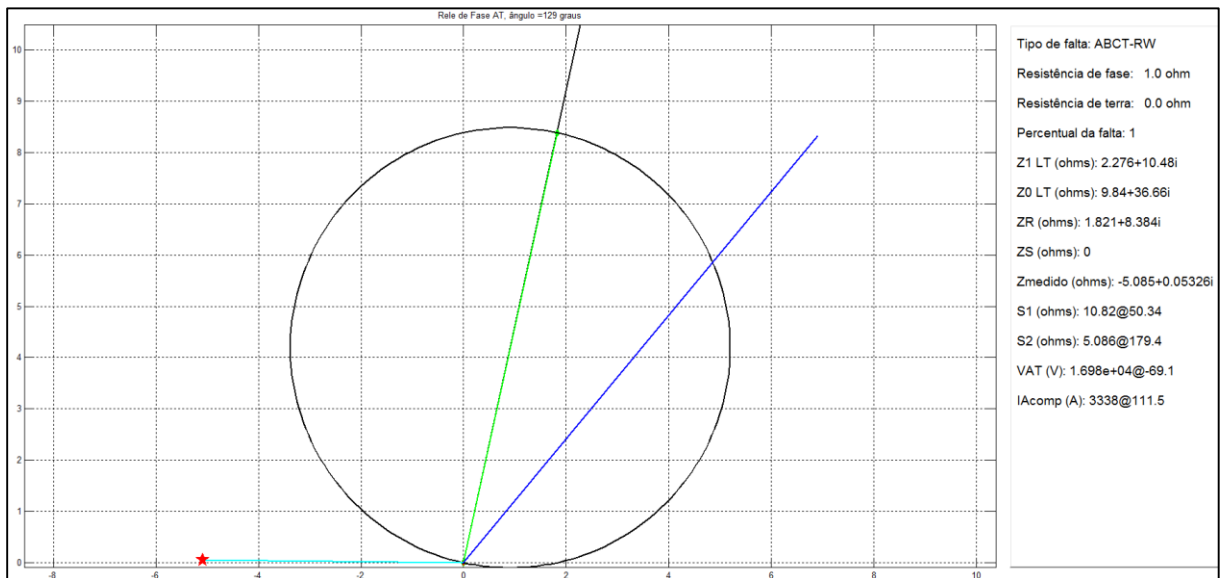


Figura 5.37: Loop AT do relé Mho autopolarizado sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 2 \Omega$ e $R_\phi = 1 \Omega$).

5.3.2 - Polarização Singela por Tensão de Quadratura

A polarização por tensão de quadratura, mais comumente chamada de polarização cruzada, já era utilizada nos relés eletromecânicos. Utilizava-se três relés eletromecânicos, um para cada fase, e o relé que recebia a corrente de uma fase era polarizado com tensão composta das outras duas fases. Assim, em caso de uma falta monofásica sólida e próxima por exemplo, a tensão da fase em falta tenderia a zero, mas como o relé utilizava a tensão das fases sãs para a polarização, a definição da direcionalidade não era comprometida. A polarização cruzada oferece ao relé condições de definição da direção da falta em todos os curtos-circuitos, à exceção do trifásico sólido próximo, onde todas as tensões tendem a zero. Como se trata de um método simples e eficaz de polarização, a polarização cruzada continua sendo utilizada pelos relés digitais.

As equações que definem, de forma genérica, os sinais do comparador de fases tipo cosseno para a polarização singela cruzada são:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = qk \dot{V}_{Extra-Loop}^{S\tilde{a}(s)} \end{cases}$$

Onde:

- S_1'' = Sinal de operação do comparador de fases tipo cosseno.
- S_2'' = Sinal de referência (ou polarização) do comparador de fases tipo cosseno.
- I_{Loop} = Corrente de cada um dos seis *loops* de operação do relé Mho.
- $\dot{V}_{Loop}$ = Tensão de cada um dos seis *loops* de operação do relé Mho.
- q = Multiplicador que define a quantidade de tensão de polarização a ser utilizada.
- k = Número complexo que adequa em módulo e ângulo a tensão para a polarização.
- $\dot{V}_{Extra-Loop}^{S\tilde{a}(s)}$ = Tensão da(s) fase(s) que não participa(m) do *loop*.

Dividindo os dois sinais pela corrente medida no *loop* e considerando q igual a 1:

$$\begin{cases} S_1'' = \frac{I_{Loop} Z_R}{I_{Loop}} - \frac{\dot{V}_{Loop}}{I_{Loop}} = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{k \dot{V}_{Extra-Loop}^{S\tilde{a}(s)}}{I_{Loop}} = \frac{\dot{V}_S^q}{I_{Loop}} + \frac{\dot{V}_{Loop}}{I_{Loop}} = Z_S^q + Z_{Medida} \end{cases} \quad \text{Equação 5.2}$$

O termo Z_S^q somente aparece em faltas que não sejam trifásicas e equilibradas. Nessa condição o sinal S_2'' , tal qual ocorre na autopolarização, possui somente Z_{Medida} .

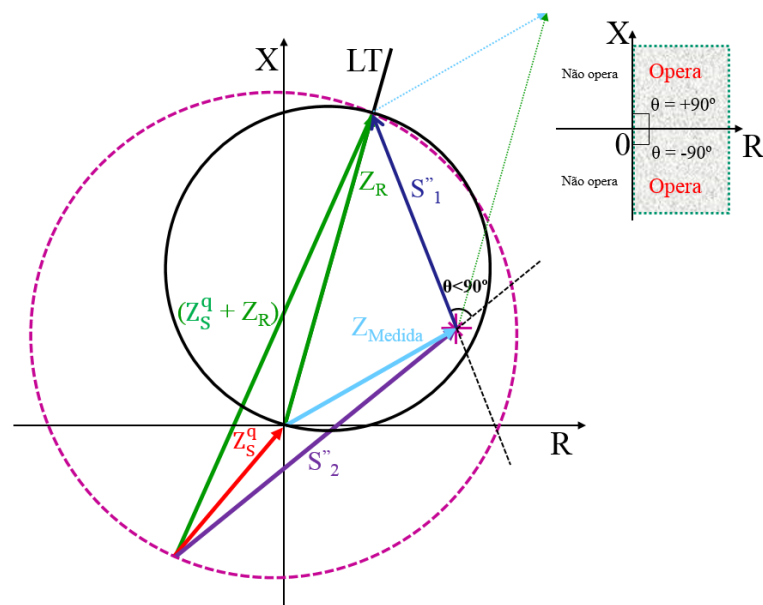


Figura 5.38: Característica de operação do relé Mho polarizado por tensão de quadratura.

Cada um dos seis comparadores de fase tipo cosseno de um relé Mho polarizado por tensão de quadratura tem uma tensão de fase(s) diferente(s) da fase a qual pertence a corrente, compondo o sinal S_2'' . Por exemplo, o comparador de fases do *loop* AT utiliza a tensão composta das fases B e C no sinal de referência S_2'' . Essa tensão é devidamente rotacionada e tem seu módulo dividido por raiz de três para que se torne idêntica à tensão da fase A na condição pré-falta. Um comparador de fases do *loop* BC utiliza a tensão da fase A para a polarização, também devidamente ampliada e rotacionada para que possa representar a tensão composta das fases BC. Em suma, o comparador de fases do *loop* AT polarizado de forma singela por tensão de quadratura utiliza a corrente da fase A no sinal de operação S_1'' e a tensão composta das fases B e C no sinal de referência S_2'' , em substituição à tensão da fase A. Coisa semelhante é feita na composição do comparador de fases do *loop* BC, onde se utiliza a corrente $\dot{I}_{BC}$ no sinal de operação e a tensão $\dot{V}_{AN}$ multiplicada por um número complexo k de forma a se obter o mesmo módulo e ângulo da tensão $\dot{V}_{BC}$ na condição pré-falta.

A **Figura 5.38** permite compreender detalhadamente os resultados das simulações que serão apresentadas a seguir. A característica de operação na cor magenta significa que o relé está utilizando a tensão de quadratura para a polarização. A característica na cor preta que passa pela origem dos eixos está utilizando a autopolarização. A diferença entre a tensão utilizada na polarização e a tensão medida no *loop* é o que gera a ampliação da característica de operação do relé Mho polarizado em quadratura. Essa ampliação acomoda melhor as faltas que possam ocorrer próximas aos TPs e à frente dos TCs, à exceção da falta trifásica.

5.3.2.1 Relé Mho Polarizado em Quadratura e Sob Falta Trifásica (ABCT)

Tabela 5.8: Equações dos comparadores polarizados por tensão de quadratura sob curto-circuito trifásico.

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO EM QUADRATURA [CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA (ABCT) À FRENTE DO RELÉ]		
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Tensões e Correntes)	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase C} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase A} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase B} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{BC} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{CA} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase C} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{AB} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.2.1.1 Curto-circuito trifásico, a 1% da LT, sem resistência de falta

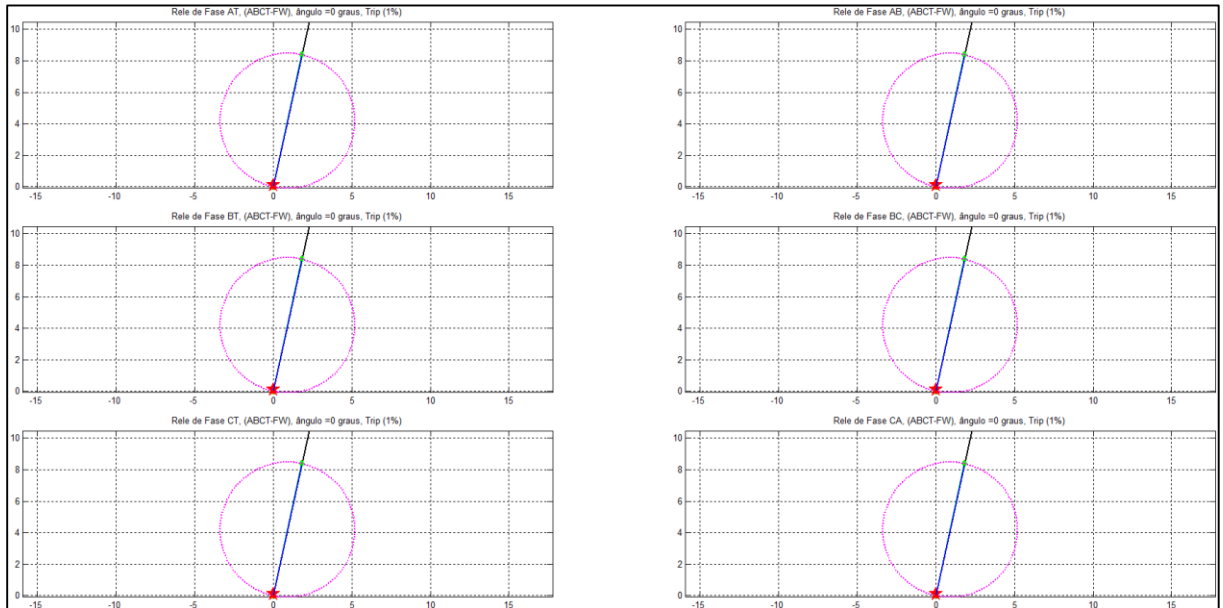


Figura 5.39: Relé Mho polarizado em quadratura sob curto-circuito trifásico a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

O comportamento observado em cada *loop* de falta (**Figura 5.39**) é idêntico ao verificado no relé Mho autopolarizado (**Figura 5.7**). Vê-se, portanto, que a autopolarização e a polarização cruzada nesses casos podem não garantir a correta operação do relé Mho sob falta trifásica sólida próxima, pois a impedância medida fica muito próxima ao limiar de operação da característica Mho e a tensão de polarização é menor que 2% da tensão nominal.

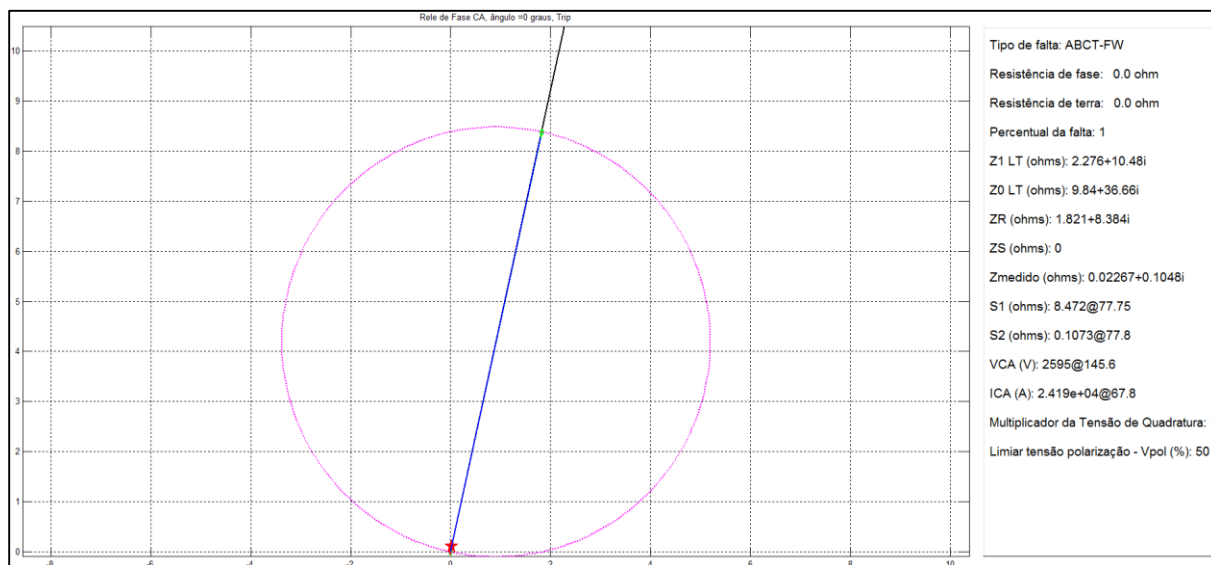


Figura 5.40: Loop CA do relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Na **Figura 5.40** vê-se que o *loop* CA só utiliza a polarização por tensão de quadratura se a tensão medida pelo *loop* for inferior a 70% da tensão nominal, caso contrário a tensão de polarização é a mesma tensão medida. Como a tensão medida no *loop* CA é apenas 1,88% da tensão nominal, a tensão de polarização utilizada por ele é a de quadratura.

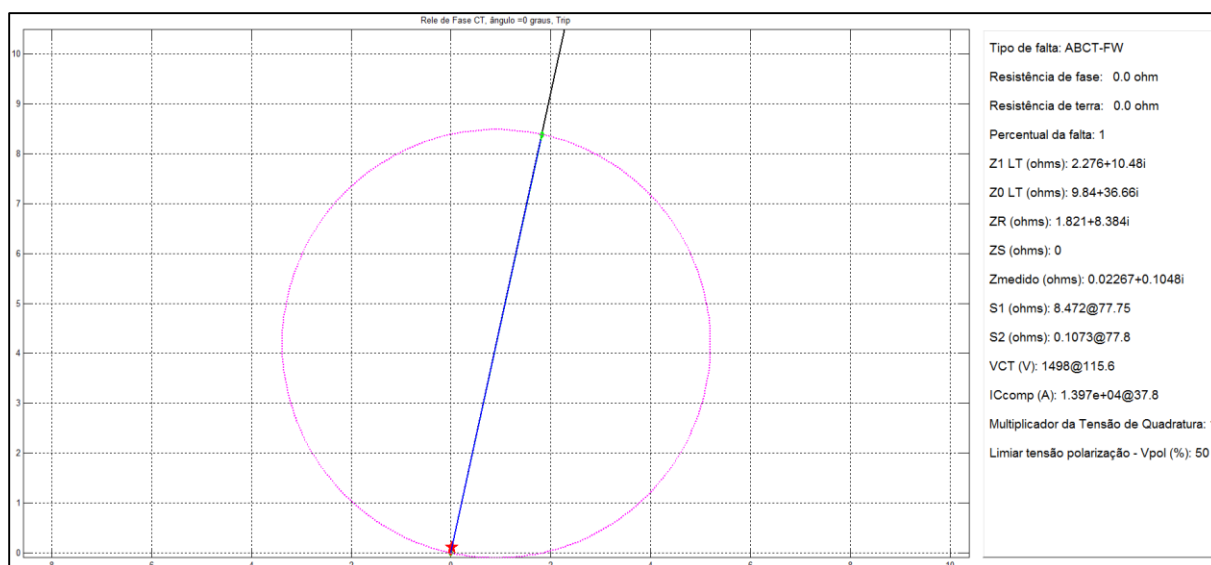


Figura 5.41: Loop CT do relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

5.3.2.1.2 Curto-circuito trifásico, a 1% da LT, com 2 Ω de resistência de falta

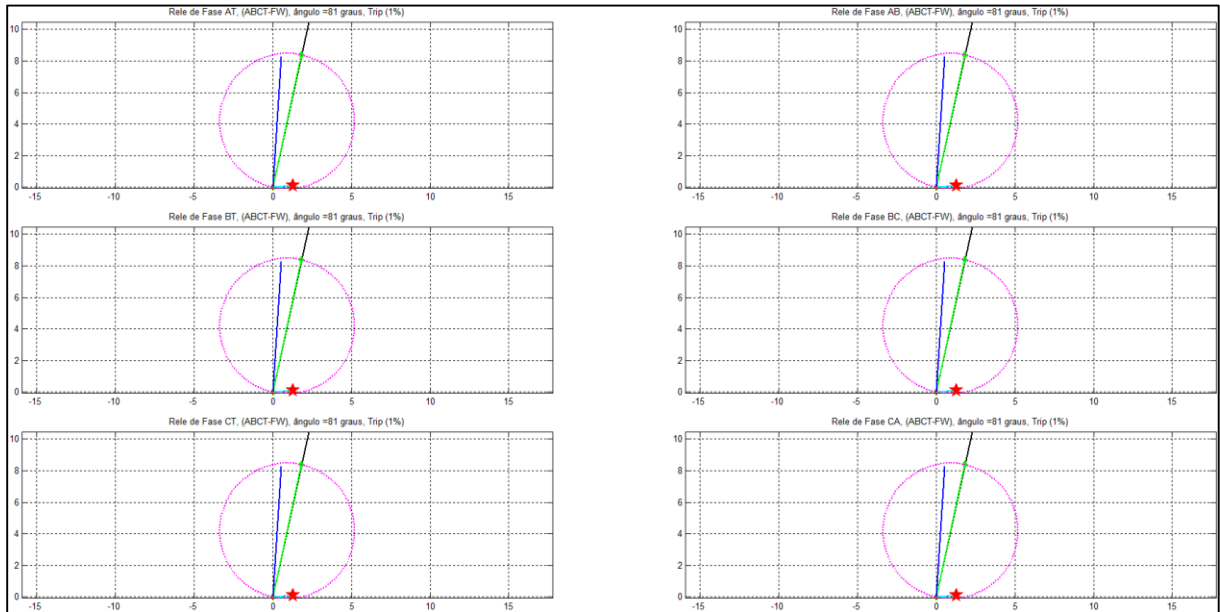


Figura 5.42: Relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 1 \Omega$).

Quando a característica de operação do relé Mho tem cor magenta, a tensão medida pelo *loop* está abaixo do limiar definido para a utilização da tensão de polarização por tensão de quadratura. Se a tensão medida no *loop* está acima do limiar escolhido, a característica de operação Mho está utilizando a autopolarização e terá cor preta.

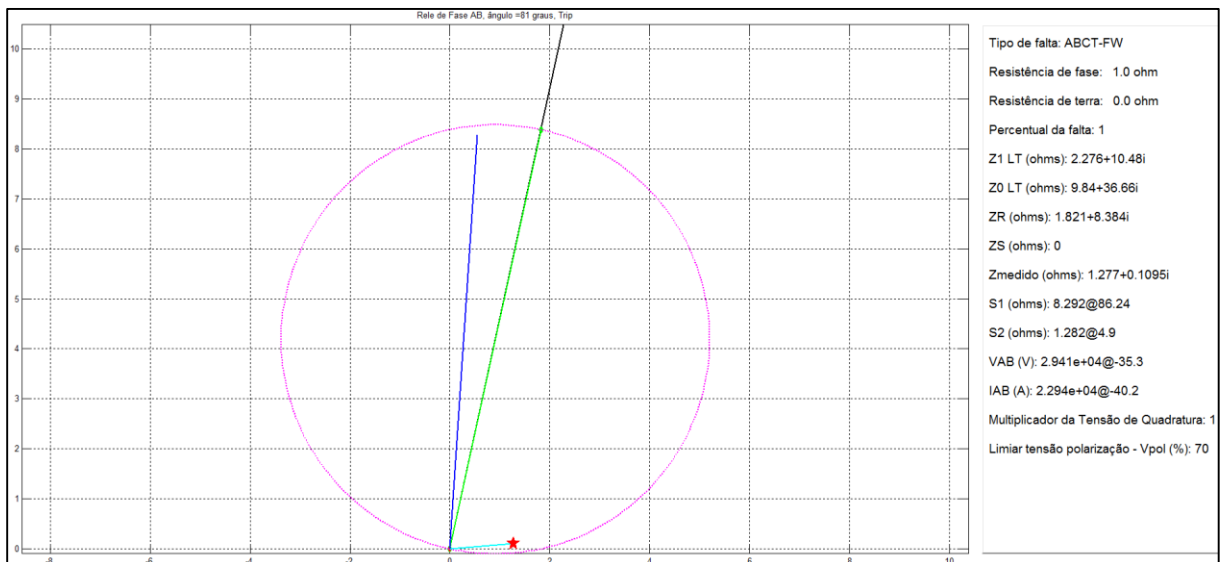


Figura 5.43: Loop AB do relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT ($R_F = 2 \Omega$).

Comparando a **Figura 5.11** com a **Figura 5.43** é possível confirmar que a impedância medida pelo relé Mho autopolarizado é a mesma medida por um relé Mho polarizado por tensão de quadratura na mesma condição de falta.

5.3.2.2 Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Bifásica (BC) na LT

Tabela 5.9: Equações dos comparadores para relé Mho polarizado em quadratura sob falta bifásica (BC)

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO EM QUADRATURA [CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida}$ $S_2'' = \frac{(a^2 - 3a - 1)C_2}{(a-1)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida}$
BC	$S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida}$ $S_2'' = \frac{2C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida}$
CA	$S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \right]$ $S_2'' = \frac{(3a^2 - a + 1)C_2}{(a^2 - 1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \right]$
AT	$S_1'' = Z_R - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida}$ $S_2'' = \frac{2C_2}{C_2 - C_1} Z_{E2} + \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} \right) = Z_S + Z_{Medida}$
BT	$S_1'' = Z_R - \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida}$ $S_2'' = \frac{(3a^2 - a + 1)C_2}{(a-a^2)(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida}$
CT	$S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida}$ $S_2'' = \frac{(4 - a^2)C_2}{(a-1)(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida}$

5.3.2.2.1 Curto-circuito bifásico (BC), a 1% da LT, sem resistência de falta

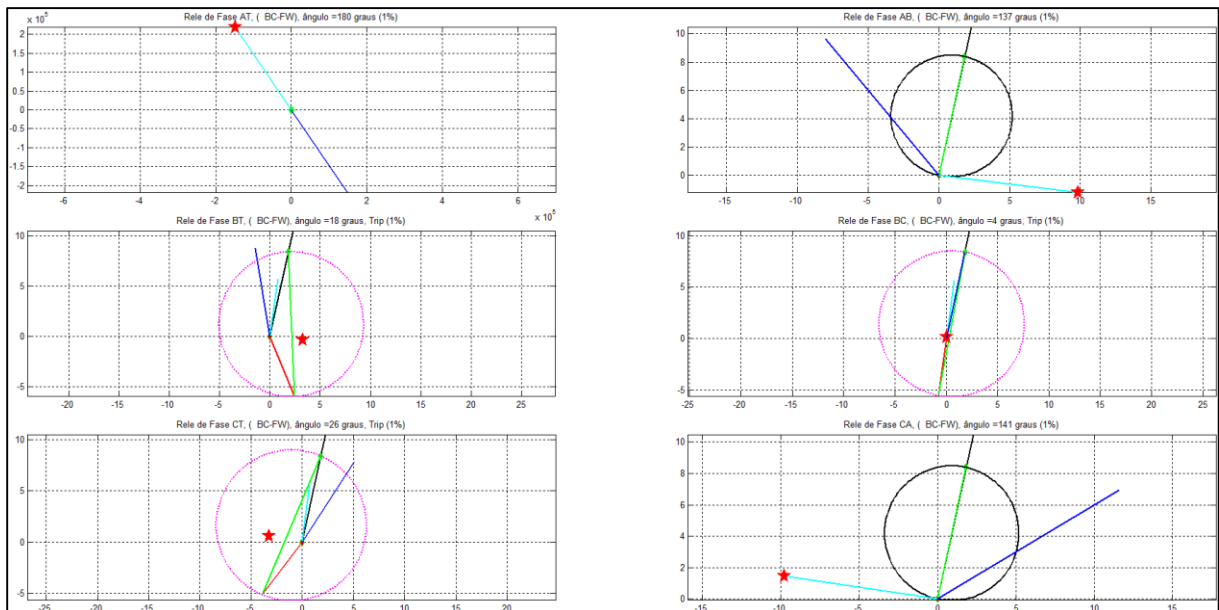


Figura 5.44: Relé Mho polarizado em quadratura sob falta bifásica (BC) a 1% da LT, sem resistência de falta.

