

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MARCELO ENGERS DA CRUZ**

**TÉCNICA DE AJUSTE ADAPATIVO PARA RELÉS DE DISTÂNCIA SOB CONDIÇÃO  
DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

**ALEGRETE  
2014**

**MARCELO ENGERS DA CRUZ**

**TÉCNICA DE AJUSTE ADAPATIVO PARA RELÉS DE DISTÂNCIA SOB CONDIÇÃO  
DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do curso de Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Me. Eduardo M. dos Santos.

**ALEGRETE  
2014**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C957p Cruz, Marcelo Engers da

PROTEÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA /  
Marcelo Engers da Cruz.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2014.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. TÉCNICA DE AJUSTE ADAPTATIVO PARA RELÉS DE  
DISTÂNCIA SOB CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO DOS  
TRANSFORMADORES DE CORRENTE. I. Título.

**MARCELO ENGERS DA CRUZ**

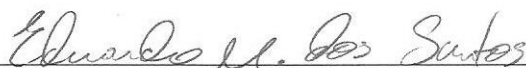
**TÉCNICA DE AJUSTE ADAPATIVO PARA RELÉS DE DISTÂNCIA SOB  
CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do curso de Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Me. Eduardo M. dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 18 de agosto de 2014.

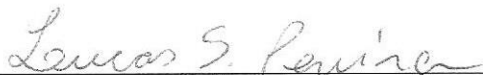
Banca examinadora:



---

Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos

Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Bel. Lucas Santos Pereira

UNIPAMPA



---

Prof. Bel. Marcelo Hahn Durgante

UNIPAMPA

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Marçal e Maria Terezinha, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de amor, carinho, dedicação e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, meu pai Marçal Alves da Cruz, minha mãe Maria Terezinha Engers da Cruz, meus irmãos Magnus e Maurício e minha querida noiva Kariny, pelo amor, carinho, por sempre acreditarem em mim e pelo constante incentivo ao longo de minha vida.

Em especial ao Prof. Mestre Eduardo Machado dos Santos, pelo apoio, confiança, amizade e por sua sábia e segura orientação no desenvolvimento deste trabalho.

A todo corpo docente da UNIPAMPA pelos conhecimentos transmitidos durante o período de graduação.

Agradeço a todos que de alguma maneira me incentivaram e apoiaram.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

José de Alencar

## RESUMO

A proteção de linhas de transmissão (LTs) é feita através de relés. Dentre esses dispositivos, o relé de distância é caracterizado pela medição da impedância até o ponto da falta. Essa medição é feita a partir dos sinais de tensão e corrente da rede, que são obtidos a partir de transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs), respectivamente. Tais transformadores têm por função replicar os referidos sinais da forma mais fiel possível, possibilitando o funcionamento adequado dos relés de proteção conectados em seus terminais secundários. Entretanto, transformadores de corrente estão sujeitos à saturação do núcleo, o que provoca distorções na forma de onda dos sinais de corrente recebidos pelos relés de proteção, podendo prejudicar seus funcionamentos. Esse trabalho propõe uma técnica de ajuste adaptativo para relés de distância, de modo a evitar problemas de atuação decorrentes da saturação dos transformadores de corrente, quando da ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão. Foram analisadas situações considerando diferentes níveis de fluxo remanescente no núcleo do TC, além de diferentes tipos de curto-circuito. Para tal, foi usado um sistema teste, simulando uma linha de transmissão em EMTP-ATP, a partir do qual foram obtidos os sinais de tensão e corrente a serem utilizados no estudo. A lógica do relé e a metodologia proposta foram implementadas em MATLAB<sup>®</sup>. Um estudo preliminar com relação ao desempenho do relé frente à saturação do TC foi realizado, de modo a determinar os problemas de sub ou sobrealcançe apresentados pelo relé. Tal estudo serviu como parâmetro de comparação para determinar o desempenho da técnica proposta, a qual tem como finalidade ajustar automaticamente o ângulo de máximo torque do relé de distância, a partir do momento em que a saturação do TC é detectada, eliminando assim qualquer problema de atraso de operação, subalcançe ou sobrealcançe decorrentes desse fenômeno. Por fim, os resultados obtidos demonstram que a técnica é eficaz e robusta, promovendo grande melhoria no desempenho dos relés de distância frente a condição de saturação dos TCs.