Pela primeira vez neste estudo é possível observar características de operação do relé Mho com seus diâmetros alterados. As equações da **Tabela 5.9** apresentam termos adicionados à impedância medida no sinal S_2'' . Esses termos, que não apareciam no relé Mho autopolarizado, são as impedâncias da fonte atrás do relé Mho polarizado em quadratura (Z_S^q , ou simplesmente Z_S). Essas impedâncias são responsáveis pela expansão da característica Mho verificada nos loops BT, CT e BC, onde a tensão medida caiu abaixo de 70% da tensão nominal.

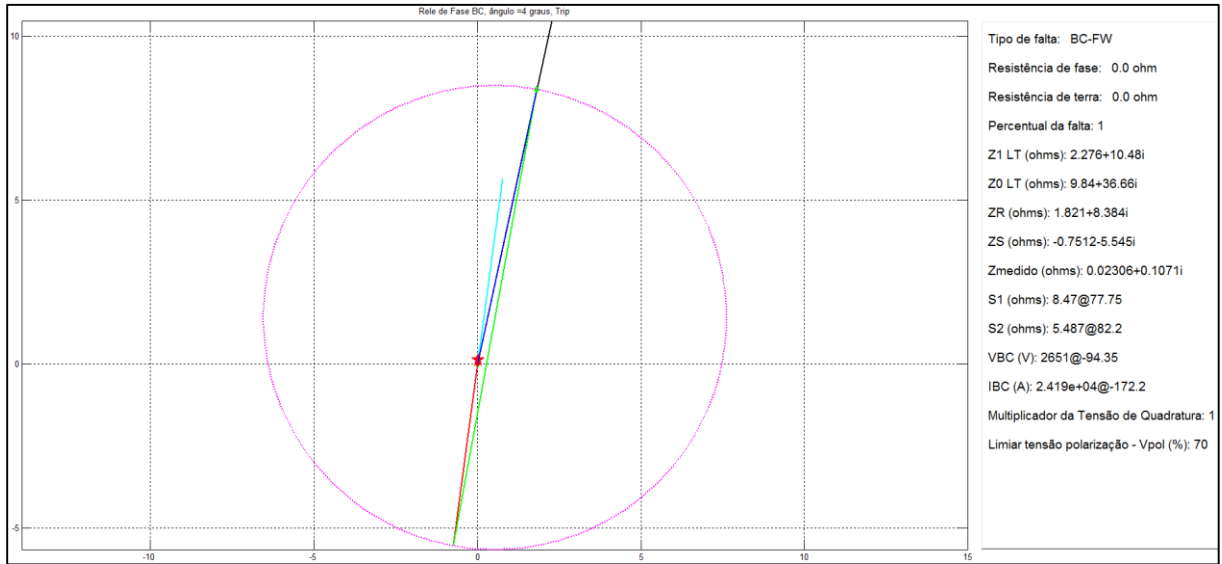


Figura 5.45: Loop BC do relé Mho polarizado em quadratura sob falta bifásica (BC) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

De acordo com a **Equação 4.38**, a impedância Z_S do loop BC polarizado por quadratura e sob falta entre as fases B e C (**Figura 5.45**) é dada por:

$$Z_{S_{LoopBCq}}^{CCBC} = \frac{2C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} = Z_{S_{LoopBCm}}^{CCBC} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} = Z_{E2} = Z_{E1}$$

No circuito aqui analisado, C_1 tem valor idêntico a C_2 , o que normalmente ocorre em porções do sistema elétrico distante de plantas geradoras. Nessa condição, a impedância Z_S é igual à impedância de sequência positiva ou negativa da fonte atrás do relé.

As impedâncias medidas pelos loops BT e CT estão diametralmente opostas em relação ao lugar geométrico que representa a LT. O mesmo ocorre com os loops AB e CA. Os loops de falta monofásicos BT e CT chegam ao *trip*, devido à expansão da característica de operação do relé Mho polarizado por tensão de quadratura, pois vale observar que se o relé Mho continuasse autopolarizado, as impedâncias medidas não ficariam dentro das características de operação dos loops BT e CT (**Figura 5.12**). Outra observação interessante é o fato de que os módulos das impedâncias da fonte atrás do relé nos loops BT e CT são maiores que no loop BC.

5.3.2.2.2 Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Com $2\ \Omega$ de Resistência de Falta

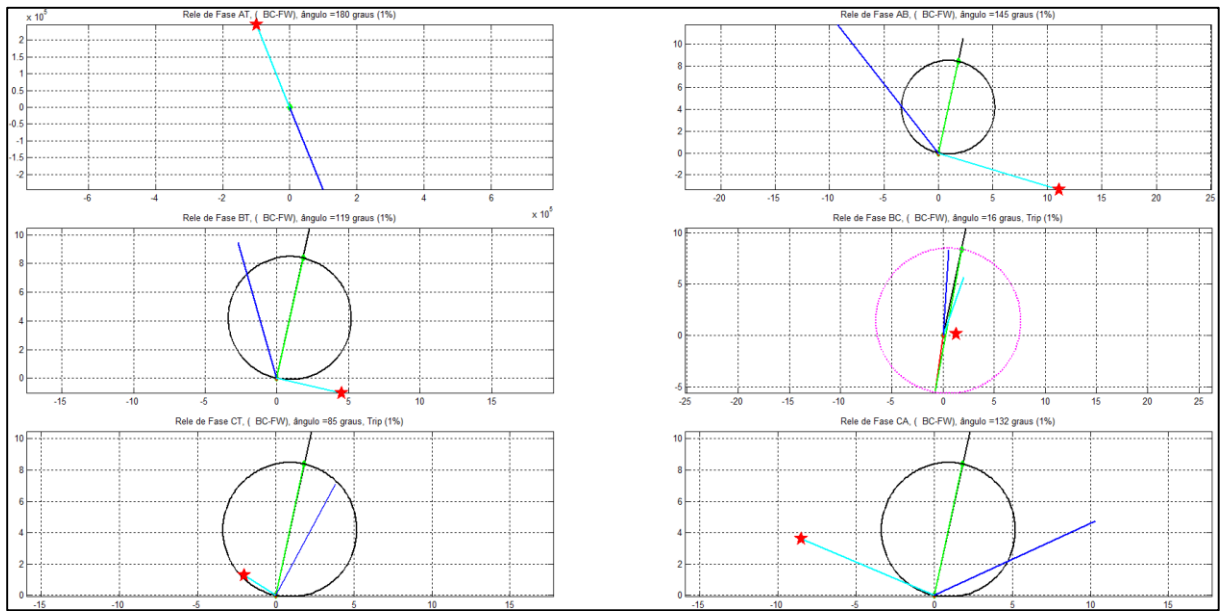


Figura 5.46: Relé Mho polarizado em quadratura sob falta bifásica (BC) a 1% da LT e $R_F = 2\ \Omega$ ($R_\phi = 2\ \Omega$).

Na **Figura 5.46**, somente o loop BC está polarizado por quadratura, os demais estão autopolarizados. O limiar de tensão definido para alteração da polarização foi de 30 % da tensão nominal. Com a presença de resistência de falta, o loop CT também chega ao trip.

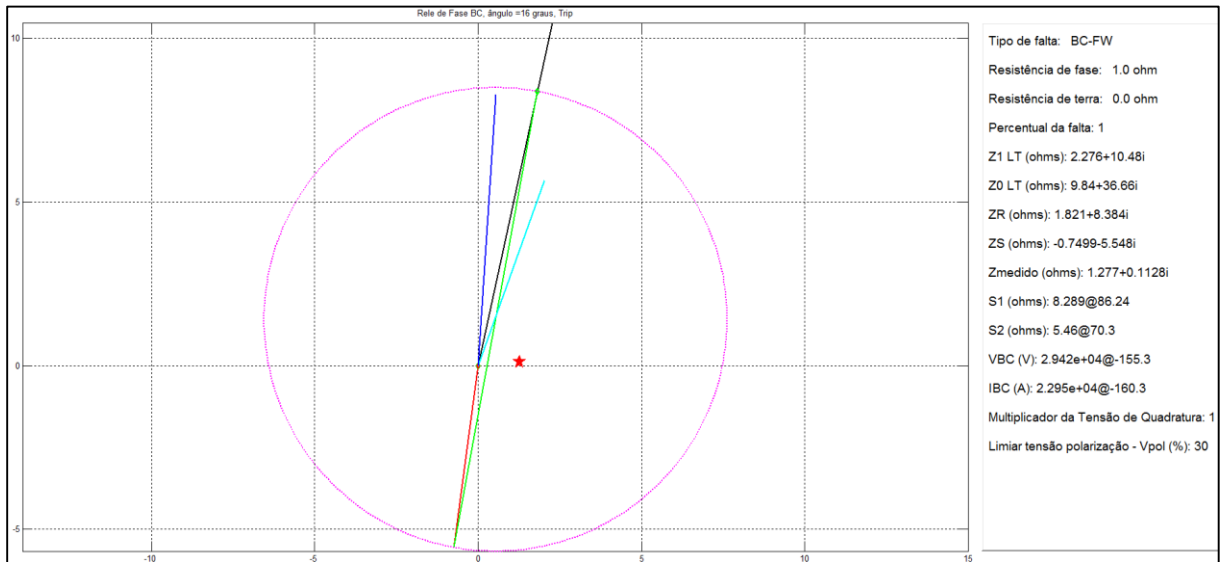


Figura 5.47: Loop BC do relé Mho polarizado em quadratura sob falta BC a 1% da LT ($R_\phi = 1\ \Omega$).

Comparando a **Figura 5.45** com a **Figura 5.47**, vê-se que realmente a impedância Z_S é a mesma nos dois casos, com valor igual ao da impedância de sequência positiva da fonte atrás do relé Mho. Aqui, somente o fator “ q ” (**Equação 4.30**) pode alterar o módulo de Z_S e consequentemente o diâmetro da característica do relé Mho.

5.3.2.3 Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Monofásica (AT) na LT

Tabela 5.10: Equações do comparador para relé Mho polarizado em quadratura sob falta monofásica (AT).

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO EM QUADRATURA [CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \left[\frac{2(1-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(a-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} \right] + \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2' = \left(\frac{2C_2}{C_2 - C_1} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_2 - C_1} Z_{E0} \right) + \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2'' = \left[\frac{2(1-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(a^2-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} \right] + \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{2C_2}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a^2-a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} - \frac{(a^2-1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \\ S_2' = \left[\frac{(a^2-a^2-1)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a^2-1)C_0}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a^2}{a^2C_1 + aC_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \frac{a[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} - \frac{(a-1)C_0}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \\ S_2' = \left[\frac{(a^2-a^2-1)C_2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \frac{a[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a-1)C_0}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$

5.3.2.3.1 Curto-circuito Monofásico (AT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

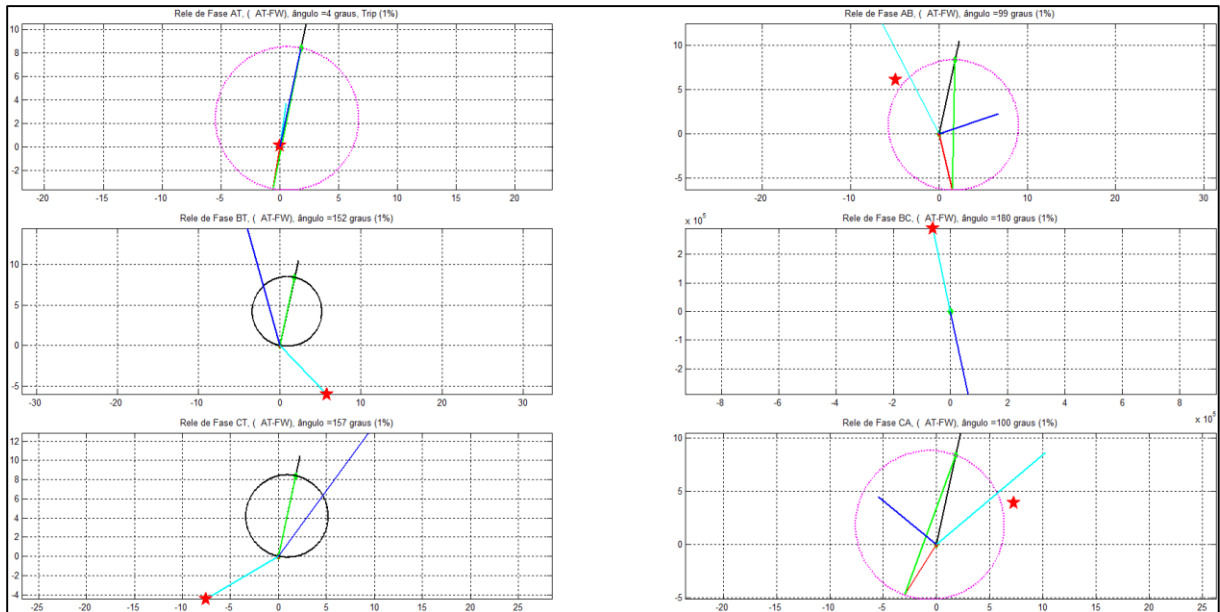


Figura 5.48: Relé Mho polarizado em quadratura, sob falta monofásica (AT) e a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Na **Figura 5.48** o limiar da tensão medida no *loop*, abaixo do qual o comparador passa a utilizar a tensão de quadratura no sinal de polarização, foi de 70% da tensão nominal. Os *loops* AT, AB e CA estão polarizados por quadratura. Os demais estão autopolarizados.

Apenas o *loop* AT opera na **Figura 5.48**, mas impedância medida fica próxima às características de operação expandidas dos *loops* AB e CA. Nos *loops* BT e CT a impedância medida encontra-se de forma simétrica ao lugar geométrico que define a LT.

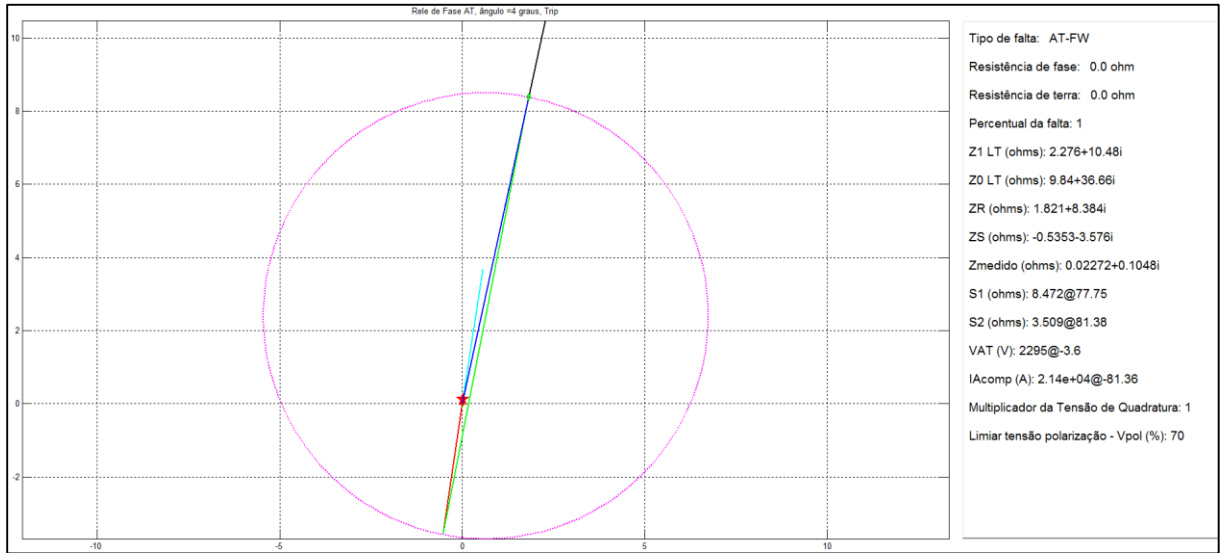


Figura 5.49: Loop AT do relé Mho polarizado em quadratura sob falta monofásica (AT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A impedância Z_S^q do *loop* AT é, segundo a **Equação 4.46**, dada por:

$$Z_{S_{LoopAT}}^{CCAT} = \frac{2C_2}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0}$$

Onde:

$$C_1 = C_2 = 0,7974 - j0,0043$$

$$C_0 = 0,8489 - j0,0015$$

$$k_0 = 0,8451 - j0,0571$$

Substituindo os valores acima e utilizando valores da **Tabela 5.1**, chega-se a:

$$Z_{S_{LoopAT}}^{CCAT} = (0,2051 + j1,9310) + (0,3297 + j1,6448) = (0,5348 + j3,5757) \Omega_{prim}$$

O valor encontrado é o do fasor deslocado para a origem (sinais positivos das partes real e imaginária). Na **Figura 5.49** os sinais são negativos, representando a base do fasor.

5.3.2.3.2 Curto-circuito Monofásico (AT) a 1% da LT e com $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$)

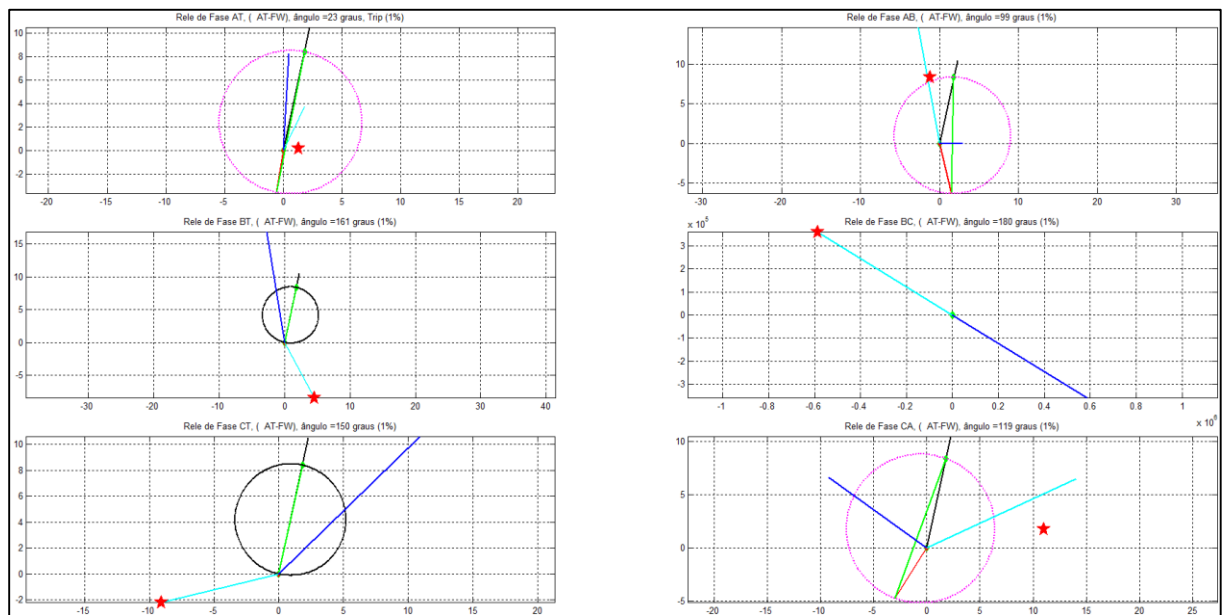


Figura 5.50: Relé Mho polarizado por tensão de quadratura sob falta AT a 1% da LT, com $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$).

O limiar da tensão no loop foi definido em 90% da tensão nominal para que este passe a utilizar a tensão de quadratura na polarização. Dessa forma, além do loop AT, os loops AB e CA também utilizam a polarização cruzada.

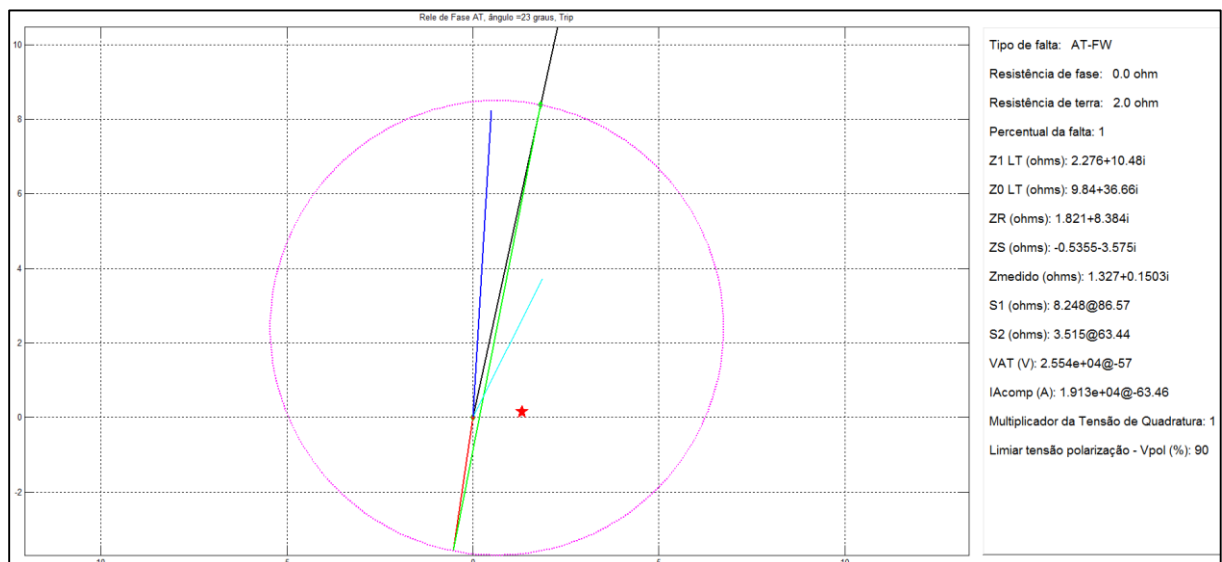


Figura 5.51: Loop AT do relé Mho polarizado em quadratura sob falta AT a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 2 \Omega$).

Compare a característica da **Figura 5.22** com a da **Figura 5.51**. Observe que as impedâncias medidas nos dois casos são as mesmas, haja vista tratar-se da mesma falta, mas a expansão da característica do relé Mho polarizado por quadratura permite a acomodação uma resistência de falta muito maior em seu interior.

5.3.2.4 Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Bifásica-terra na LT

Tabela 5.11: Equações dos comparadores cosseno para relé Mho, polarizados em quadratura, sob falta BCT.

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO EM QUADRATURA [CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA (BCT) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \left[\frac{(3a - a^2 + 1) C_2 C}{(1 - a)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{C_0(1 - C)}{a(C_1 + a C_2 C)} Z_{E0} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \left[\frac{2 C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} + \frac{C_0(1 - C)}{C_1 + C_2 C} Z_{E0} \right] + \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \left[\frac{(3a^2 - a + 1) C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{C_0(1 - C)}{a^2(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E0} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
AT	Corrente compensada não definida analiticamente.
BT	Corrente compensada não definida analiticamente.
CT	Corrente compensada não definida analiticamente.

5.3.2.4.1 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

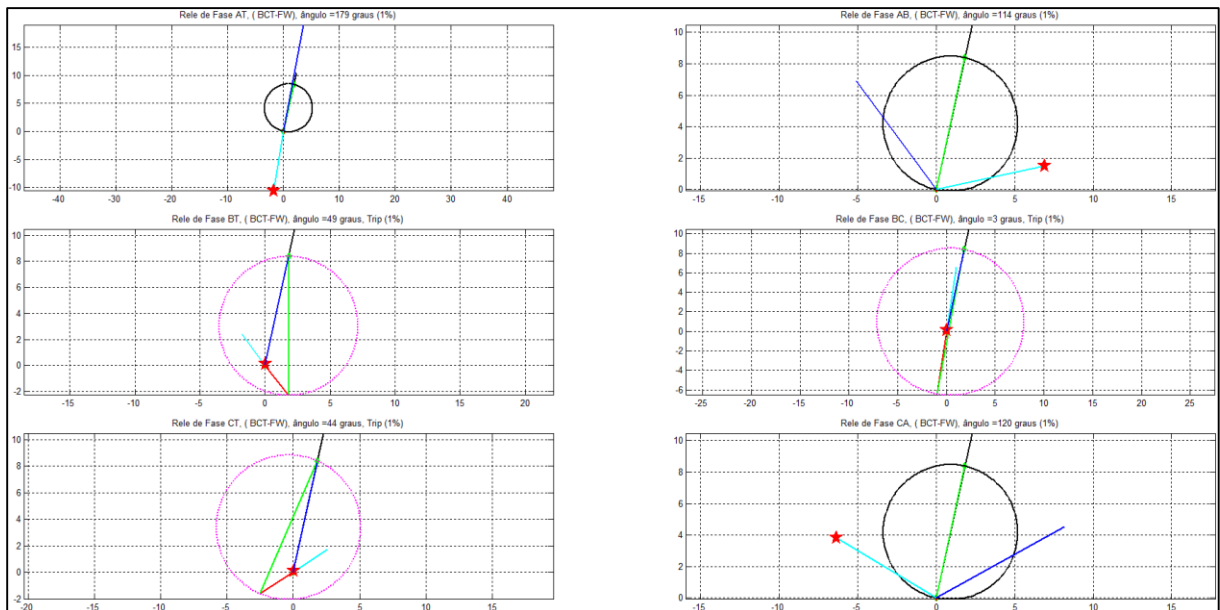


Figura 5.52: Relé Mho polarizado em quadratura sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Na **Figura 5.52** apenas os *loops* BT, CT e BC têm tensão medida abaixo de 50% da tensão nominal e estão polarizados em quadratura. Os demais *loops* estão autopolarizados.

Os *loops* BT e CT operam, mas como já foi enfatizado anteriormente, relés comerciais normalmente bloqueiam a atuação de *loops* monofásicos durante faltas bifásicas-terra.

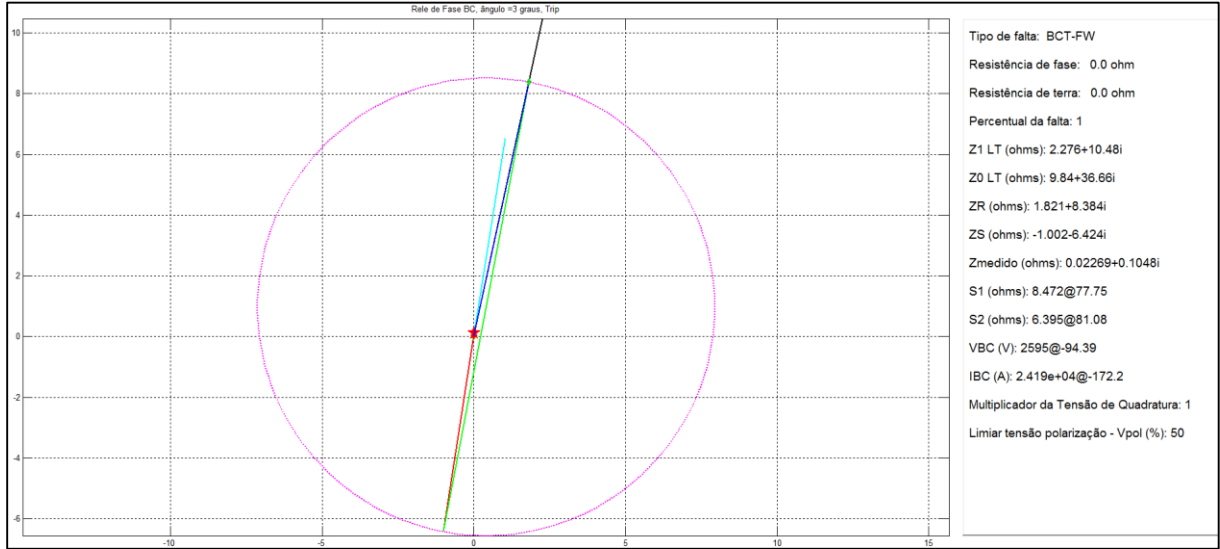


Figura 5.53: Loop BC do relé Mho polarizado por tensão de quadratura sob falta BCT a 1% da LT ($R_F=0 \Omega$).

A impedância Z_S na **Equação 4.50** é:

$$Z_{S_{LoopBCq}}^{CCBCT} = \frac{2C_2C}{C_1 + C_2C} Z_{E2} + \frac{C_0(1 - C)}{C_1 + C_2C} Z_{E0}$$

Onde:

$$C_1 = C_2 = 0,7974 - j0,0043$$

$$C_0 = 0,8489 - j0,0015$$

$$C = 0,7798 - j0,0083$$

$$Z_{E2} = (0,754 + j5,548) \Omega_{prim}$$

$$Z_{E0} = (2,078 + j8,846) \Omega_{prim}$$

Substituindo os valores numéricos vem:

$$Z_{S_{LoopBCq}}^{CCBCT} = (0,9098 + j6,0350) = (6,1032 \angle 81,43^\circ) \Omega_{prim}$$

O valor obtido é praticamente o mesmo apresentado na **Figura 5.53**.

5.3.2.4.2 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, com $R_\phi = 1,0 \Omega$ e $R_G = 1,0 \Omega$

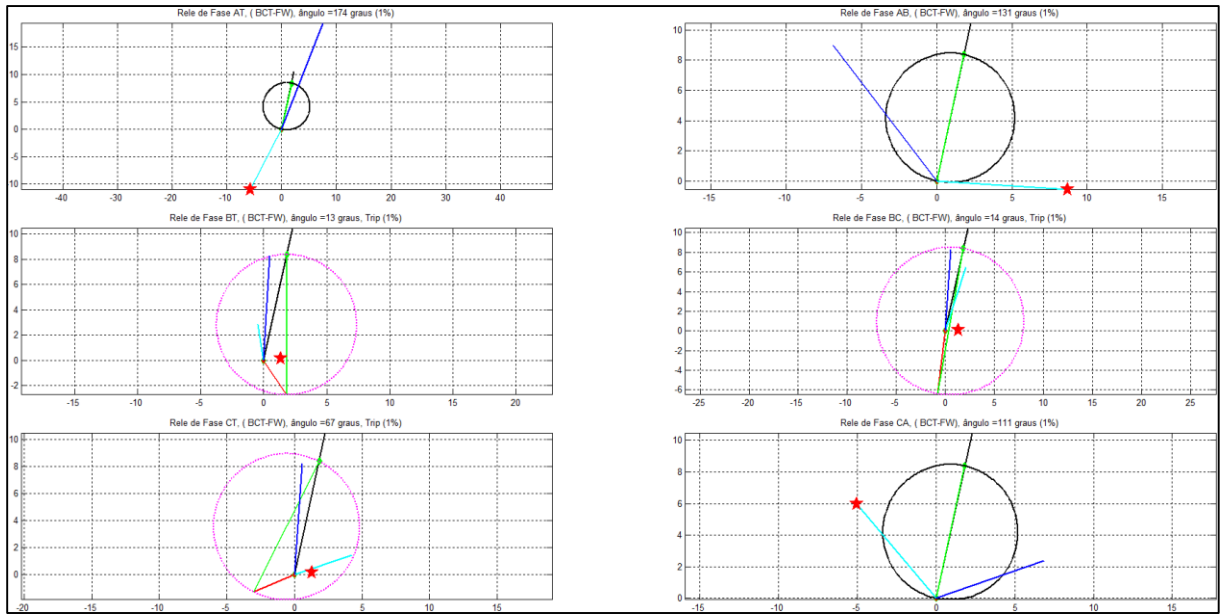


Figura 5.54: Relé Mho polarizado em quadratura sob falta BCT a 1% da LT, com $R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$.

Na simulação da **Figura 5.54** foi definido o limiar de 50% da tensão nominal para que um *loop* utilize a tensão de quadratura como tensão de polarização. Nos *loops* BT, CT e BC a tensão medida ficou abaixo do limiar estipulado e, portanto, eles estão polarizados por tensão de quadratura. Consequentemente, os *loops* AT, AB e CA continuam operando como autopolarizados e não apresentam ampliação da característica Mho.

Tal qual ocorreu na simulação de curto-circuito BCT sem resistência de falta, os *loops* BT, CT e BC chegaram ao *trip*.

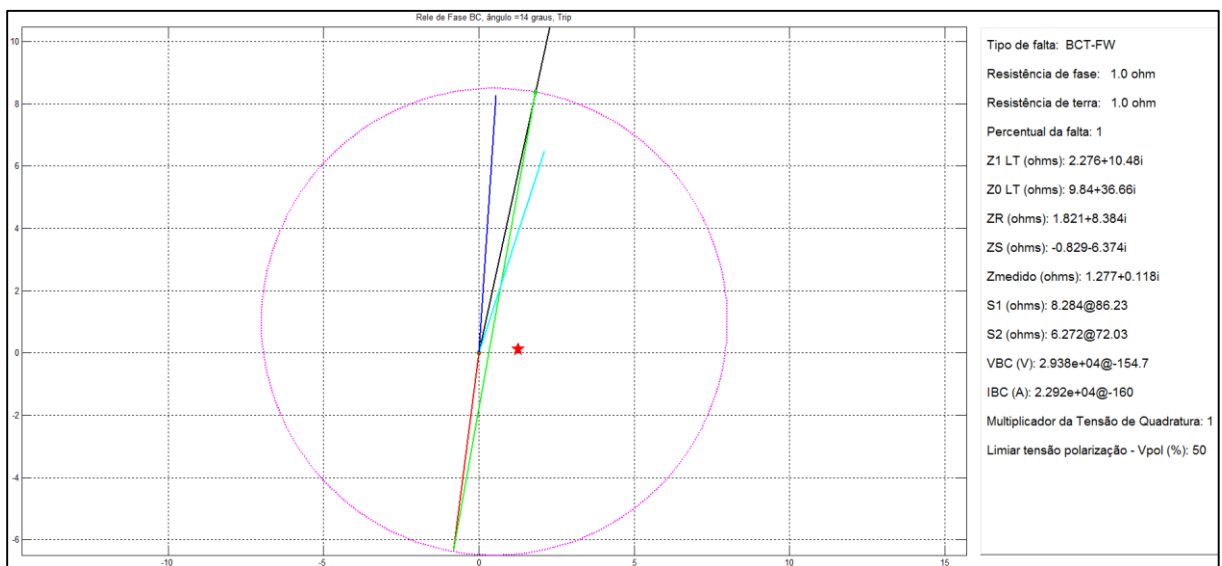


Figura 5.55: Loop BC do relé Mho polarizado em quadratura sob falta BCT a 1% da LT ($R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$).

Da **Equação 4.50**, obtém-se a expressão da impedância medida pelo *loop* BC. Substituindo os valores de cada parcela, obtém-se valor muito próximo ao da **Figura 5.55**:

$$Z_{Medida(Loop\ BC)}^{CCBCT(Quadratura)} = nZ_1 + \frac{1+C}{C_1+C_2C} R_\phi = (1,277 + j0,112) \Omega_{prim}$$

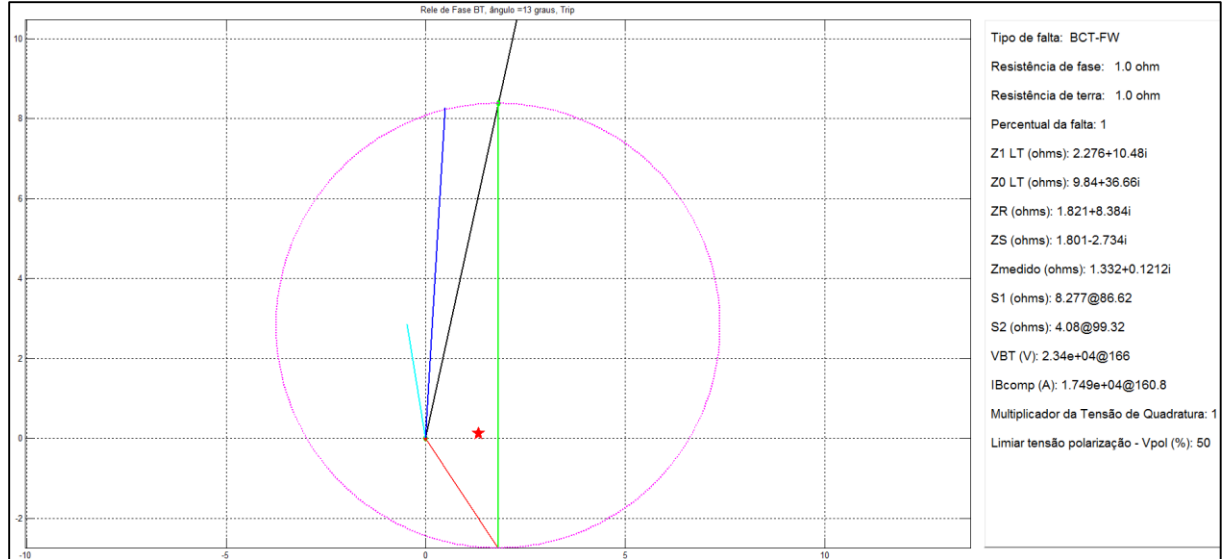


Figura 5.56: Loop BT do relé Mho polarizado em quadratura sob falta BCT a 1% da LT e com $R_F = 2 \Omega$.

A impedância medida na **Figura 5.56** tem praticamente o mesmo valor que na **Figura 5.57**, mas a impedância Z_S no *loop* BT dá-lhe maior alcance resistivo que o *loop* CT. Esse sobrealcançe do *loop* BT em relação ao *loop* CT faz com que os fabricantes normalmente optem pelo bloqueio dos *loops* monofásicos quando é detectada uma falta bifásica-terra.

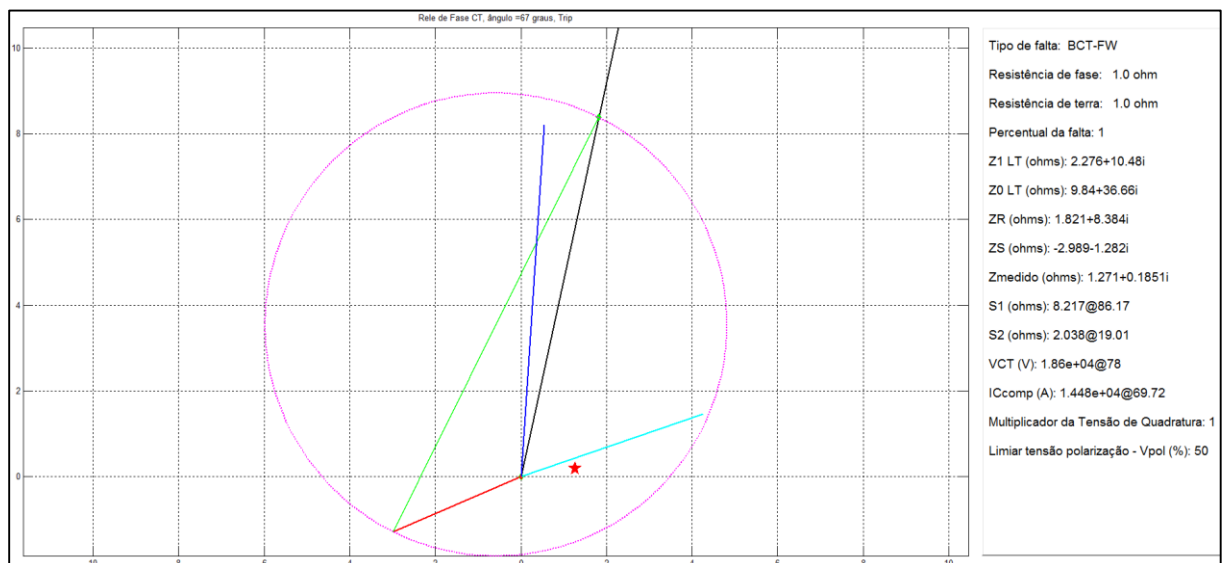


Figura 5.57: Loop CT do relé Mho polarizado em quadratura sob falta BCT a 1% da LT e com $R_F = 2 \Omega$.

5.3.2.5 Relé Mho Polarizado em Quadratura Sob Falta Trifásica Reversa

Tabela 5.12: Equações para o relé Mho polarizado por tensão de quadratura sob falta trifásica reversa.

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO EM QUADRATURA [CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA (ABCT) ATRÁS DO RELÉ]		
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Tensões e Correntes)	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase C} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase A} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{Fase B} (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{BC} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{CA} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase C} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q \dot{V}_E^{AB} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \right) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = - \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_0 \right) = Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.2.5.1 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

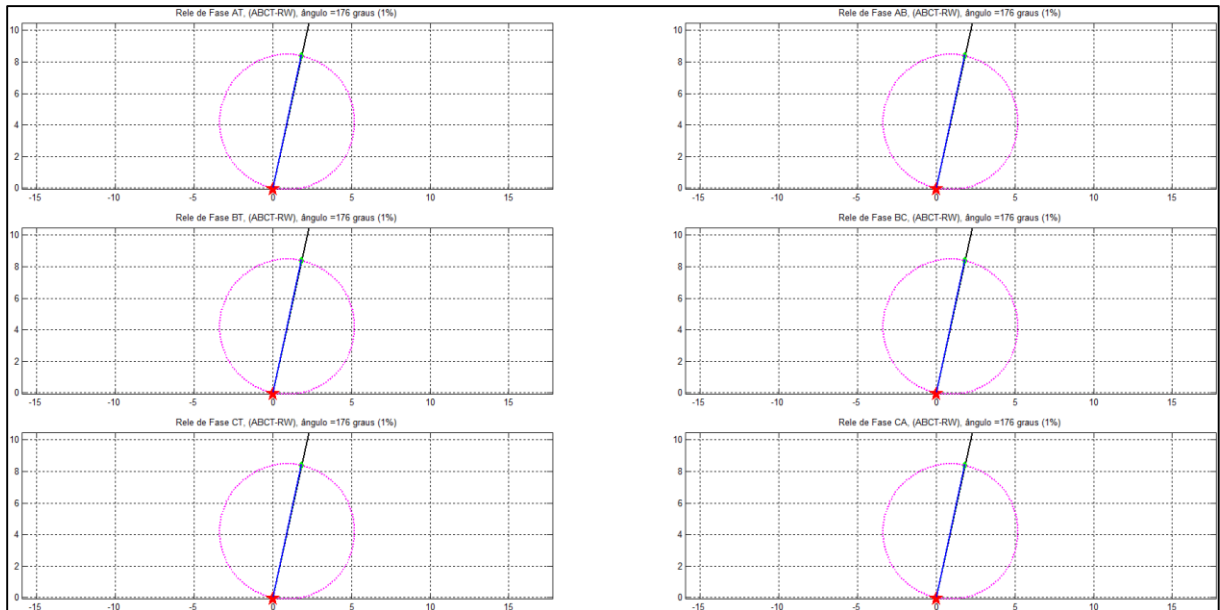


Figura 5.58: Relé Mho polarizado em quadratura sob curto-circuito trifásico, a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

As características de operação do relé Mho polarizado por tensão de quadratura não sofrem variação em seu diâmetro (**Figura 5.58**), comportando-se da mesma forma que o relé Mho autopolarizado sob a mesma falta reversa (**Figura 5.32**).

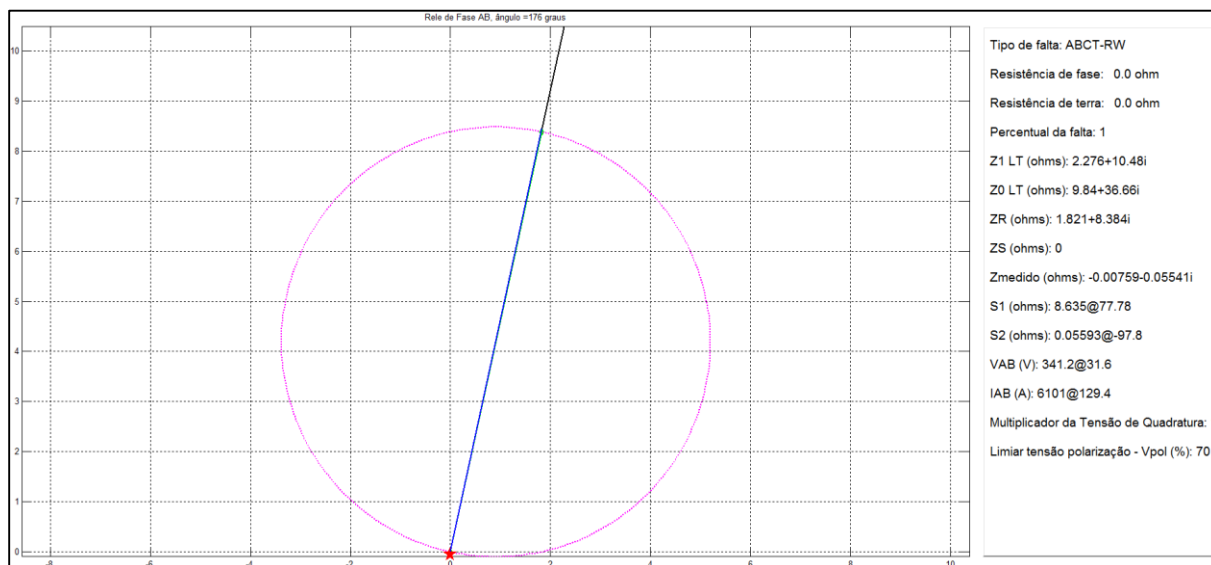


Figura 5.59: Loop AB do relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

Comparando a **Figura 5.59** com a **Figura 5.33**, observa-se comportamento idêntico. Foi considerado o limiar de tensão medida de 70% da tensão nominal do loop, abaixo da qual o relé opta pela utilização da tensão de quadratura, deixando de operar como autopolarizado.