Palavras-chave: Curto-circuito, Proteção, Relé de distância, Saturação, Transformador de Corrente.



## ABSTRACT

The protection of transmission lines (TLs) is done by relays. Among these devices, the distance relay is characterized by the measuring of the impedance up to the fault point. This measurement is taken from the voltage and current signals from the network, which are obtained from the potential (PT) and current (CT) transformers, respectively. These transformers are designed to replicate these signals as closely as possible, enabling proper operation of the protective relays connected in their secondary terminals. However, current transformers are subject to the core saturation, which causes distortions in the waveform of the current signals received by the protection relays, which may affect its operations. This paper proposes a technique of adaptive adjustment for distance relays to avoid performance problems resulting from the saturation of the current transformers upon the occurrence of a fault in a transmission line. Situations considering different levels of remaining flux in CT core and different types of fault were analyzed. For this, a test system was used to simulate a transmission line in EMTP-ATP<sup>®</sup>, from which the voltage and current signals were obtained to be used in the study. The logic of the relay and the proposed methodology were implemented in MATLAB<sup>®</sup>. A preliminary study regarding the performance of the relay submitted to the CT saturation was conducted to determine the problems of under or overreach presented by this dispositive. This study served as a comparison parameter for determining the performance of the proposed technique, which aims to automatically adjust the distance relay maximum torque angle in the moment when the CT saturation is detected, thus eliminating any delay in the operation, underreach or overreaching problems caused by this phenomenon. Finally, the results obtained show that the technique is effective and robust, providing large improvement in the performance of distance relays operating under CT saturation condition.

Keywords: Current Transformer, Distance Relay, Protection, Saturation, Short-Circuit.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito simplificado de um TC.....	20
Figura 2 – Curvas de excitação de um TC da classe C com diferentes relações de transformação. ....	21
Figura 3 – Formas de onda de corrente (I) Saturada e Não Saturada.....	22
Figura 4 – Zonas de proteção e tempo de atuação do relé 21.....	24
Figura 5 – Diagrama R-X e impedância aparente da LT.....	26
Figura 6 – Caso de Subalcance de zona. ....	26
Figura 7 – Caso de sobrealcance de zona. ....	27
Figura 8 – Características dos tipos de relés mais comuns. (a) Relé de impedância. (b) Relé de admitância ou MHO. (c) Relé de reatância. (d) Relé quadrilateral. ....	28
Figura 9 – Relé de impedância. (a) Relé de impedância sem unidade direcional. (b) Relé de impedância com unidade direcional. ....	29
Figura 10 – Zonas de atuação do relé de impedância. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.....	30
Figura 11 – Relés de impedância para o esquema da Figura 4. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.....	30
Figura 12 – Relé de Admitância ou MHO.....	31
Figura 13 – Ajuste do relé MHO. ....	32
Figura 14 – Zonas de proteção de um relé MHO. ....	33
Figura 15 – Relé de reatância. ....	34
Figura 16 – Relé de reatância associado ao relé de admitância.....	34
Figura 17 – Região de operação do relé quadrilateral. ....	35
Figura 18 – Característica autopolarizada. ....	36
Figura 19 – Polarização cruzada.....	36
Figura 20 – Polarização por memória de tensão de sequência positiva. ....	37

Figura 21 – Sistema teste simulado em EMTP-ATP.....	39
Figura 22 – Atraso de operação, para uma falta monofásica em 25% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	42
Figura 23 – Subalcance, para uma falta monofásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 50% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	42
Figura 24 – Efeito benéfico da saturação, para uma falta monofásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho))......	43
Figura 25 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	45
Figura 26 – Sobrealcance, para uma falta bifásica em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 50% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	45
Figura 27 – Efeito benéfico da saturação fazendo com que o relé não atue na região limiar de operação, para uma falta bifásica em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho))......	46
Figura 28 – Sobrealcance, para uma falta bifásica-terra em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	46
Figura 29 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 5% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	51
Figura 30 – Sobrealcance, para uma falta bifásica em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)). .....	51