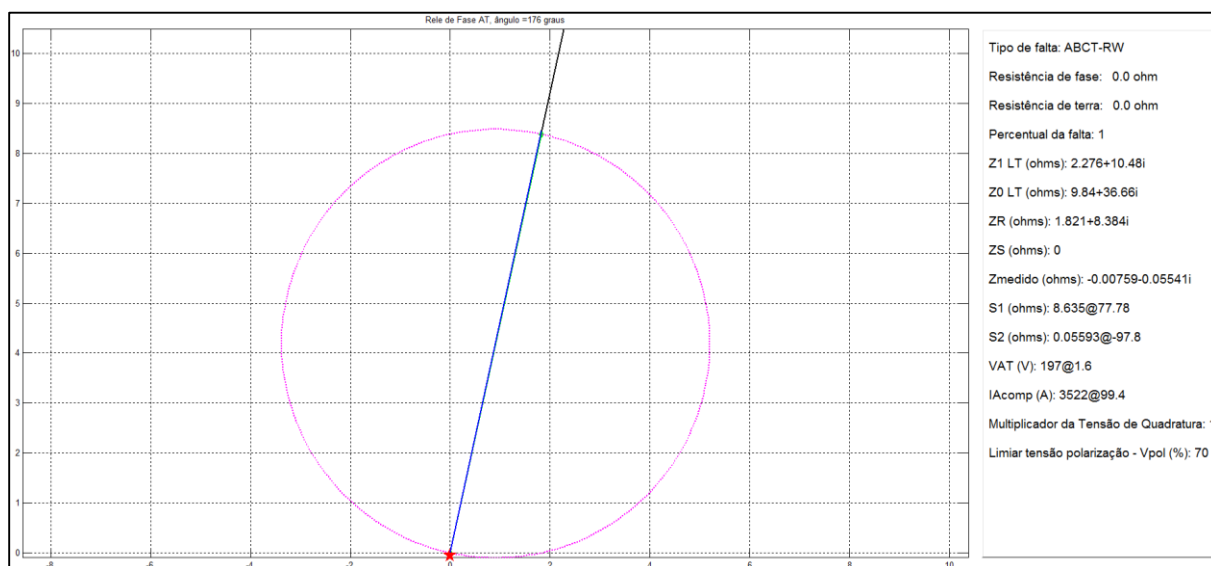


Figura 5.60: Loop AT do relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

A polarização cruzada também não garante ao relé Mho um comportamento seguro em condições reais de falta trifásica sólida e próxima. A tensão de polarização em cada loop ficou em torno de 0,25% da tensão nominal, o que não dá ao relé a garantia de operação correta.

5.3.2.5.2 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT Atrás do Relé e com $R_F = 2 \Omega$

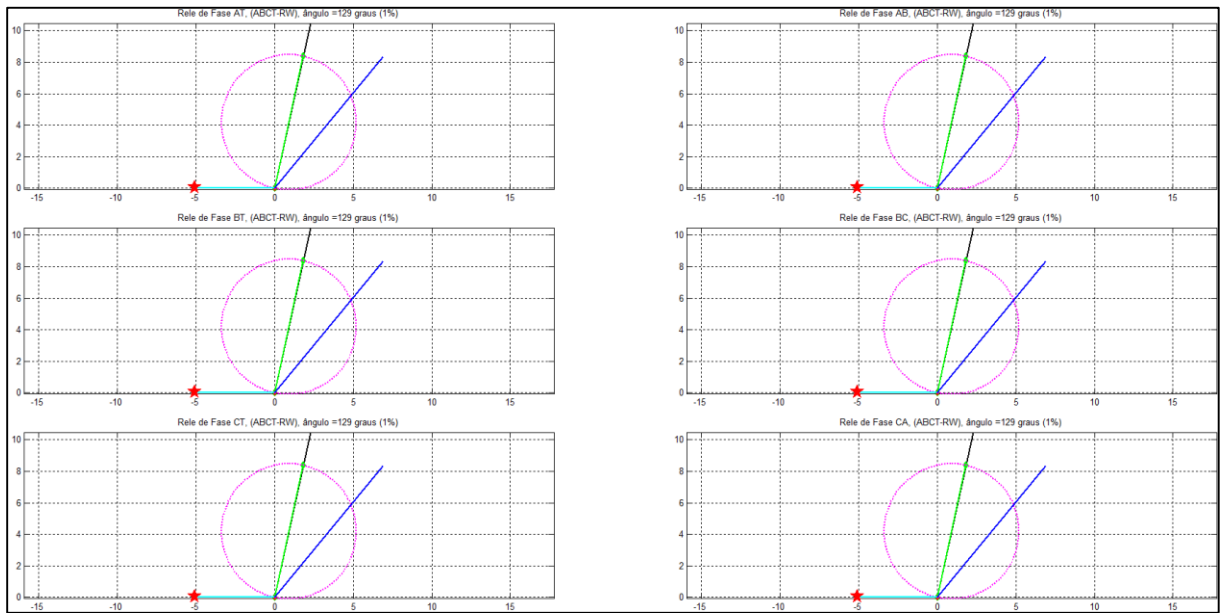


Figura 5.61: Relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica, a 1% da LT reversa ($R_F = 2 \Omega$ e $R_\phi = 1 \Omega$).

Todos os *loops* estão utilizando a tensão de quadratura para a polarização, já que as características de operação estão na cor magenta (**Figura 5.61**), mas o relé Mho comporta-se de forma idêntica ao relé Mho autopolarizado na mesma condição de falta (**Figura 5.35**).



Figura 5.62: Loop AB do relé Mho polarizado em quadratura sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 2 \Omega$).

Sob faltas assimétricas a polarização por tensão de quadratura apresentou ganhos significativos se comparada à autopolarização, mas tal qual foi verificado para faltas trifásicas à frente, o relé comporta-se de forma igual ao relé Mho autopolarizado no caso de faltas trifásicas reversas, não oferecendo a segurança necessária para a definição ou não do *trip*.

5.3.3 - Polarização Singela por Tensão de Memória

A polarização por tensão de memória propicia ao relé de distância as condições necessárias para a correta operação frente a faltas trifásicas sólidas próximas aos transdutores de tensão. As simulações apresentadas mais adiante permitirão verificar de forma bastante clara como a tensão memorizada na condição pré-falta oferece ao relé condições suficientes para que ele possa distinguir faltas trifásicas sólidas à frente e atrás dos seus transdutores de tensão, provocando uma ampliação da característica de operação do relé Mho no primeiro caso para englobar com segurança o ponto de falta e contraindo a característica de operação do relé Mho quando de falta trifásica sólida reversa, de forma que ela “fuja” da origem dos eixos, mantendo a estabilidade do relé e evitando o *trip* nessa condição. Os sinais do comparador de fases tipo cosseno que definem de forma generalizada um relé Mho polarizado por tensão de memória são:

$$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_{Loop}^{Memória} \end{cases}$$

Onde:

- S_1'' = Sinal de operação do comparador de fases tipo cosseno.
- S_2'' = Sinal de referência (ou polarização) do comparador de fases tipo cosseno.
- I_{Loop} = Corrente da(s) fase(s) de cada um dos seis *loops* de operação do relé Mho.
- $\dot{V}_{Loop}$ = Tensão da(s) fase(s) de cada um dos seis *loops* de operação do relé Mho.
- $\dot{U}_{Loop}^{Memória}$ = Tensão memorizada antes da incidência do curto-circuito.
- m = Multiplicador que define o percentual da tensão de memória a ser utilizada.

De forma a permitir a visualização da característica do relé Mho polarizado de forma singela por tensão de memória num plano de impedâncias, os sinais de operação e de referência do relé Mho do comparador de fases serão divididos pela corrente de cada *loop*. Para se observar a máxima ampliação da característica de operação do relé Mho, o coeficiente “ m ” será considerado igual a 1, utilizando assim 100% da tensão memorizada na condição pré-falta.

$$\begin{cases} S_1'' = \frac{I_{Loop} Z_R}{I_{Loop}} - \frac{\dot{V}_{Loop}}{I_{Loop}} = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{\dot{U}_{Loop}^{Memória}}{I_{Loop}} = \frac{\dot{V}_S^m}{I_{Loop}} + \frac{\dot{V}_{Loop}}{I_{Loop}} = Z_S^m + Z_{Medida} \end{cases}$$

Equação 5.3

Pode-se observar na **Equação 5.3** que o sinal de operação S_1'' é composto pela subtração entre a impedância réplica Z_R e a impedância medida Z_{Medida} . Isso pode ser perfeitamente observado de forma gráfica na **Figura 5.63**, onde S_1'' é uma das diagonais do paralelogramo que é formado por Z_R e Z_{Medida} .

Já o sinal de referência ou de polarização S_2'' , que na autopolarização é formado apenas pela impedância medida, no relé Mho polarizado de forma singela por tensão de memória passa a ser constituído pela soma de Z_{Medida} com a impedância Z_S^m , que é a impedância da fonte atrás do relé vista por cada um dos seis *loops* de operação durante a falta.

Normalmente, com a ampliação da característica de operação do relé Mho polarizado de forma singela por tensão de memória, o ângulo entre o sinal de operação S_1'' o sinal de referência S_2'' é reduzido nos *loops* relativos à falta em curso, aumentando a possibilidade de operação do relé Mho, já que para ângulos inferiores a 90° tem-se a condição de *trip*.

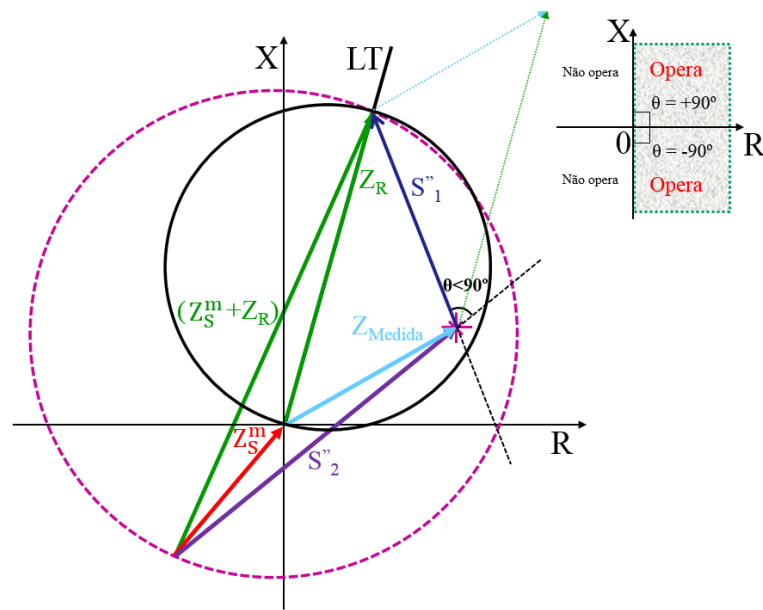


Figura 5.63: Característica de operação do relé Mho polarizado por tensão de memória.

Nas simulações apresentadas a seguir será possível identificar cada um dos sinais e grandezas da **Equação 5.3** comparando-se as cores das características simuladas com as da **Figura 5.63**. A exceção fica por conta do sinal S_2'' , após o momento em que o relé sai da condição autopolarizada para utilizar somente a tensão memorizada pré-falta. O sinal S_2'' na condição autopolarizada é a própria impedância medida, mas com a utilização da tensão memorizada passa a ser a soma entre a impedância medida e a impedância correspondente à da fonte atrás do relé.

5.3.3.1 Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica na LT

Tabela 5.13: Equações do comparador para relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica.

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO DE MEMÓRIA [CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA (ABCT) À FRENTE DO RELÉ]		
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Tensões e Correntes)	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{AB} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{BC} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{CA} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase A} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase B} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase C} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase C} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_\phi}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.3.1.1 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

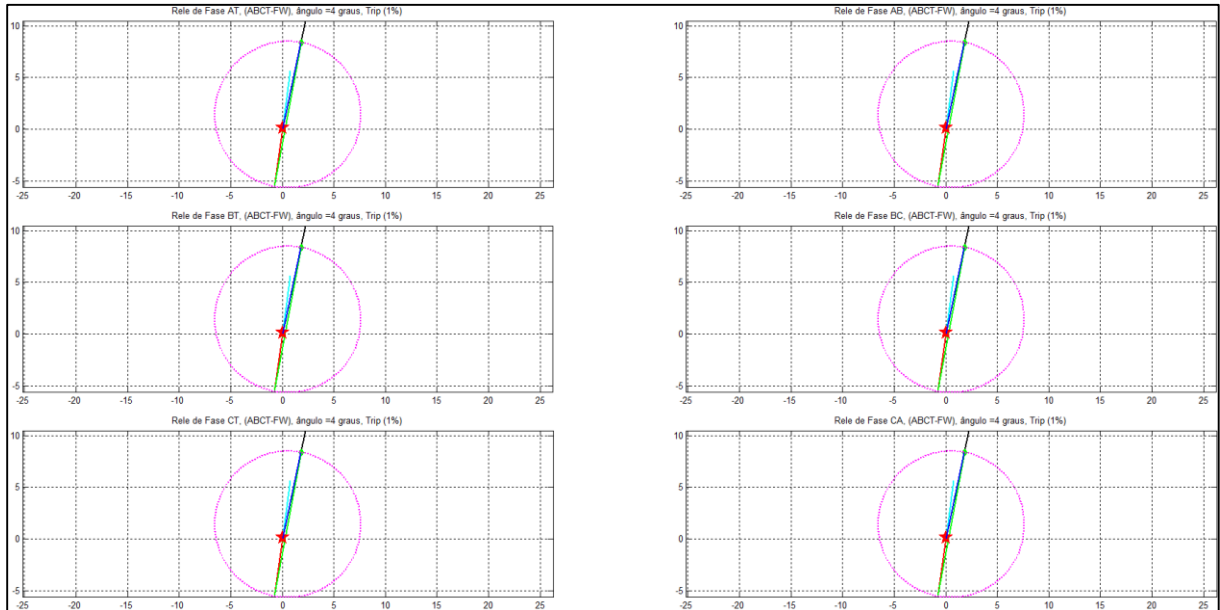


Figura 5.64: Relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A **Figura 5.64** mostra que todos os seis *loops* do relé Mho polarizado por tensão de memória comportam-se de forma completamente diferente dos *loops* do relé Mho polarizado em quadratura (**Figura 5.39**) e do relé Mho autopolarizado (**Figura 5.7**).

A simulação da falta trifásica em 1 % da LT protegida utilizou um limiar de tensão de 70 % da tensão nominal, abaixo do qual o relé Mho passa a utilizar a tensão pré-falta memorizada como sinal de referência S_2'' .

No relé Mho polarizado em quadratura ou autopolarizado, a impedância medida na mesma condição aqui analisada ficava muito próximo ao limiar de operação e a tensão de polarização em ambos os casos tinha valor muito baixo. No relé Mho polarizado por tensão de memória, a ampliação da característica Mho deixa a impedância medida quase no centro da circunferência, onde o relé está em clara condição de *trip*. Além disso, a tensão de polarização no relé Mho polarizado por tensão de memória é a própria tensão do sistema, gravada antes do início da falta, o que permite clara definição direcional.

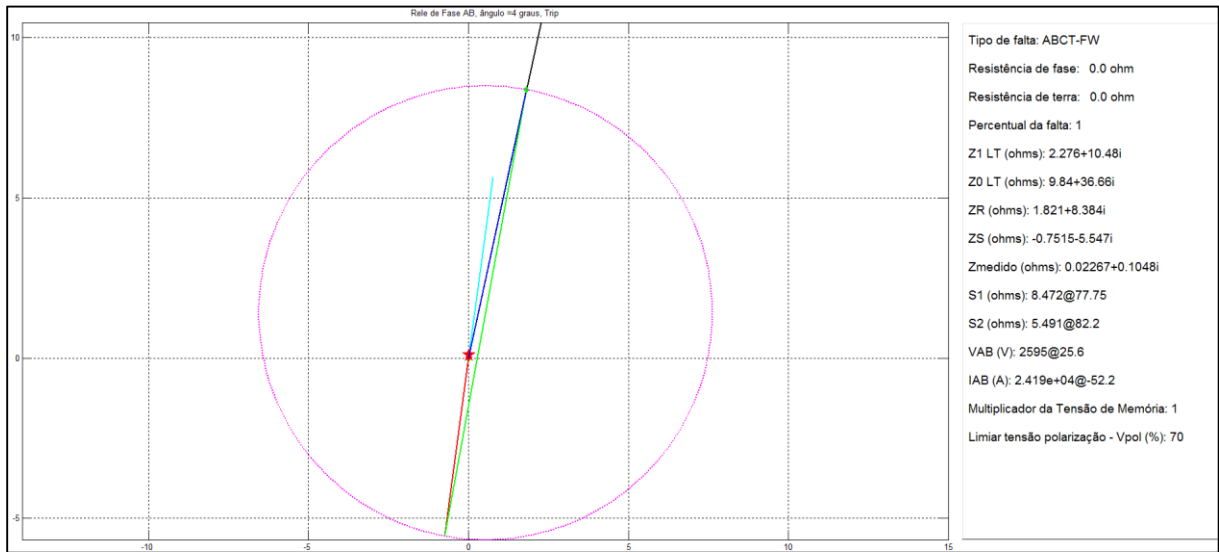


Figura 5.65: Loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A **Figura 5.65** mostra a característica de operação do *loop* AB. Nela, o sinal de polarização S_2'' calculado pelo programa é justamente a soma de 1% da impedância da LT com a impedância de sequência positiva do equivalente do sistema atrás do relé Mho, que é o que consta na **Equação 4.59** como sinal de referência ou polarização.

$$S_{2_{Loop\ AB}}^{CC3\emptyset} = Z_{E1} + \left(nZ_1 + \frac{R_\emptyset}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} = (5,7059 \angle 82,18^\circ) \Omega$$

O valor obtido acima é o mesmo medido por todos os outros cinco *loops* de falta.

5.3.3.1.2 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Com 2 Ω de Resistência de Falta

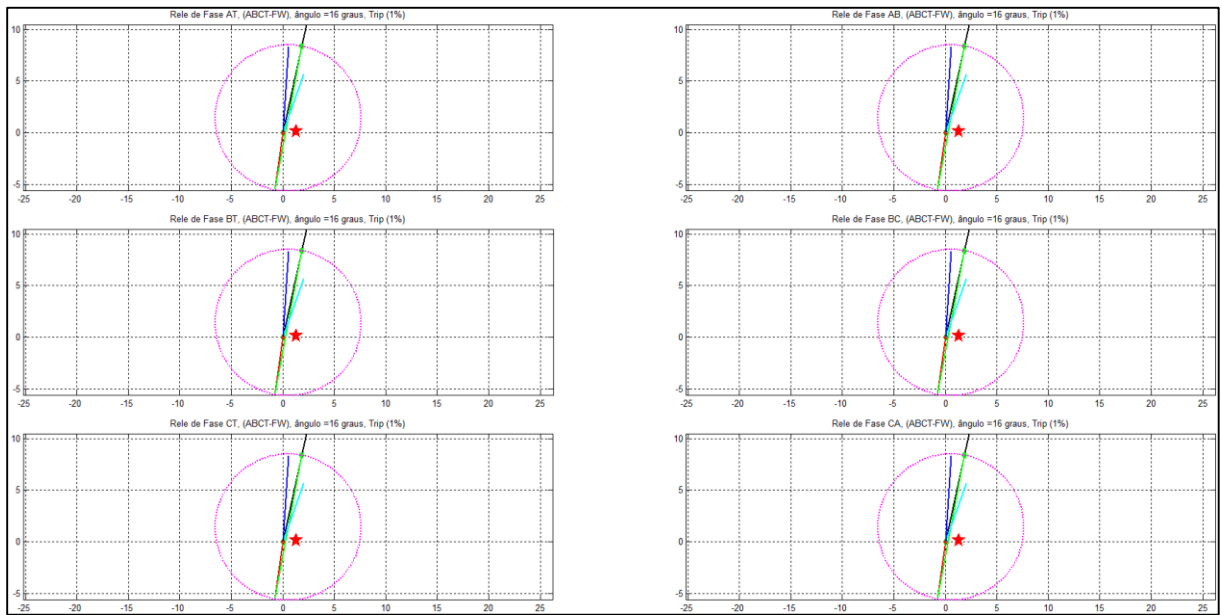


Figura 5.66: Relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R\phi = 1 \Omega$).

No relé Mho autopolarizado (**Figura 5.10**) e no relé Mho polarizado em quadratura (**Figura 5.42**), sob condição idêntica de falta, a impedância medida ficava bem próxima ao limiar de operação. Já o relé Mho polarizado com 100 % da tensão de memória (**Figura 5.66**) acomoda facilmente a impedância medida com resistência de falta nos seis loops.

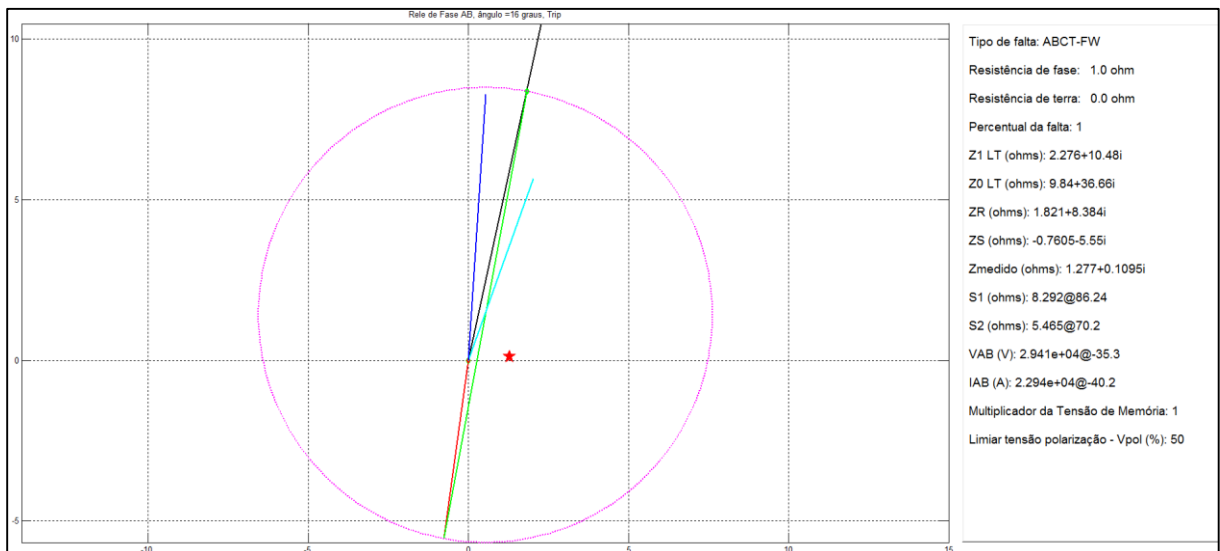


Figura 5.67: Loop AB do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$.

Observe que a impedância da fonte atrás do relé Mho (Z_S) que o programa apresenta é a mesma impedância de sequência positiva do equivalente do sistema à esquerda do ponto onde se encontra o relé Mho polarizado por tensão de memória (**Tabela 5.1**).

5.3.3.2 Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica na LT

Tabela 5.14: Equações do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta bifásica (BC).