Figura 31 – Atraso de operação, para uma falta trifásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).	54
Figura 32 – Subalcance, para uma falta monofásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).	56
Figura 33 – Atraso de operação, para uma falta monofásica em 25% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).	56
Figura 34 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 5% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).	58
Figura 35 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).	58
Figura 36 – Momento exato em que acontece a saturação, (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).	62
Figura 37 – Subalcance, (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).	67
Figura 38 – Relé ajustado com o novo ângulo (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho)).	68
Figura 39 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).	68
Figura 40 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).	70

Figura 41 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)). ..... 71

Figura 42 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)). ..... 73

Figura 43 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)). ..... 73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos com ângulo ajustado em 30° .....	41
Tabela 2 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos com ângulo ajustado em 30° ..	44
Tabela 3 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra com ângulo ajustado em 30° .....	47
Tabela 4 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos com ângulo ajustado em 30° ..	48
Tabela 5 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos com ângulo ajustado em 45° .....	49
Tabela 6 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos com ângulo ajustado em 45° ..	50
Tabela 7 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra com ângulo ajustado em 45° .....	52
Tabela 8 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos com ângulo ajustado em 45° ..	53
Tabela 9 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos com ângulo ajustado em 60° .....	55
Tabela 10 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos com ângulo ajustado em 60° ..	57
Tabela 11 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra com ângulo ajustado em 60° .....	59
Tabela 12 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos com ângulo ajustado em 60° ..	60
Tabela 13 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos .....	66
Tabela 14 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos .....	69
Tabela 15 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra .....	72
Tabela 16 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos .....	74

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

LT – Linha de Transmissão

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

SEP – Sistema Elétrico de Potência

FR – Fluxo Remanescente

RTC – Relação do transformador de corrente.

RTP – Relação do transformador de potencial.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>15</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>16</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1 Saturação de TCs .....	20
2.1.1 Características Construtivas e Saturação de TCs .....	20
2.1.2 Efeitos do Fluxo Remanescente .....	22
2.1 Relés de distância.....	23
2.2.1 Zonas de proteção, Subalcance e Sobrealcance .....	23
2.2.2 Impedância aparente e Diagrama R-X .....	25
2.2.3 Impactos da Saturação na Proteção de distância .....	26
2.3 Tipos de relés de distância .....	28
2.3.1 Relé de impedância.....	28
2.3.2 Relé de Admitância ou MHO .....	31
2.3.3 Relé de Reatância .....	33
2.3.4 Relé Quadrilateral.....	34
2.4 Principais tipos de polarização para o relé MHO .....	35
2.4.1 Autopolarização.....	35
2.4.2 Polarização Cruzada .....	36
2.4.3 Polarização por memória de tensão de sequência positiva.....	37
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
3.1 Sistema Teste .....	38
3.2 Representação do Relé através de um Algoritmo .....	39
3.3 Estudos Preliminares para o Desenvolvimento da Técnica de Ajuste Adaptativo.....	40



3.3.1	Ajuste do Relé de Distância com o Ângulo de Máximo Torque em 30° .....	40
3.3.2	Ajuste do Relé de Distância com o Ângulo de Máximo Torque em 45° .....	48
3.3.3	Ajuste do Relé de Distância com o Ângulo de Máximo Torque em 60° .....	54
3.4	Desenvolvimento da Técnica de Ajuste Adaptativo .....	60
3.5	Considerações Finais .....	63
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
4.1	Validação da Técnica de Ajuste Adaptativo Proposta.....	65
4.2	Considerações Finais da Pesquisa.....	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	77
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) são de extrema importância e se fazem necessários para que a energia elétrica produzida pelas mais diversas fontes geradoras possa ser consumida em centros distantes da sua origem. Como a potência transmitida nestes sistemas é muito alta, faz-se necessário o uso de tensões elevadas para diminuir as perdas elétricas. São sistemas robustos, que contém equipamentos de alto valor comercial e devem estar devidamente protegidos para que os custos com manutenção corretiva sejam minimizados.

Além de diminuir futuros gastos com essa manutenção, uma proteção bem coordenada e seletiva é necessária para dar confiabilidade aos SEPs, sendo então dever da mesma, isolar o ponto em falta, diminuindo, ao mínimo, o impacto causado por algum distúrbio em qualquer ponto do sistema.

A proteção de Sistemas Elétricos de Potência é feita através dos relés. Os relés são sensores que, estrategicamente colocados no sistema, efetuam a proteção do mesmo. Sendo assim, havendo uma perturbação ou defeito, o relé atua, isolando o trecho defeituoso do resto do sistema. Os relés de distância (21, segundo o padrão ANSI) são amplamente utilizados para proteção de linhas de transmissão. Os níveis de tensão e corrente são elevados em um SEP, assim os relés operam a partir dos sinais recebidos de transformadores de potencial e de corrente. Esses transformadores podem ser destinados a alimentar equipamentos de medição, proteção e controle. Como a impedância característica por quilometro de uma LT é relativamente constante, os relés identificam a distância do ponto em curto-circuito, ou seja, a impedância aparente até esse ponto. Além disso, também podem operar utilizando os parâmetros de reatância e admitância até o ponto em falta.

Em relação aos transformadores de corrente (TCs), afirma-se que esses equipamentos são fundamentais para o funcionamento adequado do sistema de proteção utilizado nos SEPs, pois sua função é replicar as altas correntes primárias em menor escala no secundário, propiciando assim acesso aos sinais de corrente da rede. No entanto, esses transformadores, como qualquer outro com núcleo ferromagnético, estão sujeitos a um fenômeno conhecido como saturação, que ocorre principalmente em função do fluxo remanescente no núcleo antes da falta.

Uma vez saturado, a corrente no secundário do TC será distorcida, prejudicando o desempenho dos relés de distância, de modo que possíveis problemas de subalcançe ocorram. Nesse caso, a impedância vista pelos relés 21 é maior do que a impedância de ajuste, mesmo

para uma falta dentro de uma das zonas de atuação dos referidos relés, fazendo com que esses dispositivos não atuem. A não atuação de um relé de distância nessas condições caracteriza uma operação inadequada do mesmo, pois o relé deve atuar, enviando um sinal para a abertura do disjuntor. Além disso, possíveis retardos na atuação desses dispositivos, bem como problemas de sobrealcance, podem ocorrer em virtude dos efeitos causados pela saturação do TC.

Tendo em vista os problemas causados pela saturação à correta operação do relé do tipo MHO, este trabalho propõe uma técnica de ajuste adaptável para o ângulo de máximo torque, o qual é um dos parâmetros ajustáveis neste tipo de proteção, em situações onde ocorra a saturação do TC a ele conectado. Tal técnica foi desenvolvida para aplicação em relés digitais numéricos, os quais processam os sinais de entrada a partir de algoritmos que implementam as mais variadas funções. Além disso, a proposta é capaz de detectar o momento em que ocorre a saturação e modificar o ajuste do relé, apresentando excelente melhoria em relação a lógica original do relé tipo MHO.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

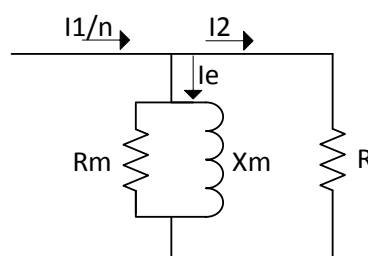
### 2.1 Saturação de TCs

O transformador de corrente tem como função, replicar as altas correntes de um sistema elétrico de potência para valores aceitáveis em seu enrolamento secundário, facilitando o acesso dos equipamentos de proteção e medição a esses dados. Como em um curto-circuito a corrente do sistema se eleva rapidamente, o TC pode ter seu núcleo saturado, fazendo com que a corrente secundária não seja exatamente proporcional à primária. Esse efeito pode afetar diretamente o desempenho de equipamentos de proteção, como os relés de distância.

#### 2.1.1 Características Construtivas e Saturação de TCs

Na Figura 1, está ilustrado o circuito equivalente simplificado de um TC, onde  $I_1/n$  é a corrente secundária total,  $I_e$  é a corrente de excitação do núcleo e  $i_2$  é a corrente disponível no enrolamento secundário, o qual está conectado à carga  $R$ .  $I_2$  é dado através da Equação (1).  $X_m$  representa a reatância,  $R_m$  a resistência e  $Z_m$  a impedância do ramo de magnetização.