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO DE MEMÓRIA [CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO (BC) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + aC_2} Z_{E1} - \frac{(a^2 + 2)C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + aC_2} nZ_1 + \frac{3C_2}{(1-a^2)(C_1 + aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + aC_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} \right) + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + a^2C_2} Z_{E1} + \frac{(a+2)C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 + a^2C_2} nZ_1 - \frac{3C_2}{(a-1)(C_1 + a^2C_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 + a^2C_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 - C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} \right) + \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - C_2} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left[\frac{aC_1}{aC_1 - C_2} Z_{E1} + \frac{(a^2 + 1)C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{a(C_1 + C_2)}{aC_1 - C_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(aC_1 - C_2)} Z_{E2} + \frac{a}{aC_1 - C_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 - aC_2} Z_{E1} + \frac{(a+1)C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 - aC_2} nZ_1 - \frac{C_2}{a(C_1 - aC_2)} Z_{E2} + \frac{1}{C_1 - aC_2} R_F \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.3.2.1 Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

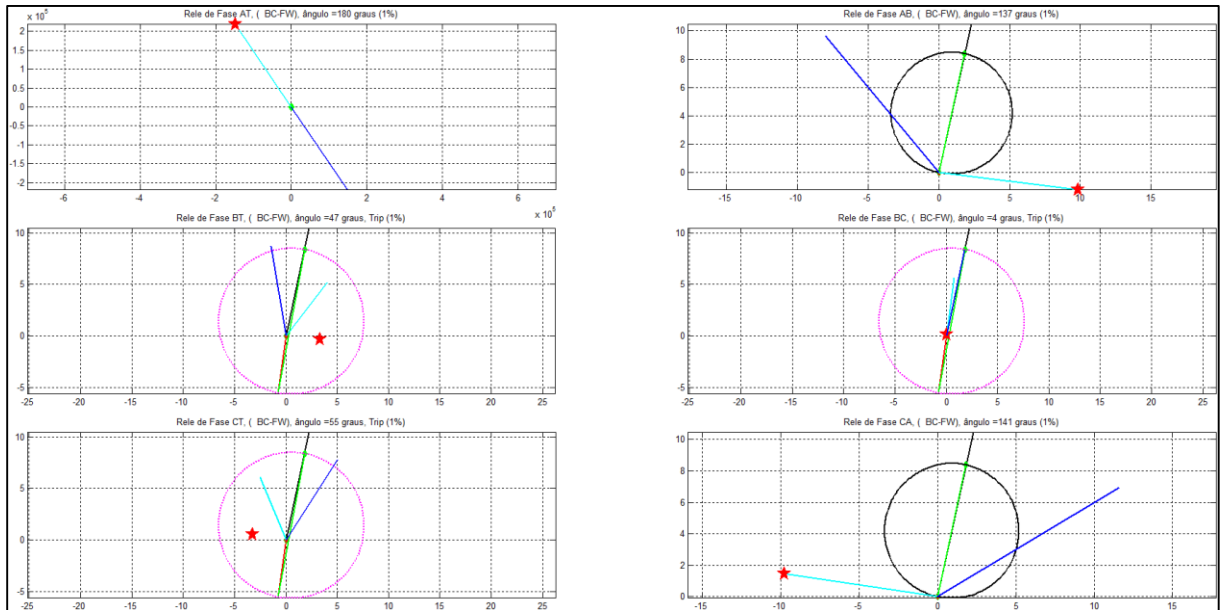


Figura 5.68: Relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta bifásica (BC) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Na **Figura 5.68** qualquer *loop* com tensão medida inferior a 70% da tensão nominal passa a utilizar a tensão pré-falta memorizada para sua polarização. Isso faz com que os *loops* BT e CT tenham suas características de operação ampliadas e cheguem ao *trip*, o que também ocorre no relé Mho polarizado em quadratura na mesma condição de falta (**Figura 5.44**). O mesmo não acontece na simulação da mesma falta para um relé Mho autopolarizado (**Figura 5.12**), onde a característica de operação do relé Mho autopolarizado não é ampliada e consequentemente não alcança a impedância medida nesses *loops* monofásicos.

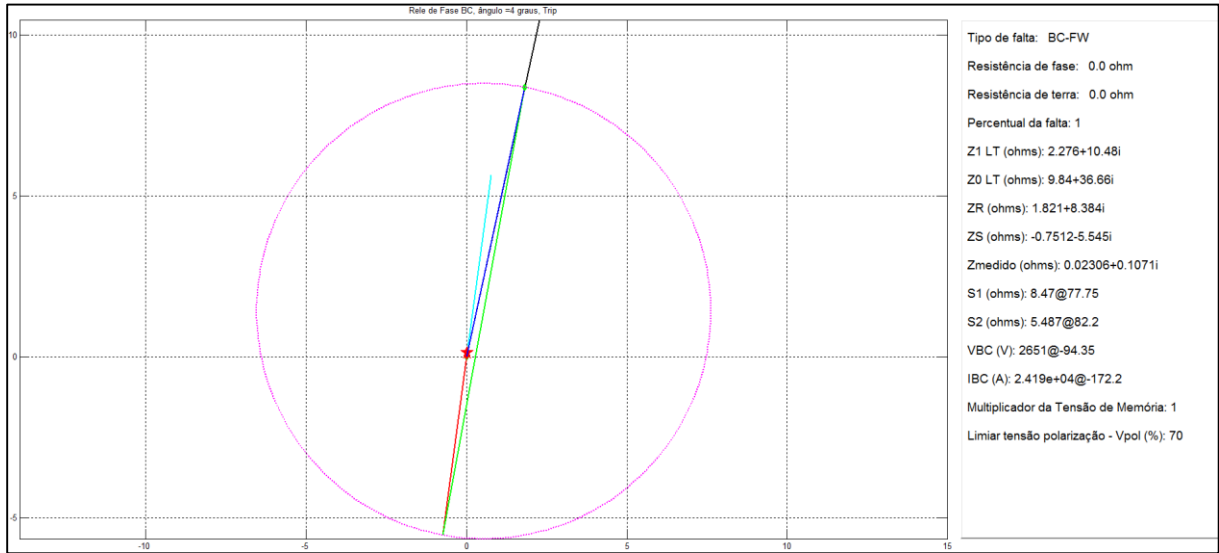


Figura 5.69: Loop BC do relé Mho polarizado por memória sob falta bifásica (BC) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

Da **Equação 4.66** obtém-se impedância da fonte atrás do relé (Z_S) do *loop* BC sob falta bifásica à frente. O resultado obtido é o mesmo da simulação que consta na **Figura 5.69**:

$$Z_{S_{LoopBC}}^{CCBC} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} = Z_{E1} = (0,754 + j5,548) \Omega_{prim}$$

A expressão da impedância da fonte apresentada acima traz consigo uma observação notável. Em sistemas elétricos de potência distantes de grandes blocos de geração os divisores de corrente C_1 e C_2 são praticamente os mesmos. A mesma conclusão é válida para as impedâncias equivalentes do sistema à esquerda, Z_{E1} e Z_{E2} . Considerando isso, a impedância da fonte atrás do relé Mho polarizado por tensão de memória e exposto a uma falta bifásica é a própria impedância de sequência positiva do equivalente do sistema atrás do relé Mho. Isso permite concluir que se o sistema atrás do relé Mho é forte, sua impedância de sequência positiva tem um valor pequeno e consequentemente a ampliação da característica de operação do relé Mho também será pequena. Por outro lado, se o sistema é fraco, sua impedância de sequência positiva é grande e a ampliação provocada por ela também será grande.

5.3.3.2.2 Curto-circuito Bifásico (BC), a 1% da LT, Com 2 Ω de Resistência de Falta

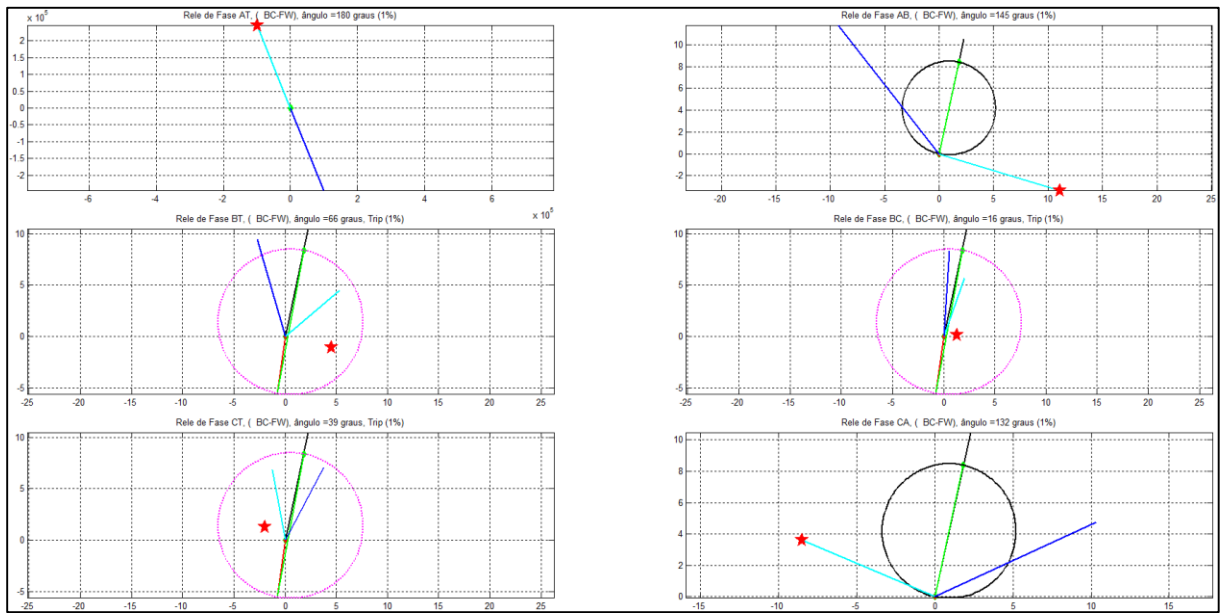


Figura 5.70: Relé Mho polarizado por memória sob curto-circuito BC a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R\phi = 1 \Omega$).

Na simulação da **Figura 5.70** a tensão memorizada é utilizada na polarização de um *loop* quando a tensão medida nele cai abaixo de 70% da tensão nominal. Em função da presença de resistência de falta, a simetria que existia entre os *loops* BT e CT, e também entre os *loops* AB e CA quando a resistência de falta era igual a zero (**Figura 5.68**), não ocorre mais. O módulo da impedância medida, em relação à simulação sem resistência de falta, aumenta nos *loops* nos *loops* BT e AB, mas reduz nos *loops* CA e CT. Os *loops* monofásicos chegam ao *trip*, mas em aplicações reais isso não ocorreria, pois não há corrente de sequência zero na falta bifásica.

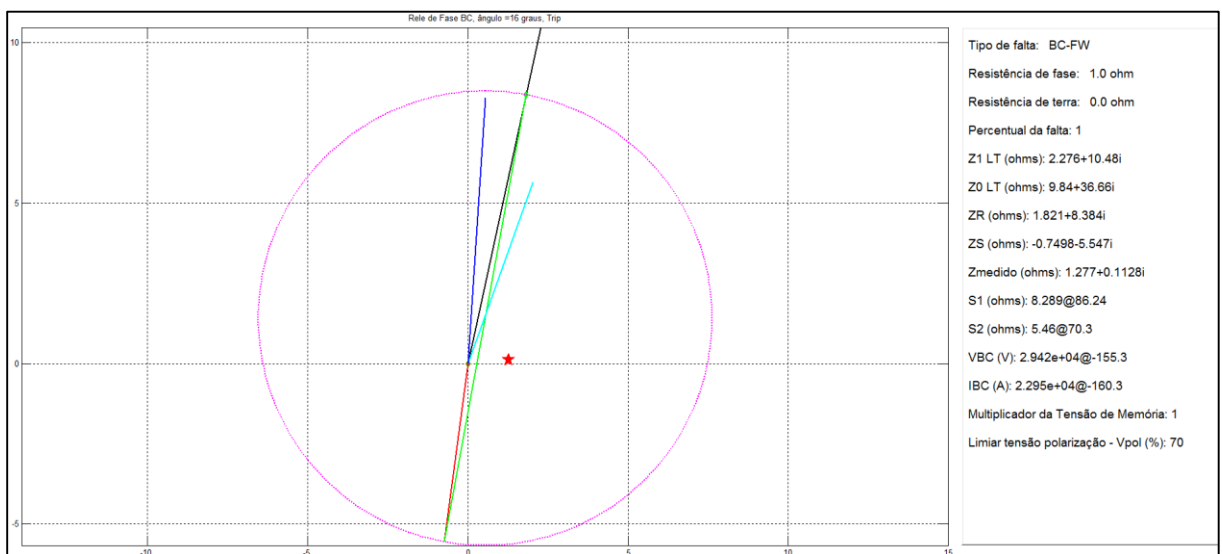


Figura 5.71: Loop BC do relé Mho polarizado por memória sob falta BC a 1% da LT, com $R_F = 2 \Omega$ ($R\phi = 1 \Omega$).

Na **Figura 5.71**, Apesar da resistência de falta envolvida, a impedância medida encontra-se próxima ao centro da característica expandida. O comportamento do *loop* BC polarizado em quadratura (**Figura 5.47**) é praticamente idêntico ao observado aqui.

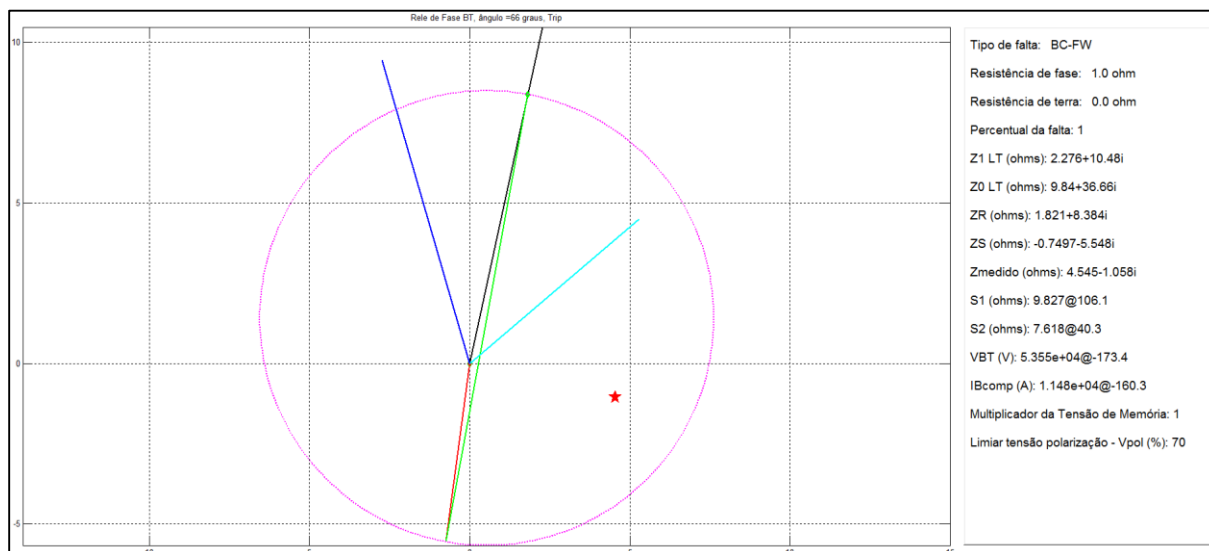


Figura 5.72: Loop BT do relé Mho polarizado por memória sob falta BC a 1% da LT, com $R_F=2 \Omega$ ($R_\phi=1 \Omega$).

Como pode ser visto na **Figura 5.72** e na **Figura 5.73**, os *loops* monofásicos BT e CT também chegam ao *trip*. Como esta simulação considerou que os *loops* utilizariam a tensão de memória se a tensão medida no *loop* caísse abaixo de 70 % da tensão nominal, os *loops* BT e CT atenderam a essa condição e chegaram ao *trip*. A definição deste alto limiar de tensão utilizada na simulação tem fins puramente didáticos. Relés comerciais normalmente costumam utilizar limiares de tensão medida bem mais baixos para lançar mão da polarização por tensão de memória. Há fabricantes que utilizam percentuais de tensão de memória o tempo todo.

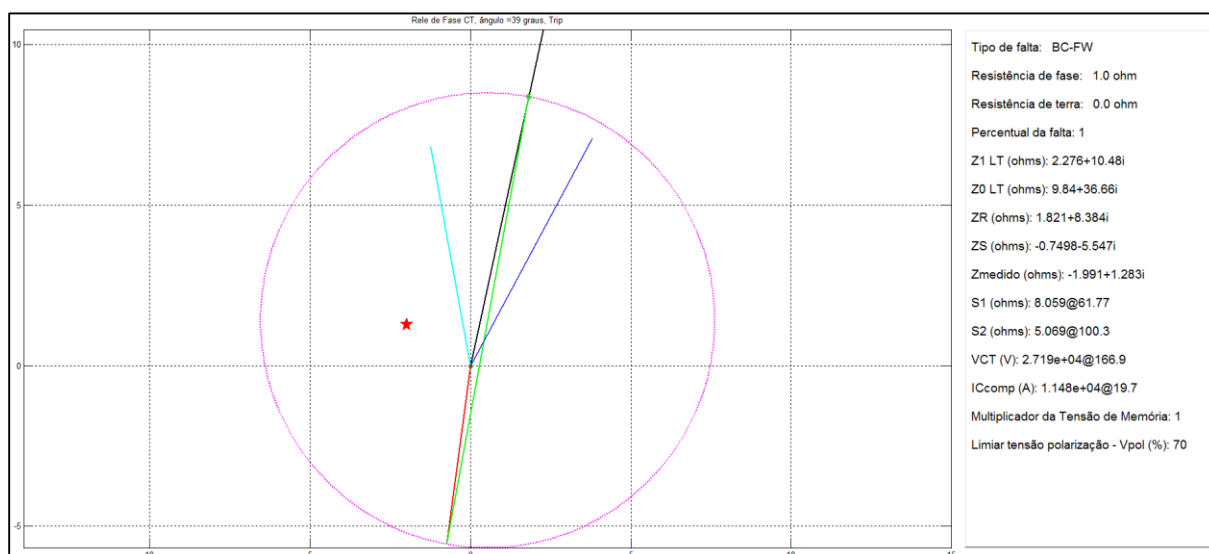


Figura 5.73: Loop CT do relé Mho polarizado por memória sob falta BC a 1% da LT, com $R_F=2 \Omega$ ($R_\phi=1 \Omega$).

5.3.3.3 Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Monofásica na LT

Tabela 5.15: Equações do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta monofásica (AT).

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO DE MEMÓRIA [CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO (AT) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2' = \left[\frac{(1-a^2)C_1}{3(C_1 + C_2)} Z_{E1} + \frac{(1-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} \right] + \frac{(1-a^2)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a^2)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a^2}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \\ S_2' = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} Z_{E1} - \frac{C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} \right) + \left[\frac{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0}{C_1 - C_2} nZ_1 + \frac{2C_2}{C_1 - C_2} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 - C_2} Z_{E0} + \frac{3}{C_1 - C_2} R_F \right] \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 - \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} - \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} - \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \\ S_2' = \left[\frac{(1-a)C_1}{3(C_1 + C_2)} Z_{E1} + \frac{(1-a^2)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} \right] + \frac{(1-a)[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{3(C_1 + C_2)} nZ_1 + \frac{(a^2-a)C_2}{3(C_1 + C_2)} Z_{E2} + \frac{(1-a)C_0}{3(C_1 + C_2)} Z_{E0} + \frac{1-a}{C_1 + C_2} R_F \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2' = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \right] \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \frac{a^2[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a^2-a)C_2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} - \frac{(a^2-1)C_0}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a^2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \\ S_2' = \left[\frac{a^2C_1}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E1} + \frac{a^2C_2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{a^2C_0}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \frac{(a^2-a)C_2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a^2-1)C_0}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a^2}{a^2C_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \frac{a[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 - \frac{(a-a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} - \frac{(a-1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} - \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \\ S_2' = \left[\frac{aC_1}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E1} + \frac{a^2C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{aC_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \frac{a[C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0]}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} nZ_1 + \frac{(a-a^2)C_2}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{(a-1)C_0}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} Z_{E0} + \frac{3a}{aC_1 + a^2C_2 + (1+3k_0)C_0} R_F \end{cases}$

5.3.3.3.1 Curto-circuito Monofásico (AT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

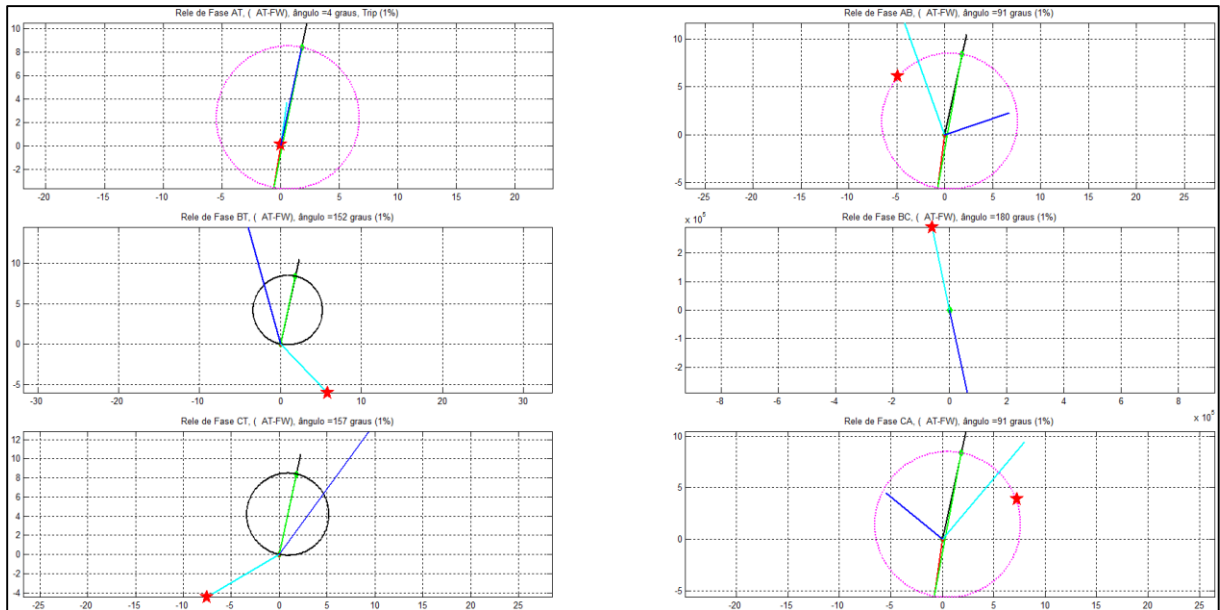


Figura 5.74: Relé Mho autopolarizado sob curto-circuito monofásico (AT) a 1% da LT, sem resistência de falta.

Na simulação da **Figura 5.74**, *loops* com tensão medida inferior a 70 % da tensão nominal passam a utilizar a polarização por tensão de memória. Isso faz com que a impedância medida fique bem próxima ao limiar de operação das características Mho dos *loops* AB e CA.

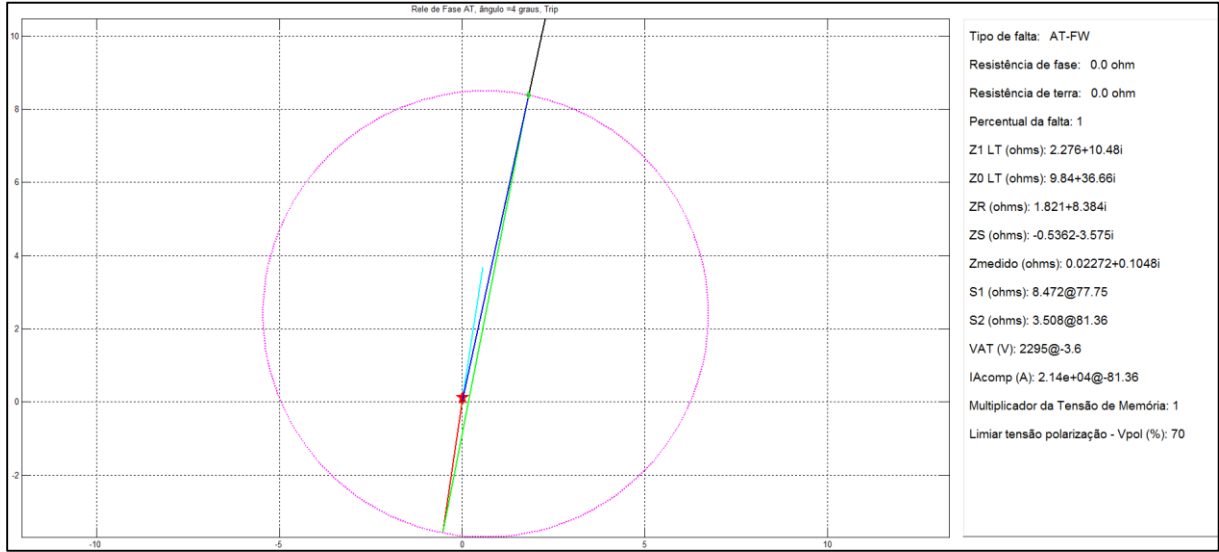


Figura 5.75: Loop AT do relé Mho polarizado por memória sob falta monofásica (AT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A **Equação 4.74** traz a expressão da impedância Z_S para o *loop* de falta AT sob falta monofásica entre a fase A e a terra:

$$Z_{S_{LoopAT}}^{CCAT} = \frac{C_1 Z_{E1}}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} + \frac{C_2 Z_{E2}}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} + \frac{C_0 Z_{E0}}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0}$$

Onde:

$$C_1 = C_2 = 0,7974 - j0,0043$$

$$C_0 = 0,8489 - j0,0015$$

$$k_0 = 0,8451 - j0,0571$$

$$Z_{E1} = Z_{E2} = (0,754 + j5,548)\Omega_{prim}$$

$$Z_{E0} = (2,078 + j8,846)\Omega_{prim}$$

Substituindo os valores acima na expressão que define Z_S :

$$Z_{S_{LoopAT}}^{CCAT} = 2 \times (0,1025 + j0,9655) + (0,3297 + j1,6448) = (0,5348 + j3,5757) \Omega_{prim}$$

Observe que o valor de Z_S é praticamente o mesmo calculado pelo programa (**Figura 5.75**).