Figura 1 – Circuito simplificado de um TC.



Fonte: Autoria Própria.

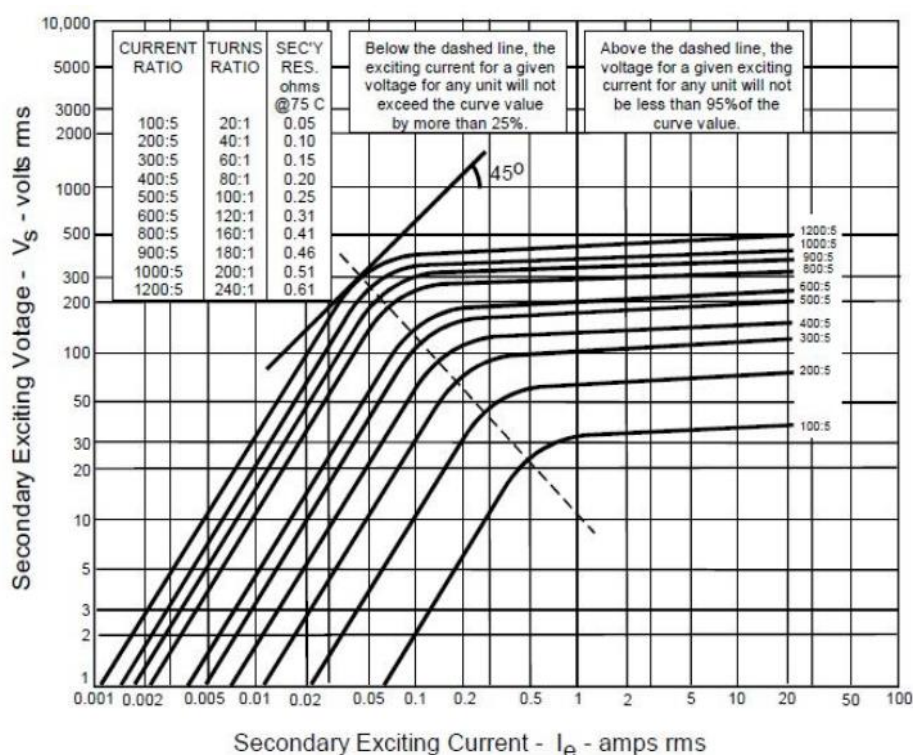
$$I_2 = \frac{I_1}{n} - I_e \quad (1)$$

O valor da corrente de excitação, em condições normais de operação, é muito pequeno devido à impedância do ramo de magnetização ser grande (SANTOS, 2013). Assim, o erro causado devido a essa corrente é muito pequeno. Entretanto, em situações indesejadas como em curtos-circuitos, o TC pode entrar em uma porção não linear da curva de excitação (acima do ponto de joelho) do núcleo, causando a saturação magnética do mesmo. Quando isso ocorre, o valor da impedância  $Z_m$  cai drasticamente e a maior parte da corrente  $I_1/n$  passa pelo ra-

mo de magnetização, causando uma distorção na forma de onda do sinal recebido pela carga do TC.

Na Figura 2, podem ser observadas as curvas de excitação de um TC da classe C para diferentes relações de transformação. Essas curvas demonstram a relação entre a tensão de excitação secundária e a corrente de excitação do núcleo. Além disso, essas curvas são dadas em escala logarítmica e obtidas a partir de testes de laboratório e cálculos feitos durante a fabricação do equipamento.

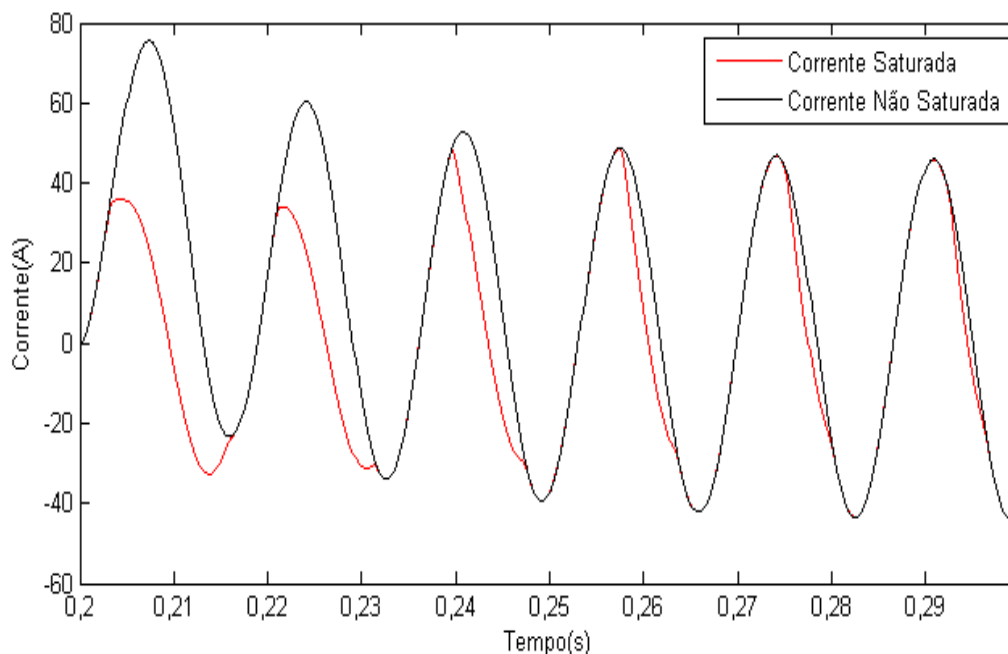
Figura 2 – Curvas de excitação de um TC da classe C com diferentes relações de transformação.



Fonte: (SANTOS, 2011, *apud*, IEEE Std C37.110-2007).

O ponto de joelho da curva de excitação (*knee-point*) é o ponto onde se tem a máxima permeabilidade magnética do núcleo. Para os valores de corrente e tensão inferiores a esse ponto, considera-se que o TC opera na região linear de operação, ou seja, os erros de transformação são desprezíveis. Já para os valores acima do ponto de joelho, o TC opera na região de saturação do núcleo, o que eleva o erro de transformação e provoca distorções significativas na forma de onda secundária, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Formas de onda de corrente (I) Saturada e Não Saturada.



Fonte: Autoria Própria.

Segundo (SAWKO, 2008), quanto maior a relação de transformação de um TC, maior será o erro na leitura da corrente no secundário. Esse erro é causado devido à corrente de magnetização em condições de falta no sistema. A carga no secundário e a proporção R/X de um sistema podem causar distorções na forma de onda da corrente secundária dos TCs. Através de simulações o autor constatou que cargas secundárias entre  $0,3\Omega$  e  $3,0\Omega$  saturam a corrente durante cerca de 4 ciclos. A partir de  $10\Omega$ , a saturação é presente em toda a simulação. A proporção R/X teve um menor impacto na distorção da corrente secundária, mas ainda assim não pode ser totalmente ignorada, pois uma componente altamente reativa também causa significativas distorções na corrente vista pelo relé. Uma das formas de se resolver esse tipo de problema seria a instalação do relé o mais próximo possível do TC.

### 2.1.2 Efeitos do Fluxo Remanescente

Fluxo residual ou remanescente (FR) é a densidade de fluxo que um material necessita para permanecer magnetizado. A remanescência ocorre quando a densidade de fluxo fica mantida em um circuito mesmo após a remoção da força magneto-motriz.

O fluxo remanescente no núcleo do TC varia de acordo com a simetria das correntes primárias e secundárias do equipamento. Para uma corrente totalmente simétrica dentro dos

níveis aceitáveis pelo TC, o núcleo do mesmo não entra na região de saturação, fazendo com que não haja distorção na forma de onda secundária.

Já para correntes completamente assimétricas, as componentes exponenciais ou unidirecionais causam um incremento considerável no fluxo remanescente, fazendo com que o fluxo resultante no núcleo do TC seja bastante elevado, o que pode causar uma distorção na forma de onda no enrolamento secundário.