5.3.3.3.2 Curto-circuito Monofásico (AT) a 1% da LT e Com $R_F = 2 \Omega$ ($R_\phi = 0 \Omega$ e $R_G = 2 \Omega$)

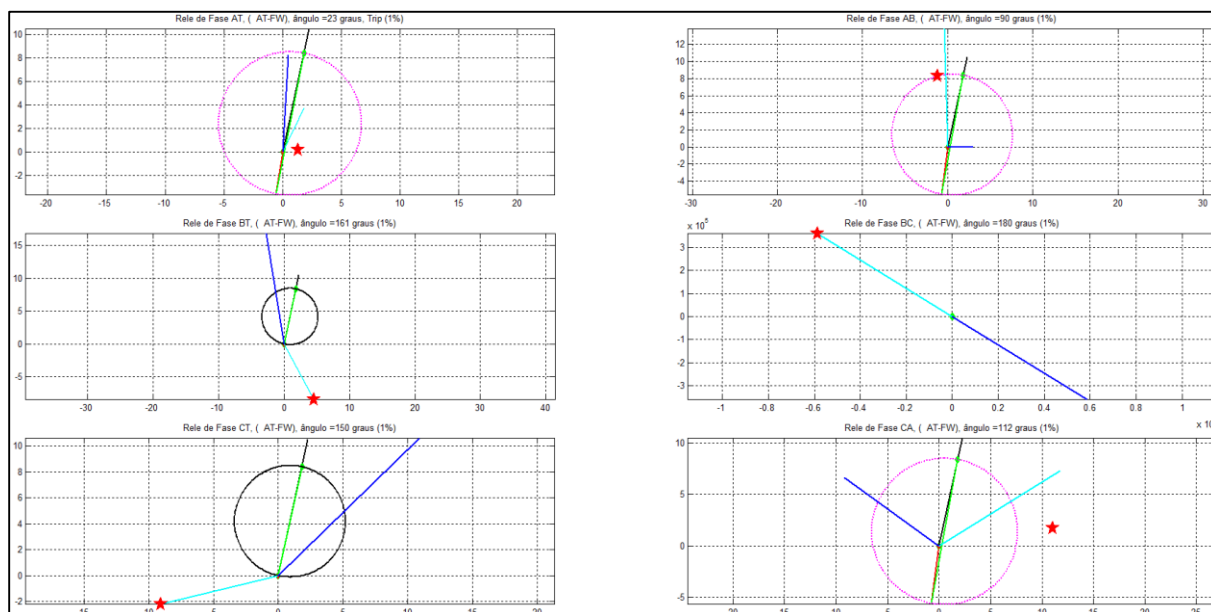


Figura 5.76: Relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta AT a 1% da LT ($R_F = 2 \Omega$ e $V_m = 90\%$).

O limiar de tensão medida pelo *loop* para a utilização da tensão de memória é de 90% da tensão nominal do *loop*. No *loop* AB a impedância medida fica no limiar de operação da característica do relé Mho. No relé Mho polarizado em quadratura (**Figura 5.50**) a expansão do *loop* AB é um pouco menor e a impedância medida fica fora da característica expandida.

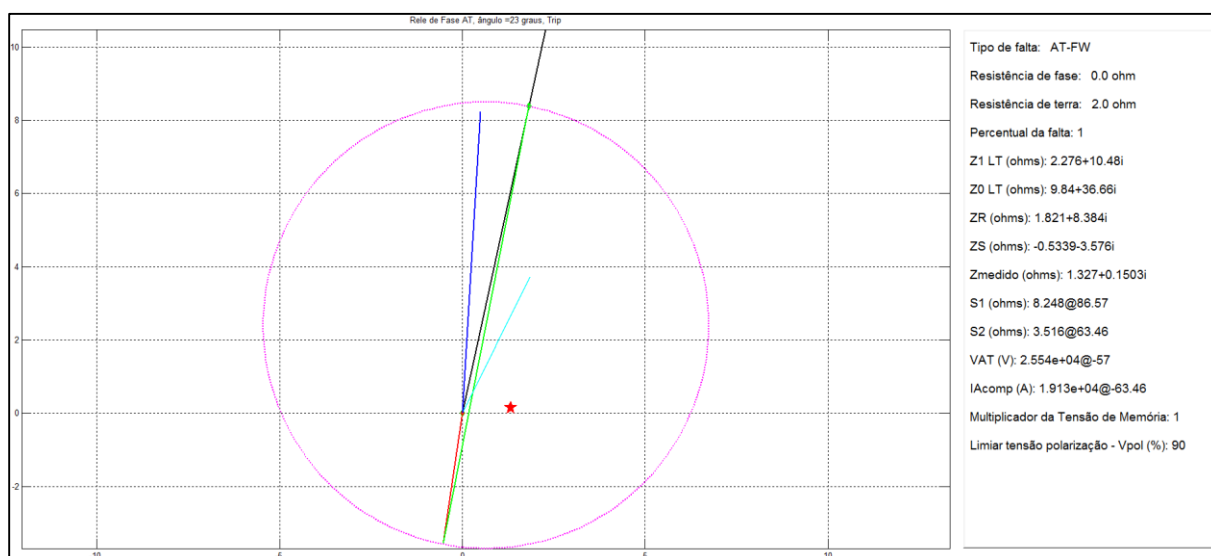


Figura 5.77: Loop AT do relé Mho polarizado por memória sob falta AT a 1% da LT e $R_F = 2 \Omega$ ($R_G = 2 \Omega$).

A **Figura 5.77** apresenta comportamento idêntico ao do *loop* AT polarizado em quadratura e sob a mesma falta (**Figura 5.51**). No *loop* AT no relé Mho autopolarizado (**Figura 5.22**) a impedância medida fica bem próxima ao limiar de operação do relé.

5.3.3.4 Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Bifásica-terra na LT

Tabela 5.16: Equações do comparador cosseno para relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra (BCT).

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO DE MEMÓRIA [CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA (BCT) À FRENTE DO RELÉ]	
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + a C_2 C} Z_{E1} + \frac{(a^2 + 2) C_2 C}{(a^2 - 1)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a C_2 C} n Z_1 + \frac{3 C_2 C}{(1 - a^2)(C_1 + a C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a C_2 C} R_\phi \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2 C} Z_{E1} + \frac{C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} \right) + \left(n Z_1 + \frac{1 + C}{C_1 + C_2 C} R_\phi \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + a^2 C_2 C} Z_{E1} + \frac{(a + 2) C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} \right] + \left[\frac{C_1 + C_2 C}{C_1 + a^2 C_2 C} n Z_1 - \frac{3 C_2 C}{(a - 1)(C_1 + a^2 C_2 C)} Z_{E2} + \frac{1 + C}{C_1 + a^2 C_2 C} R_\phi \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
AT	Corrente compensada não definida analiticamente.
BT	Corrente compensada não definida analiticamente.
CT	Corrente compensada não definida analiticamente.

5.3.3.4.1 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Sem Resistência de Falta

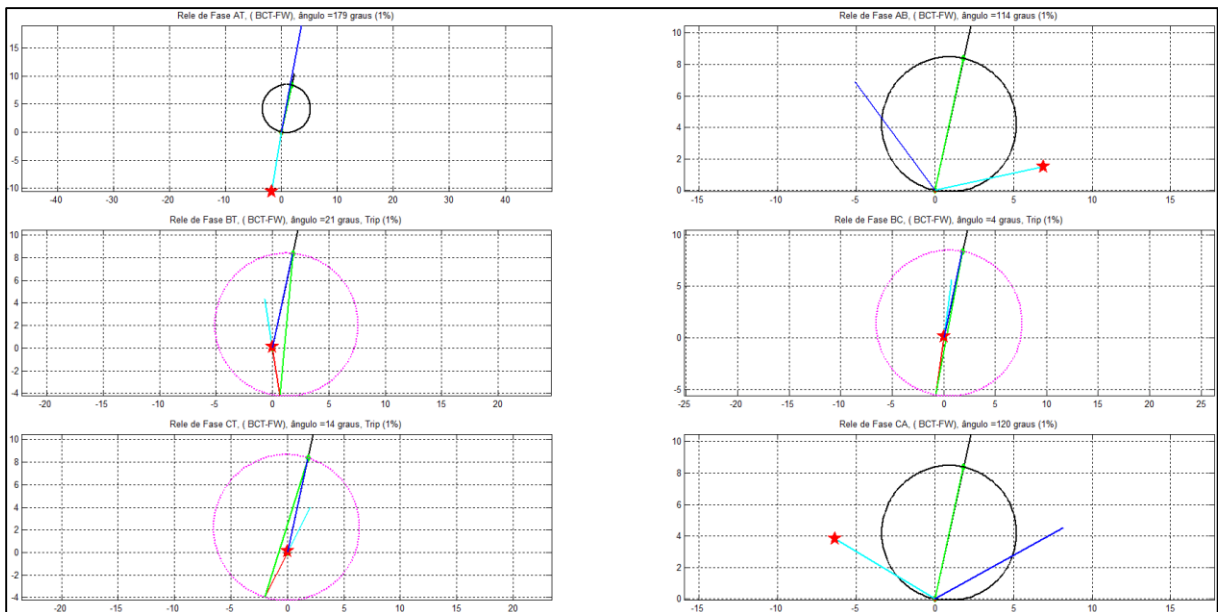


Figura 5.78: Relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta bifásica-terra (BCT) a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A simulação da **Figura 5.78** considerou 50% da tensão nominal como limiar para a utilização da polarização por tensão de memória. Os *loops* BC, BT e CT chegam ao *trip* com impedância medida sobre o lugar geométrico que representa a LT.

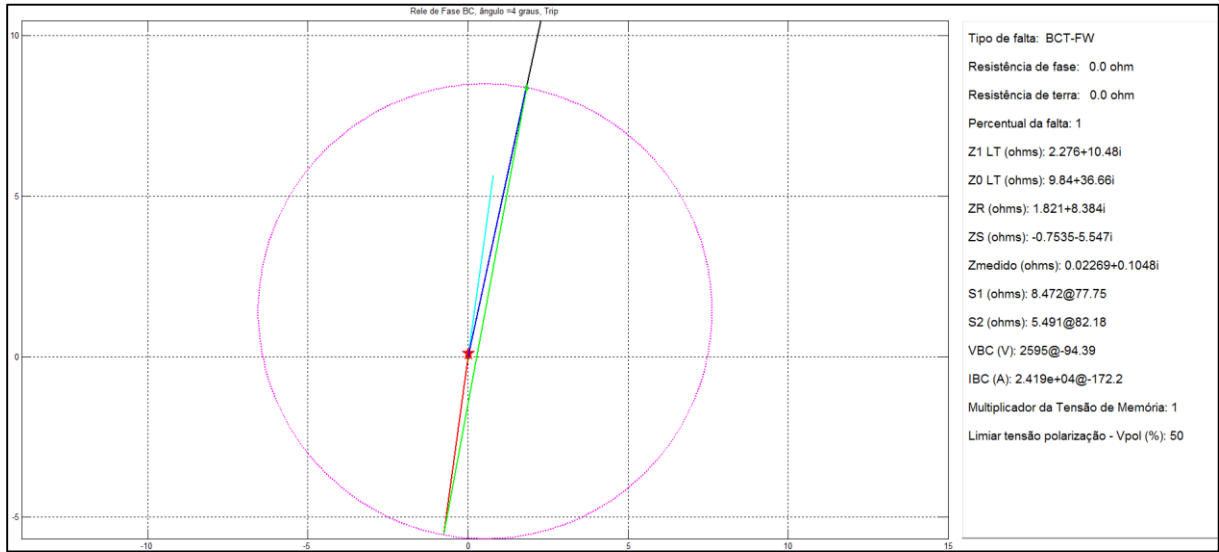


Figura 5.79: Loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta BCT a 1% da LT ($R_F = 0 \Omega$).

A impedância da fonte atrás do relé no *loop* BC sob falta BCT é dada pela expressão abaixo, a qual é obtida da **Equação 4.78**:

$$Z_{S(Loop BC)}^{CC\emptyset\emptyset T (Memória)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 C} Z_{E1} + \frac{C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2}$$

A igualdade entre os divisores de corrente de sequência positiva e negativa, além da igualdade entre as impedâncias de sequência positiva e negativa da fonte atrás do relé permitem a seguinte simplificação:

$$Z_{S(Loop BC)}^{CC\emptyset\emptyset T (Memória)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 C} Z_{E1} + \frac{C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} = \frac{C_1}{C_1(1 + C)} Z_{E1}(1 + C) = Z_{E1}$$

Portanto, a impedância Z_S no *loop* BC de um relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta bifásica-terra envolvendo as fases B, C e a terra no circuito aqui analisado é a própria impedância de sequência positiva da fonte à esquerda. Esse é o valor obtido nessa simulação (**Figura 5.79**).

Como já foi informado anteriormente, o fasor de impedância Z_S na **Figura 5.79** está com a ponta da seta na origem, mas o número complexo que ali aparece indica a base do fasor. O cálculo da impedância Z_S , que aqui é igual a Z_{E1} , tem parcelas real e complexa positivas. Dessa forma, graficamente esse fasor é transladado para o terceiro quadrante.

5.3.3.4.2 Curto-circuito Bifásico-terra (BCT), a 1% da LT, Com $R_\phi = 1,0 \Omega$ e $R_G = 1,0 \Omega$

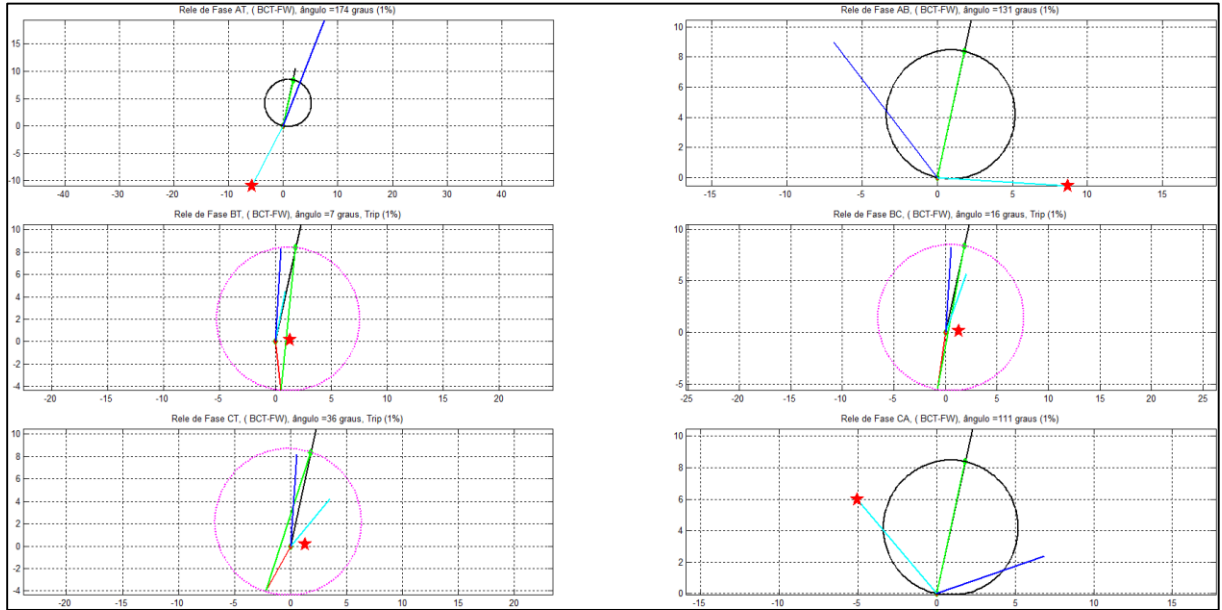


Figura 5.80: Relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta BCT a 1% da LT, com $R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$.

A simulação apresentada na **Figura 5.80** utilizou o limiar de tensão de 50 % da tensão nominal do loop para a utilização da tensão de memória no sinal de polarização do relé Mho. Nessa condição, somente os loops BC, BT e CT estão polarizados por tensão de memória e os demais continuam autopolarizados.

Outra informação já abordada anteriormente é a emissão ou não do sinal de *trip* pelos loops de falta monofásicos BT e CT. Como este trabalho tem cunho puramente didático, nesta simulação estes loops operam, mas isso não ocorreria na maioria dos relés de distância disponíveis no mercado. Manuais de relés de distância de vários fabricantes citam a possibilidade de sobrealcançe de um dos loops de falta monofásicos durante faltas bifásicas-terra. Nas simulações apresentadas até agora, vê-se que nas faltas bifásicas-terra a impedância da fonte atrás do relé (Z_S) no loop BT apresenta-se no quarto quadrante, o que dá a este loop um alcance resistivo mais acentuado que o loop CT. Esse comportamento pode fazer com que ocorra sobrealcançe da proteção pelo loop BT, podendo resultar em descoordenações indesejadas. Além disso, em sistemas que permitem o religamento automático monopolar do disjuntor, isso somente pode ser levado a cabo em condições de faltas monofásicas. Portanto, uma ótima seleção de fases é importante para que não se processe o religamento automático em condição de falta bifásica-terra.

Outra informação interessante é que a impedância medida nos loops BC, BT e CT têm valores muito próximos. É possível concluir que um curto-circuito bifásico-terra pode ser desmembrado em três faltas distintas, duas monofásicas e uma bifásica. Como o loop BC não é influenciado pela imponderabilidade inerente aos circuitos de sequência zero (resistividade do solo, resistência de pé de torre, acoplamentos mútuos e etc), sua medição tende a ser mais precisa e a maioria dos fabricantes opta por bloquear os loops de falta monofásicos e emitir o *trip* pelo loop bifásico quando uma falta bifásica-terra é identificada.

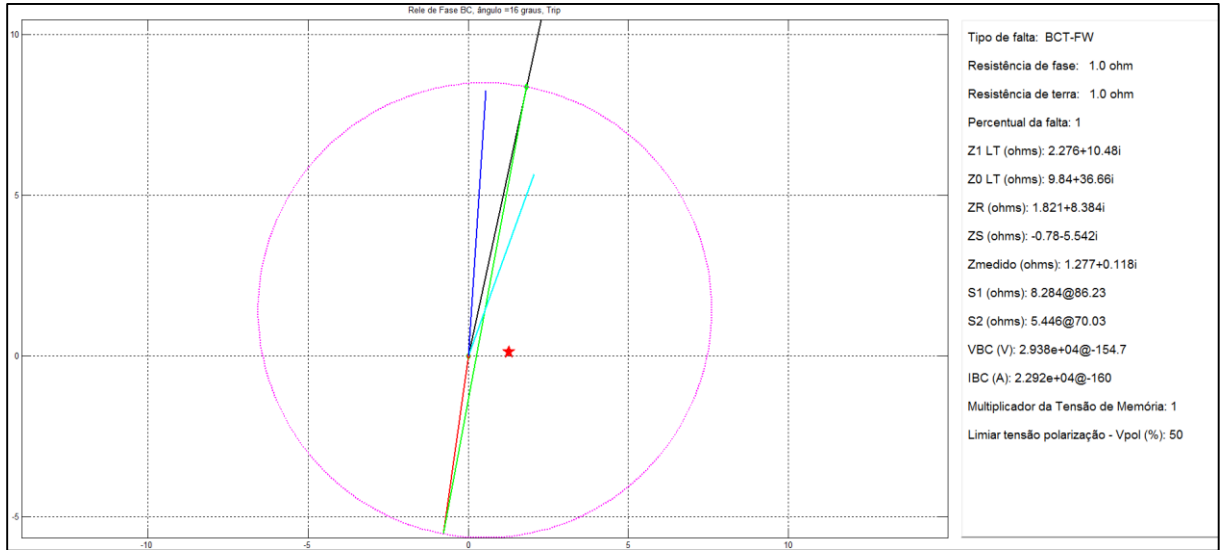


Figura 5.81: Loop BC do relé Mho polarizado por memória sob falta BCT a 1% da LT, com $R_\phi = 1 \Omega$ e $R_G = 1 \Omega$.

O comparador de fases tipo cosseno do loop BC do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta bifásica-terra é definido pela **Equação 4.78**:

$$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1+C}{C_1+C_2C} R_\phi \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1+C_2C} Z_{E1} + \frac{C_2C}{C_1+C_2C} Z_{E2} \right) + \left(nZ_1 + \frac{1+C}{C_1+C_2C} R_\phi \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$$

Substituindo os valores da **Tabela 5.1**, chega-se aos seguintes valores:

$$\begin{cases} S_1'' = (1,821 + j8,384) - (1,4281 + j0,1288) = (0,3929 + j8,2552) \Omega_{prim} \\ S_2'' = (0,754 + j5,548) + (1,4281 + j0,1288) = (2,1821 + j5,6768) \Omega_{prim} \end{cases}$$

Na forma polar:

$$\begin{cases} S_1'' = (8,265 \angle 87,28^\circ) \Omega_{prim} \\ S_2'' = (6,082 \angle 68,97^\circ) \Omega_{prim} \end{cases}$$

Apesar de uma pequena diferença entre o resultado calculado e o resultado simulado do sinal S_2'' , o ângulo calculado entre os sinais de polarização e de operação é de aproximadamente 18° , bem próximo do valor simulado, que é de 16° .

5.3.3.5 Relé Mho Polarizado por Tensão de Memória Sob Falta Trifásica Reversa

Tabela 5.17: Equações para o relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica reversa.

POLARIZAÇÃO SINGELA POR TENSÃO DE MEMÓRIA [CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA (ABCT) ATRÁS DO RELÉ]		
Loop de Falta	Entradas do Comparador Cosseno (Tensões e Correntes)	Entradas do Comparador Cosseno (Impedâncias)
AB	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{AB} Z_R - \dot{V}_E^{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{AB} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = [- (Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BC	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{BC} Z_R - \dot{V}_E^{BC} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{BC} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = [- (Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CA	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = \dot{I}_E^{CA} Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{CA} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = [- (Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
AT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase A} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase A} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase A} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = [- (Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
BT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase B} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase B} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase B} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = [- (Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
CT	$\begin{cases} S_1'' = \dot{I}_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = (\dot{I}_E^{Fase C} + k_0 \dot{I}_E^{Neutro}) Z_R - \dot{V}_E^{Fase C} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m \dot{U}_E^{Fase C} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1' = Z_R - \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2' = [- (Z_1 + Z_{D1})] + \left[- \left(n Z_{E1} + \frac{1}{C_1^R} R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

5.3.3.5.1 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT, Sem Resistência de Falta



Figura 5.82: Relé Mho polarizado por memória sob curto-circuito trifásico, a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

Na simulação apresentada na **Figura 5.82**, o limiar de tensão abaixo do qual um *loop* do relé Mho deixa de operar como autopolarizado para utilizar a tensão pré-falta memorizada no sinal de polarização é de 50 % da tensão nominal do *loop*.

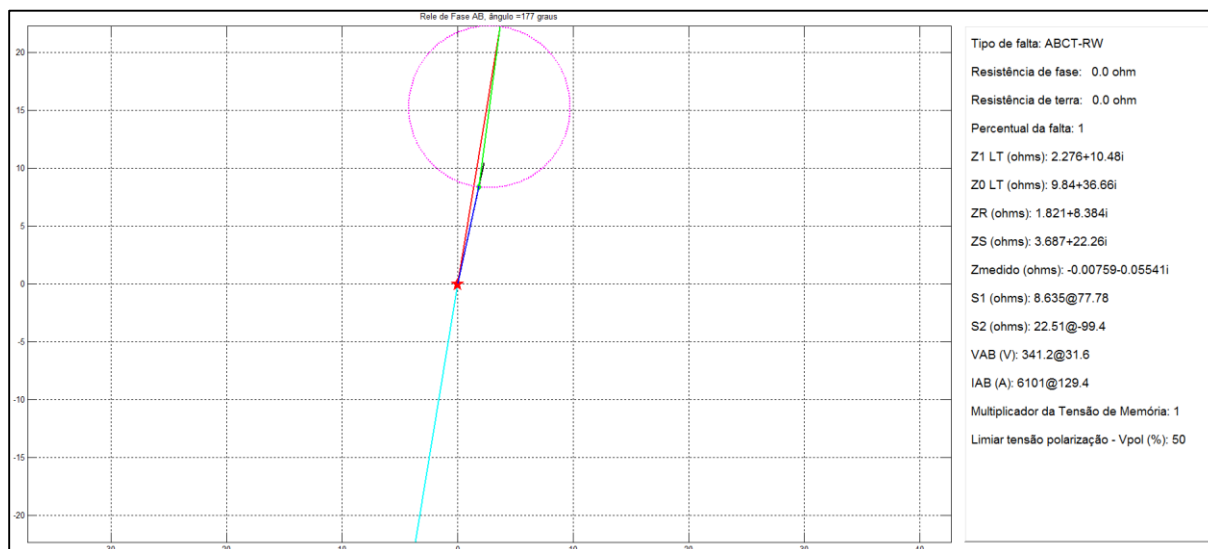


Figura 5.83: Loop AB do relé Mho polarizado por memória sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 0 \Omega$).

A polarização por tensão de memória resolveu o problema da falta trifásica sólida à frente dos transdutores de corrente do relé Mho e soluciona também a deficiência na polarização do relé Mho quando de faltas sólidas trifásicas atrás dos TCs (**Figura 5.83**).

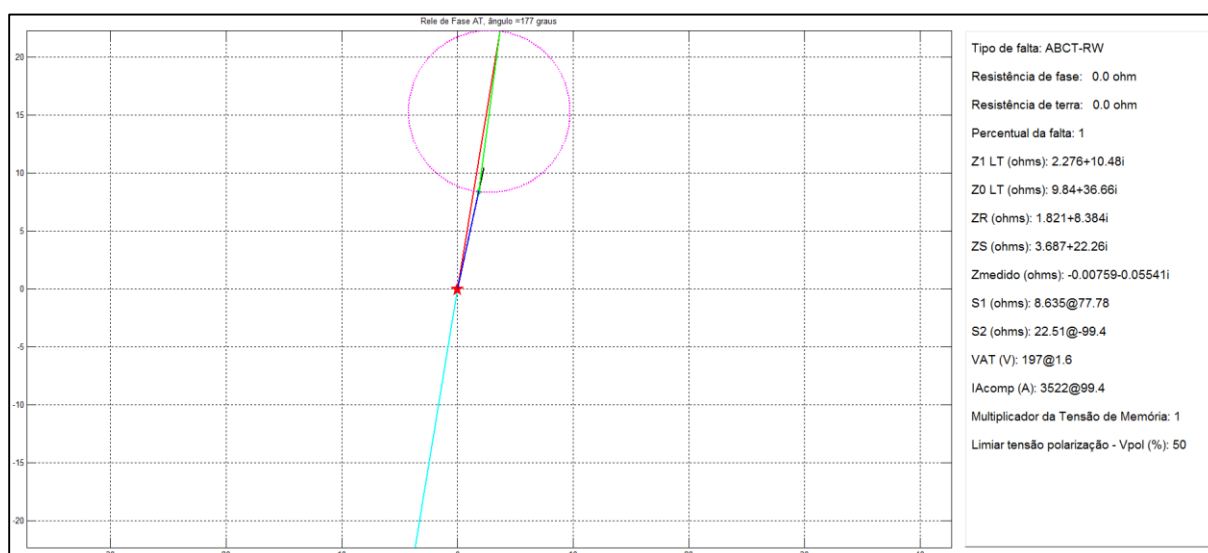


Figura 5.84: Loop AT do relé Mho polarizado por memória sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F=0\Omega$).

Como a corrente de falta agora entra na barra **E**, oriunda da barra **D** (**Figura 3.10**), a impedância Z_S sai do terceiro quadrante e vai para o primeiro quadrante, reduzindo o diâmetro da característica de operação do relé Mho e afastando-a da origem dos eixos (**Figura 5.84**).

5.3.3.5.2 Curto-circuito Trifásico, a 1% da LT Atrás do Relé e Com $R_F = 2 \Omega$

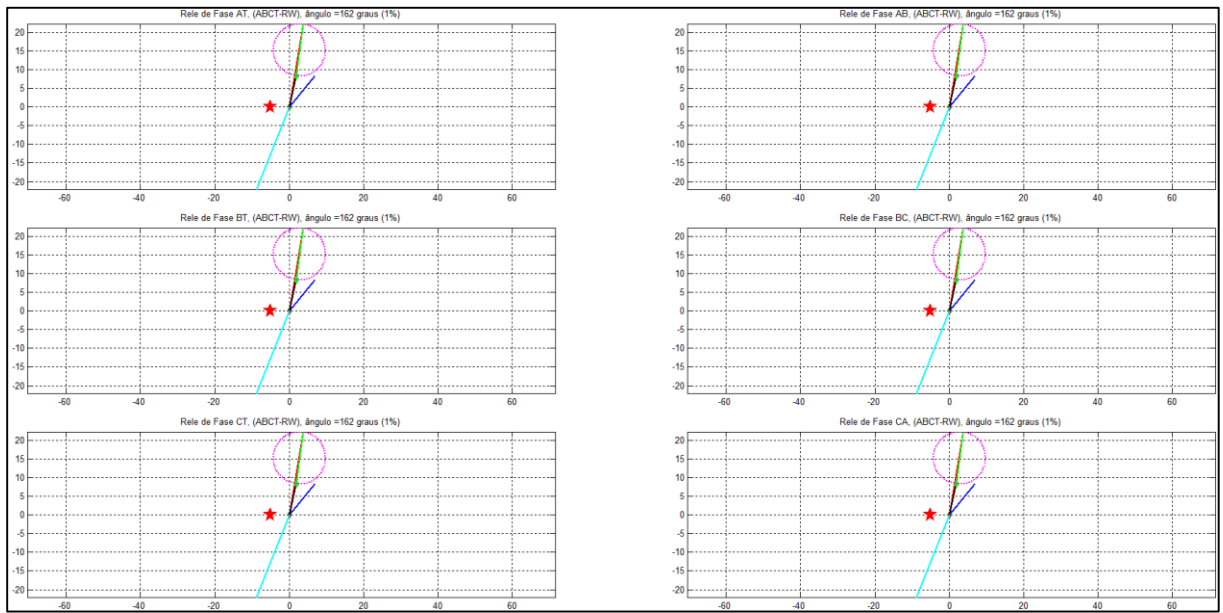


Figura 5.85: Relé Mho polarizado por memória sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 2 \Omega$ e $R_\phi = 1 \Omega$).

A inclusão da resistência de falta não altera o comportamento da característica de operação do relé Mho polarizado por tensão de memória sob falta trifásica reversa.

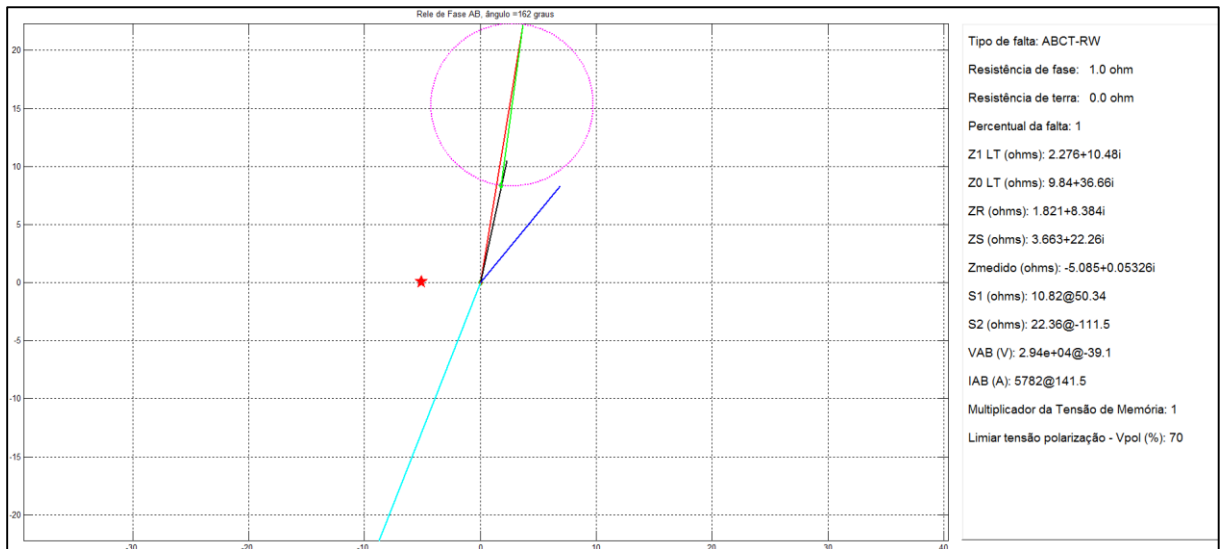


Figura 5.86: Loop AB do relé Mho polarizado por memória sob falta trifásica a 1% da LT reversa ($R_F = 2 \Omega$).

Da **Equação 4.80** obtém-se a expressão da impedância Z_S :

$$Z_S = -(Z_1 + Z_{D1}) = (-3,668 - j22,261)\Omega_{prim}$$

A impedância da fonte atrás do relé troca de sinal e faz com que a circunferência fuja da origem.

5.4 Comparação Entre as Polarizações Singelas Típicas

A seguir serão apresentadas figuras com o resultado da simulação de quatro relés tipo Mho, polarizados de formas diferentes e sob a mesma condição de falta. Em cada figura, no canto superior esquerdo fica um *loop* autopolarizado. No canto inferior esquerdo se encontra a característica de operação do relé Mho do mesmo *loop*, mas polarizada de forma singela por tensão de quadratura. No canto superior direito fica a característica de mesmo *loop*, polarizada de forma singela por tensão pré-falta memorizada. A novidade fica por conta da característica Mho localizada no canto inferior direito. Esta nova característica é apresentada apenas por curiosidade, já que ela apresenta um relé Mho polarizado de forma mista, com 33,33% da tensão de medida no próprio *loop* durante a falta, ou seja, autopolarização, mais 33,33% de tensão de quadratura também medida durante a falta e finalmente 33,33% de tensão pré-falta memorizada antes da falta. A soma dessas três parcelas compõem o sinal de referência S_2'' , polarizando o relé de forma mista. Esta forma mista de polarização que é aqui apresentada tenta mostrar de modo bastante simplificado como um relé digital comercial costuma ser polarizado, já que estes relés normalmente não operam polarizados de forma singela, mas utilizam equacionamentos com parcelas das polarizações singelas típicas aqui apresentadas ou incluem métodos novos, desenvolvidos pelos próprios fabricantes.

Obviamente cada fabricante implementa algoritmos com variações bastante otimizadas, de forma a garantir um comportamento seguro, onde o *loop* que venha a emitir o sinal de *trip* seja realmente o *loop* correspondente às fases em falta. Por isso a comparação será apresentada somente com os *loops* que devem operar em cada uma das faltas clássicas. Uma exceção ocorre na análise da falta bifásica-terra, já que há fabricantes que permitem o *trip* dos *loops* monofásicos, desde que isso seja escolhido durante a parametrização do relé.

Nessa análise comparativa, os *loops* autopolarizados, polarizados por tensão de memória e polarizados por tensão em quadratura utilizam 100 % de cada uma das suas respectivas tensões no sinal de polarização ou referência S_2'' . Assim pode-se comparar os quatro métodos em igualdade de condições.

Todas as faltas apresentadas estarão logo à frente ou logo atrás dos transdutores de corrente do relé Mho, sem nenhuma resistência de falta. Portanto, a impedância medida em todos os casos comparados é igual a zero e estará representada sobre a origem dos eixos. Isso permite concluir que para os *loops* autopolarizados a impedância medida estará sempre sobre o lugar geométrico de limiar de operação do relé Mho.

5.4.1 – Curto-circuito Trifásico (ABCT) à Frente do Relé Mho

A **Tabela 5.18** mostra que o sinal de referência S_2'' do relé Mho autopolarizado e do relé Mho polarizado em quadratura são idênticos. Como o sinal de operação S_1'' é sempre o mesmo, conclui-se que o comportamento de suas características também deve ser o mesmo.

Tabela 5.18: Polarizações singelas típicas sob curto-circuito trifásico à frente do relé Mho (Loop AB).

Polarização Singela Loop AB	Entradas do Comparador (Em termos de tensões e correntes)	Entradas do Comparador (Em termos de impedância)
Autopolarização (V_l)	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_{AB} Z_R - \dot{V}_{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{polarização} = l \dot{V}_{Loop} = l \dot{V}_{AB} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_0}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_0}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
Cruzada (V_q)	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_{AB} Z_R - \dot{V}_{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{polarização} = q \dot{V}_C (\sqrt{3} \angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_0}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = n Z_1 + \frac{R_0}{C_1} = Z_{Medida} \end{cases}$
Memória (V_m)	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop} Z_R - \dot{V}_{Loop} = I_{AB} Z_R - \dot{V}_{AB} \\ S_2'' = \dot{V}_{polarização} = m \dot{U}_{Loop} = m \dot{U}_{AB} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(n Z_1 + \frac{R_0}{C_1} \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = Z_{E1} + \left(n Z_1 + \frac{R_0}{C_1} \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

Na mesma **Tabela 5.18** é possível identificar que a única diferença entre o sinal S_2'' do relé Mho polarizado por tensão pré-falta memorizada com os outros dois é o aparecimento da parcela Z_S , que para um curto-circuito trifásico à frente é a impedância de sequência positiva da fonte atrás dos transdutores do relé Mho.

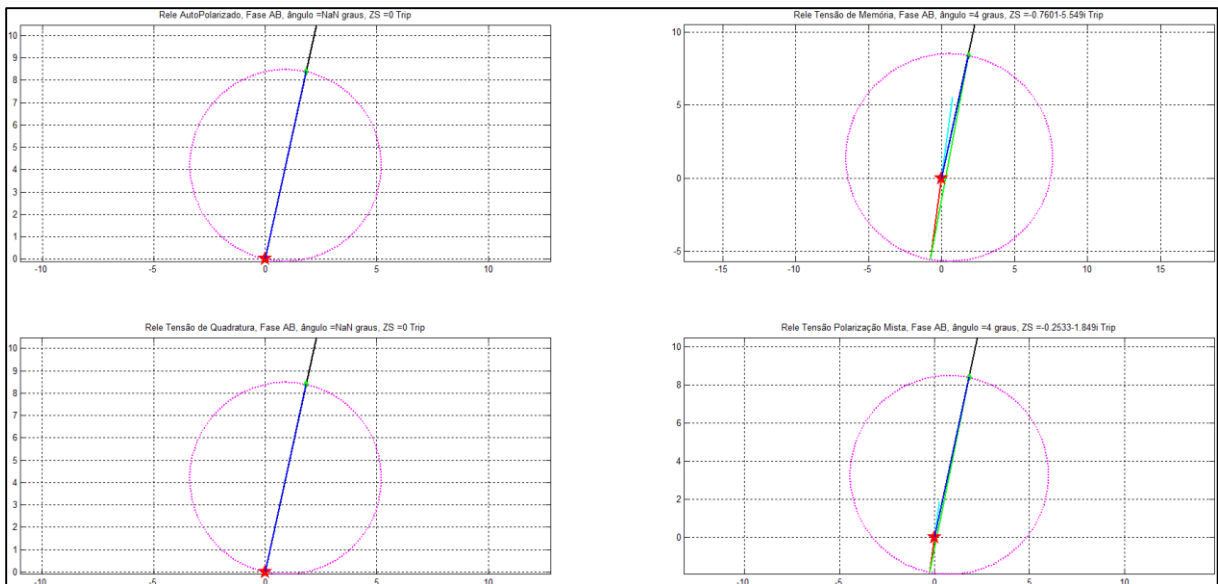


Figura 5.87: Loop AB do Relé Mho polarizado sob falta trifásica (ABCT) à frente dos TCs.

Pode-se confirmar na **Figura 5.87** as informações feitas anteriormente. A impedância Z_S no relé Mho polarizado de forma mista é um terço de Z_{E1} .

5.4.2 – Curto-circuito Bifásico (BC) à Frente do Relé Mho

A **Tabela 5.19** mostra que o sinal S_2'' do relé Mho autopolarizado será igual a zero, pois a falta ocorre logo à frente dos TCs e não há resistência de falta envolvida.

Tabela 5.19: Polarizações singelas típicas sob curto-circuito bifásico (BC) à frente do relé Mho (Loop BC).

Polarização Singela (Loop BC)	Entradas do Comparador Cosseno em Termos de Impedância Curto-circuito Bifásico (BC)
Autopolarização (V_i)	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
Cruzada (V_q)	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \frac{2C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
Memória (V_m)	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2} Z_{E2} \right) + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

A expressão da impedância Z_S no relé Mho polarizado por tensão de quadratura é diferente da que aparece no relé Mho polarizado por tensão de memória (**Tabela 5.19**), mas como o sistema utilizado na simulação tem C_1 é igual a C_2 e Z_{E1} é igual a Z_{E2} , a impedância Z_S acaba tendo o mesmo valor nas duas situações (**Figura 5.88**).

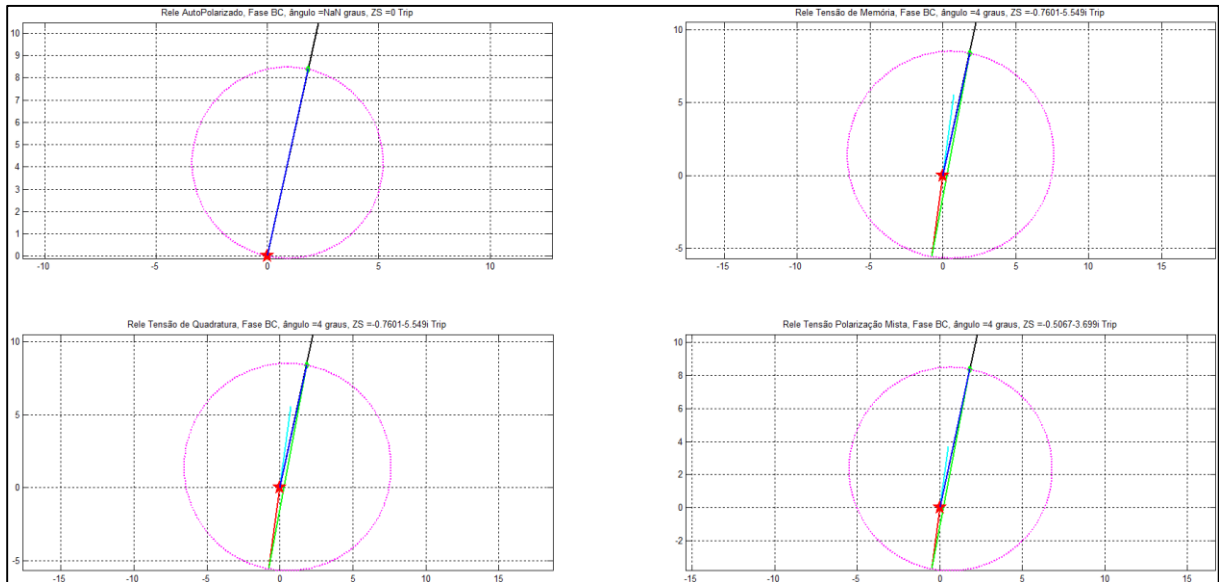


Figura 5.88: Loop BC do Relé Mho polarizado sob falta bifásica (BC) à frente dos TCs.

Observe na **Figura 5.88** que a impedância Z_S no relé Mho polarizado de forma mista tem dois terços do valor apresentado no relé Mho polarizado em quadratura e do relé Mho polarizado por tensão de memória.

5.4.3 – Curto-circuito Monofásico (AT) à Frente do Relé Mho

É possível concluir que o sinal de referência S_2'' do relé Mho autopolarizado sob falta monofásica logo à frente dos TCs é igual a zero, pois o percentual da LT sob falta (n) é igual a zero e não há resistência de falta.

Tabela 5.20: Polarizações singelas típicas sob curto-circuito monofásico à frente do relé Mho (Loop AT).

Polarização Singela (Loop AT)	Entradas do Comparador Cosseno em Termos de Impedância Curto-circuito Monofásico (AT)
Autopolarização (V_f)	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \end{cases}$
Cruzada (V_q)	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{2C_2}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \right] \end{cases}$
Memória (V_m)	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \right] \\ S_2'' = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E2} + \frac{C_0}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} Z_{E0} \right] + \left[nZ_1 + \frac{3}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0} R_F \right] \end{cases}$

Mais uma vez a expressão da impedância Z_s no relé Mho polarizado por tensão de quadratura é diferente da que aparece no relé Mho polarizado por tensão de memória (**Tabela 5.20**), mas como o sistema utilizado na simulação tem C_1 igual a C_2 e Z_{E1} igual a Z_{E2} , a impedância Z_s acaba tendo o mesmo valor nas duas situações (**Figura 5.89**).

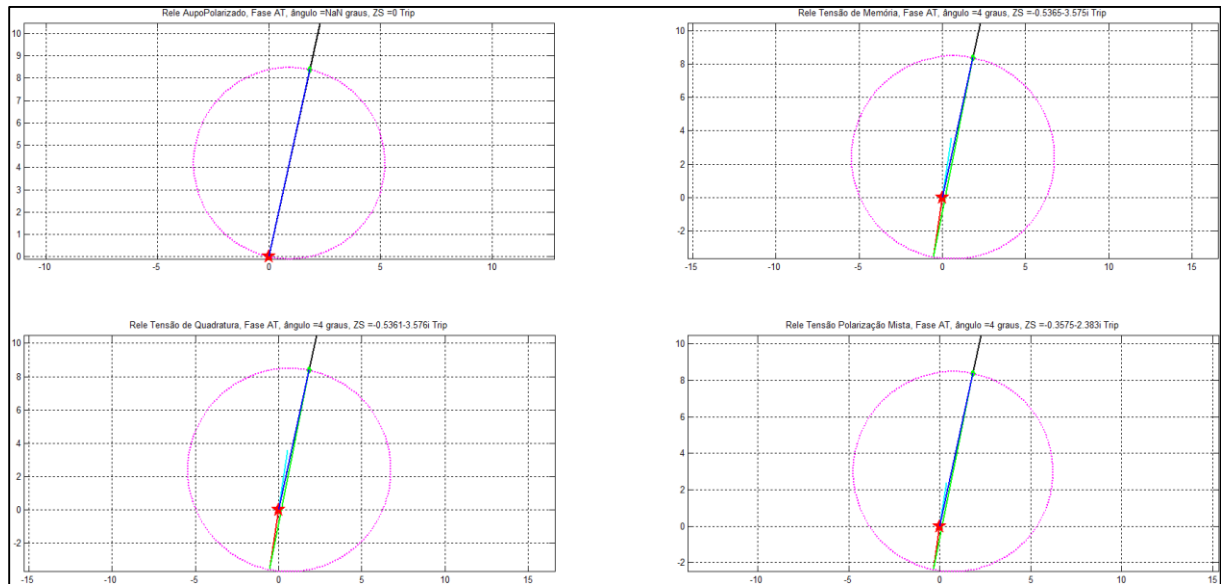


Figura 5.89: Loop AT do Relé Mho polarizado sob falta monofásica (AT) à frente dos TCs.

De novo a impedância Z_s no relé Mho polarizado de forma mista tem 2/3 do valor apresentado no relé Mho polarizado em quadratura ou por tensão de memória (**Figura 5.89**).

5.4.4 – Curto-circuito Bifásico-terra (BCT) à Frente do Relé Mho

O sinal de referência S_2'' do relé Mho autopolarizado sob falta bifásica-terra logo à frente dos TCs é igual a zero, pois o percentual da LT sob falta (n) é igual a zero e não há resistência de falta, logo não há expansão da característica de operação.

Tabela 5.21: Polarizações singelas típicas sob falta bifásica-terra (BCT) à frente do relé Mho (Loop BC).

Loop BC	Entradas do Comparador Cosseno em Termos de Impedância Curto-circuito Bifásico-terra (BCT)
V_l	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2 C} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2 C} R_F = Z_{Medida} \end{cases}$
V_q	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2 C} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \left[\frac{2C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} + \frac{C_0(1-C)}{C_1 + C_2 C} Z_{E0} \right] + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2 C} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$
V_m	$\begin{cases} S_1^* = Z_R - \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2 C} R_F \right) = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2^* = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2 C} Z_{E1} + \frac{C_2 C}{C_1 + C_2 C} Z_{E2} \right) + \left(nZ_1 + \frac{1}{C_1 + C_2 C} R_F \right) = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

Os relés Mho polarizados por tensão de quadratura e por tensão de memória trazem valores de Z_S diferentes para o curto-circuito bifásico-terra à frente dos TCs. Corroborando o resultado obtido na **Figura 5.79**, Z_S é igual a Z_{E1} quando o relé Mho é polarizado por tensão de memória, independentemente da resistência de falta envolvida, pois sua expressão só envolve termos relativos aos circuitos de sequência positiva e negativa. Z_S é maior em módulo no relé Mho polarizado em quadratura e conseqüentemente a expansão da característica neste caso é um pouco maior que a expansão verificada no relé Mho polarizado por tensão de memória.

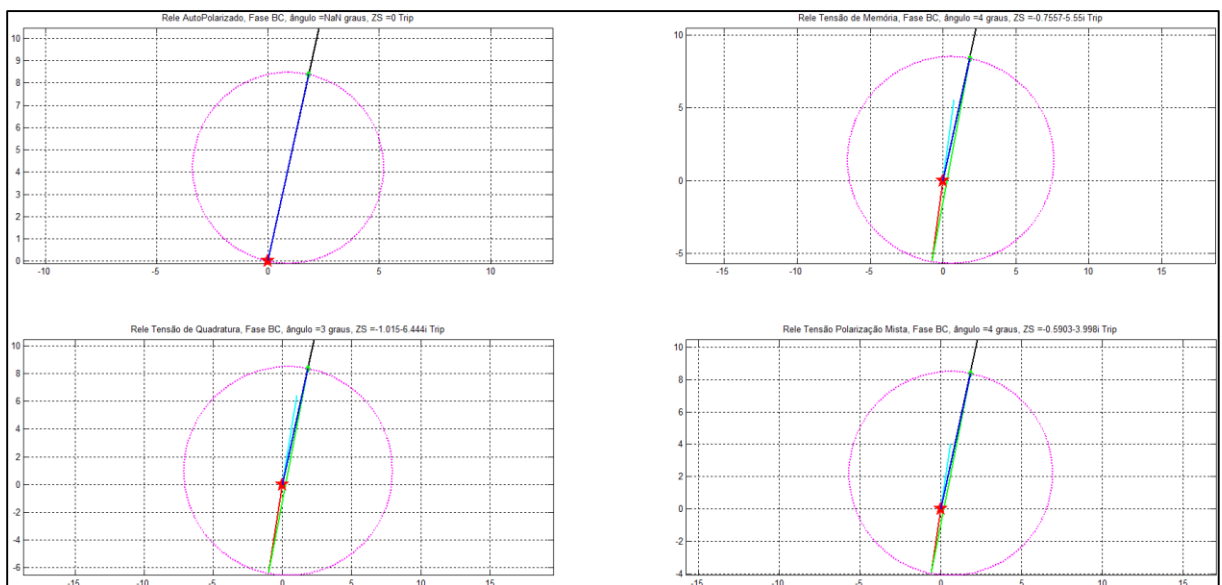


Figura 5.90: Loop BC do Relé Mho polarizado sob falta bifásica-terra (BCT) à frente dos TCs.

A **Figura 5.91** traz a comparação do comportamento dos *loops* BT sob falta bifásica-terra (BCT) logo à frente dos TCs. À exceção do relé Mho autopolarizado, que não apresenta expansão da característica e tem a impedância medida sobre o limiar de operação na origem dos eixos, nos demais relés a impedância Z_s encontra-se no quarto quadrante, o que dá ao *loop* um alcance resistivo maior do que é observado no *loop* CT (**Figura 5.92**).

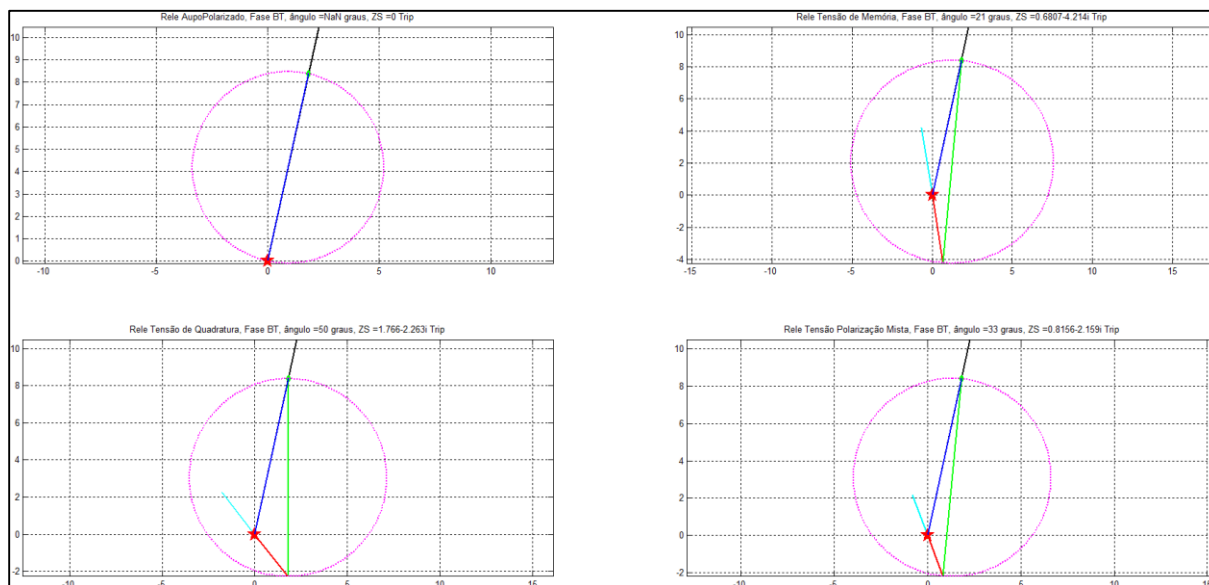


Figura 5.91: Loop BT do Relé Mho polarizado sob falta bifásica-terra (BCT) à frente dos TCs.

Como já foi citado anteriormente, a possibilidade de sobrealcance por parte do *loop* BT durante faltas bifásicas-terra faz com que a maioria dos fabricantes bloqueiem a operação de *loops* de falta monofásicos quando o relé consegue definir que a falta é bifásica-terra.

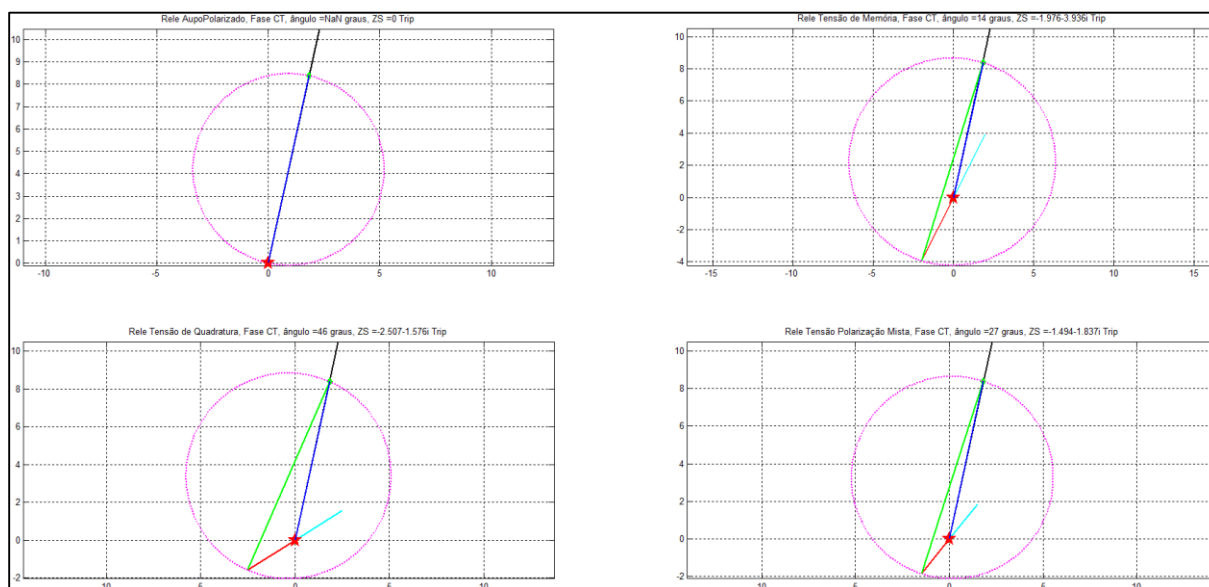


Figura 5.92: Loop CT do Relé Mho polarizado sob falta bifásica-terra (BCT) à frente dos TCs.

5.4.5 – Curto-circuito Trifásico (ABCT) Atrás do Relé Mho

O curto-circuito analisado agora é trifásico e incide na barra **E**, logo atrás dos TCs do relé Mho. Neste caso, nZ_{E1} é igual a zero pois n é igual a zero (**Tabela 5.22**) e como não há resistência de falta envolvida, pode-se garantir que a impedância medida é nula e deve ser representada na origem dos eixos. Isso permite concluir que o sinal de referência S_2'' é nulo para o relé Mho autopolarizado e para o relé Mho polarizado por tensão em quadratura.

Tabela 5.22: Polarizações singelas típicas sob falta trifásica (ABCT) atrás do relé Mho (Loop CA).

Polarização Singela Loop CA	Entradas do Comparador (Em termos de tensões e correntes)	Entradas do Comparador (Em termos de impedância)
Autopolarização (V_D)	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop}Z_R - \dot{V}_{Loop} = j_E^{CA}Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = l\dot{V}_{Loop} = l\dot{V}_E^{CA} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[-\left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R}R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = -\left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R}R_\phi \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
Cruzada (V_q)	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop}Z_R - \dot{V}_{Loop} = j_E^{CA}Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = q\dot{V}_E^{Fase\ B}(\sqrt{3}\angle -90^\circ) \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[-\left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R}R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = -\left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R}R_\phi \right) = Z_{Medida} \end{cases}$
Memória (V_m)	$\begin{cases} S_1'' = I_{Loop}Z_R - \dot{V}_{Loop} = j_E^{CA}Z_R - \dot{V}_E^{CA} \\ S_2'' = \dot{V}_{Polarização} = m\dot{U}_D^{CA} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1'' = Z_R - \left[-\left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R}R_\phi \right) \right] = Z_R - Z_{Medida} \\ S_2'' = [-(Z_1 + Z_{D1})] + \left[-\left(nZ_{E1} + \frac{1}{C_1^R}R_\phi \right) \right] = Z_S + Z_{Medida} \end{cases}$

No relé Mho polarizado por tensão de memória a impedância Z_S é composta pela soma das impedâncias de sequência positiva da LT e da fonte à direita da barra **D**. Como a corrente de falta nessa condição passa pelos TCs, entrando na barra **E**, Z_S passa a ter sinal negativo e é representada no primeiro quadrante, fazendo com que a característica Mho “fuja” da origem

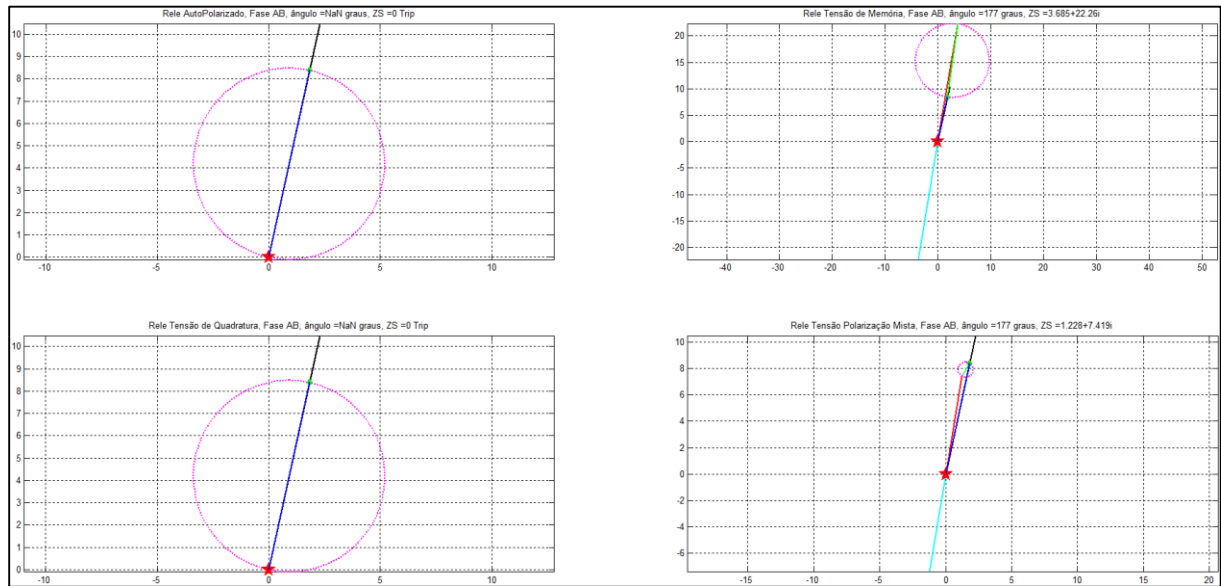


Figura 5.93: Loop CT do Relé Mho polarizado sob falta bifásica-terra (BCT) à frente dos TCs.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho é finalizado com algumas considerações finais, citando as principais conclusões e observações acerca de tudo o que foi tratado ao longo do texto. A seguir serão apresentadas algumas sugestões para a continuidade do estudo aqui abordado.

6.1 Considerações Finais

Dentre tudo o que foi comentado, visualizado e concluído até agora, os seguintes comentários se fazem importantes e necessários:

- ✓ Sistemas de potência que operam conectados em anel precisam de relés de proteção com característica direcional, de forma que se desligue a menor porção possível do circuito em casos de eventos de faltas.
- ✓ As características circulares dos relés de distância tipo Mho podem ser construídas através de comparadores de fase ou de amplitude. Todo o estudo aqui apresentado utilizou uma implementação digital do comparador de fases tipo cosseno para modelar o relé Mho polarizado.
- ✓ Apesar de internamente os relés de proteção trabalharem com a comparação de sinais de tensão, a análise do comportamento dos relés de distância é normalmente feita em um plano de impedâncias. Isso facilita bastante a visualização das características de operação e da impedância medida.
- ✓ A autopolarização é um método de polarização que utiliza, no sinal de referência do comparador de fases tipo cosseno de cada um dos *loops* de falta, uma tensão referente à mesma fase da corrente que alimenta esse *loop*. Isso faz com que o relé tenha uma melhor precisão para a definição da direção da falta, desde que a tensão medida pelo *loop* não caia abaixo de um valor limitado pelo relé de proteção como seguro para uma boa decisão direcional.

- ✓ A polarização por tensão de quadratura (polarização cruzada) é uma implementação que dá ao relé Mho a possibilidade de atuação segura mesmo com faltas metálicas próximas, desde que essa falta não seja trifásica.
- ✓ A polarização por tensão de memória é a única forma de se garantir ao relé condições de operação em qualquer tipo de falta, seja simétrica ou assimétrica. Ela está sempre presente em situações práticas, pois ainda é a única forma de se prover ao relé subsídios para a tomada da decisão ou não pelo *trip* durante faltas trifásicas sólidas próximas, quando as tensões de todas as fases tendem a zero. A tensão pré-falta é armazenada em um *buffer* e normalmente é utilizada quando a tensão medida cai abaixo de um limiar definido pelo fabricante. Esta tensão memorizada costuma ter duração de algumas centenas de milissegundos, ampliando a característica circular Mho durante faltas à frente e reduzindo essa característica em condições de faltas reversas, de modo que ela “fuja” da origem dos eixos do plano Z. Quando essa tensão memorizada é acionada e a tensão medida permanece abaixo do limiar que aciona a tensão de memória por mais tempo que a máxima quantidade armazenada no *buffer*, a característica Mho colapsa para a condição inicial ao se expirar a tensão gravada na memória, e o círculo volta a passar pela origem dos eixos. Conforme decisão do fabricante, nesse momento o relé pode decidir pela liberação ou bloqueio do sinal do *trip*.
- ✓ A expansão da característica Mho, seja em função da polarização por tensão em quadratura durante faltas assimétricas ou mesmo em função da polarização por tensão de memória, resolvem o sério problema de operação sob faltas sólidas próximas, intrínsecos à autopolarização, mas pode criar problemas de atuação de *loops* que não estão envolvidos na falta. Por isso, um algoritmo de detecção de fase em falta operando de forma paralela pode dar a estabilidade necessária ao relé para que o *trip* seja emitido somente pelo *loop* correspondente à falta ocorrida.
- ✓ Em situações reais, obviamente os relés de distância não são polarizados de forma singela, mas sim com uma combinação de modos de polarização para garantir ao relé condições de operar corretamente nas mais severas situações. Cada fabricante define seu algoritmo de polarização, combinando as formas singelas aqui apresentadas com pesos para cada parcela, ou ainda alguma nova implementação, além de variações dos modos típicos de polarização.

- ✓ O módulo e o ângulo da impedância equivalente do sistema atrás dos transdutores do relé de distância influem diretamente na ampliação da característica Mho. Em todos os equacionamentos onde aparece Z_s , essa impedância é composta de termos com uma ou mais impedâncias de sequência do equivalente do sistema atrás do relé. Isso permite concluir que uma fonte fraca produz uma ampliação maior da característica que uma fonte forte, já que a impedância equivalente da primeira é maior que a da segunda.
- ✓ Um curto-circuito bifásico-terra sensibiliza dois *loops* monofásicos e um bifásico ao mesmo tempo. Os resultados das simulações de faltas desse tipo ilustram com muita clareza um comportamento do relé de distância que a literatura técnica costuma citar sem muito aprofundamento. Foi comprovado o aumento do alcance resistivo de um dos *loops* monofásicos durante uma falta bifásica-terra, o que pode proporcionar sobrealcance da proteção.
- ✓ Vale a pena ressaltar que este estudo partiu da premissa de que o circuito analisado se encontrava sem fluxo de corrente na condição pré-falta. Isso foi necessário para simplificar o trabalho matemático para se chegar às equações dos comparadores.

6.2 Sugestões de Continuidade

O trabalho que acaba de ser apresentado, apesar de extenso, abordou apenas uma pequena porção do tema referente à polarização dos relés de distância. Muito campo de estudo ainda há sobre o assunto. Vários fatores influem diretamente no comportamento da característica de operação do relé Mho polarizado, por exemplo:

- ✓ Influência do carregamento pré-falta.
- ✓ Efeito do acoplamento magnético entre linhas de transmissão.
- ✓ Condições dinâmicas de carga.
- ✓ Efeito da componente DC.
- ✓ Influência das impedâncias das fontes envolvidas.
- ✓ Efeito da variação da frequência.

Além disso, outros temas relacionados são extremamente interessantes:

- ✓ Análise comparativa de desempenho de relés de distância Mho e poligonais.
- ✓ Estudo de métodos de polarização próprios de alguns fabricantes.
- ✓ Criação de novos métodos de polarização.

Há um vasto campo de estudo relacionado ao tema dos relés de distância aberto a estudantes e profissionais de proteção de sistemas elétricos. Não é fácil conseguir uma literatura técnica onde se possa encontrar abordagens aprofundadas dos temas propostos. Isso já é um grande fator motivador para um trabalho em qualquer um dos itens sugeridos.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] COOK, V. **Analysis of Distance Protection**. New York: Research Studies Press Ltd., 1985.
- [2] ORDACGI FILHO, J. M.; SOLLERO, R. B. **Determinação Acurada da Característica de Operação de Relés Tipo Mho**. In: V STPC, 1995, Curitiba. V Seminário Técnico de Proteção e Controle, 1995.
- [3] ZIEGLER, G. **Numerical Distance Protection**. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2006.
- [4] WEDEPOHL, L. M. **Polarised Mho Distance Relay**. *Proc. IEE*, v. 112, n. 3, Mar. 1965.
- [5] MASON, C. R. **The Art & Science of Protective Relaying**, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1956.
- [6] MORAES, R.M. **Relés de Distância - Seleção dos Sinais de Medição e Análise do Desempenho de Unidades de Partida**. 1986. Dissertação (Mestrado em Proteção de Sistemas Elétricos) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.
- [7] ANDRICHACK, J. G.; ALEXANDER, G. E. **Distance Relays Fundamentals**. General Electric Co. Disponível em: <http://store.gedigitalenergy.com/faq/documents/alps/ger-3966.pdf>
- [8] WILKINSON, S. B.; MATHEWS, C. A. **Dynamic Characteristics of Mho Distance Relays**. Disponível em: <http://store.gedigitalenergy.com/FAQ/Documents/Alps/GER-3742.pdf>
- [9] ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; SCHWEITZER III, E. O. **$Z = V/I$ Não Faz Um Relé de Distância**. In: *Western Protective Relay Conference*, 1993, Spokane. Disponível em: http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/ZigualVsobreI.pdf

- [10] SCHWEITZER III, E. O. **New Developments in Distance Relay Polarization and Fault Type Selection**. In: 16th ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 1989, Spokane.
- [11] ZOCHOLL, S. E. **Análise de Circuitos Trifásicos e o Misterioso Fator K0**. In: 22ND ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 1995, Spokane.
Disponível em: http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6018.pdf
- [12] GEC MEASUREMENTS. **Protective Relays - Application Guide**. Stafford: The General Electric Company, 1987.
- [13] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, RELAY-INSTRUMENT DIVISION. **Applied Protective Relaying**. Newark: Westinghouse Electric Corporation, 1976.
- [14] BLACKBURN, J. L. **Symmetrical Components for Power Systems Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [15] ANDERSON, P. M. **Analysis of Faulted Power Systems**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [16] DE MESMAECKER, I.; REINHARD, S. **The Choice of Reference Voltages for the Measuring Systems of Distance Relays**. *Brown Boveri Review* 2, vol. 68, n.2, p.94-101, 1981.
- [17] DA SILVA, H. A. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência II (Notas de Aula - UFJF)**. Juiz de Fora: [s.n.], 1998.
- [18] DA SILVEIRA, P. M. **Proteção de Linhas de Transmissão (Notas de Aula - UNIFEI)**. Itajubá: [s.n.], 2012.
- [19] ORDACGI FILHO, J. M. **Curso de Filosofias de Proteção de Linhas de Transmissão (Apostila)**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.
- [20] PEREIRA FILHO, C. S. **Análise de Redes (Notas de Aula - UFMG)**. Belo Horizonte: [s.n.], 2003.

- [21] PEREIRA FILHO, C. S. **Proteção de SEP - Proteção de Distância (Notas de Aula – UFMG)**. Belo Horizonte: [s.n.], 2003.
- [22] GOFF, C.; ELTOM, A. **Should the Dynamic Characteristics of a Mho Distance Relay be Considered When Testing a Mho Distance Function?**. In: Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG) - Fourth International Conference, 2013, Istambul.
- [23] BRAZ, A. S. **Análise Matemática da Influência dos Métodos Típicos de Polarização na Característica de Operação de Relés de Distância Tipo Mho**. 2012. Monografia (Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.