O TC pode ser levado à saturação mais rapidamente durante um curto-circuito devido ao fluxo remanescente. O mesmo pode ser controlado de diversas formas, com o uso de um núcleo com entreferro ou de aço laminado por exemplo.

## **2.1 Relés de distância**

Os relés de distância (21, segundo o padrão ANSI) são amplamente utilizados para proteção de linhas de transmissão. Através de sinais de tensão e de corrente provenientes dos TPs e TCs, respectivamente. Esses relés estimam a impedância desde a sua posição até o ponto em falta. Como a impedância característica por quilometro de uma LT é relativamente constante, esses relés identificam a distância do ponto em curto-circuito, ou seja, a impedância aparente até esse ponto. Além disso, também podem operar utilizando os parâmetros de reatância e admitância até o ponto em falta.

### **2.2.1 Zonas de proteção, Subalcance e Sobrealcance**

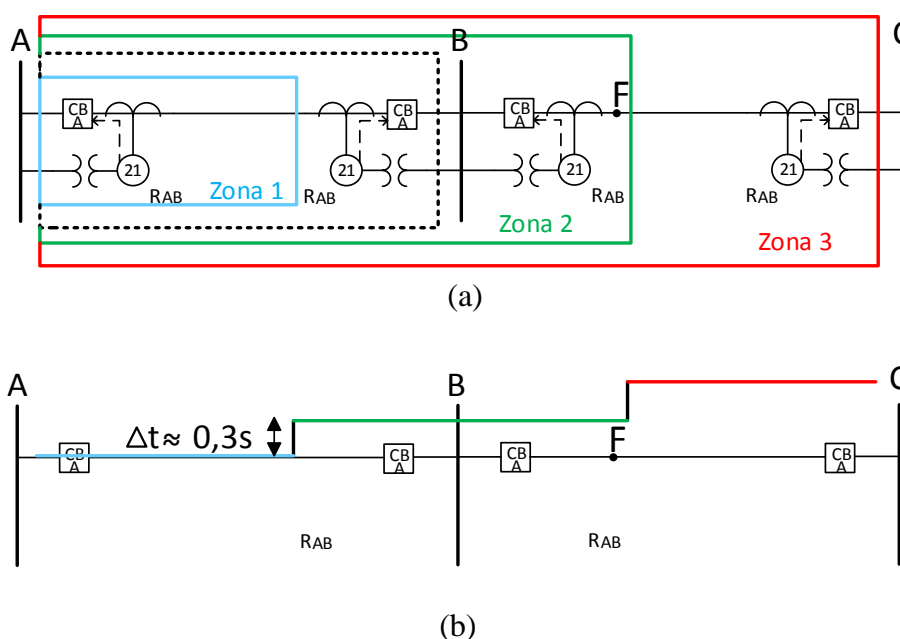
A proteção de subalcance se caracteriza pela não operação dos relés de um dado terminal para faltas além do equipamento protegido. Já a proteção de sobrealcance é uma forma de proteção que permite a operação do relé para faltas além do terminal remoto (SANTOS, 2008).

Na Figura 4(a), podem ser verificadas as zonas de proteção de um relé 21 que está protegendo o trecho entre as barras A e B. A linha pontilhada mostra a zona de proteção desejada, onde é ideal que haja a operação instantânea do relé. Como existe um pequeno erro na determinação do ponto de alcance, deve-se considerar uma Zona 1 de subalcance para garantir que não haja alcance além do primeiro trecho da linha A-B. Geralmente essa Zona 1 é ajustada entre 80% e 90% do comprimento total da LT e tem operação instantânea.

No entanto, a Zona 1 não protege todo o trecho da LT, pois a região entre o fim da Zona 1 e a barra B não está protegida. Então, tem-se uma segunda zona de proteção, que sobrealcança o terminal remoto da linha.

Para a ocorrência de uma falta no ponto F, a Zona 2 do relé  $R_{AB}$  deve ser ajustada de forma que a proteção do trecho seguinte da linha opere antes do relé no terminal A. O tempo de retardo na atuação é de cerca de 0,3 segundos para relés digitais, conforme pode ser observado na Figura 4(b).

Figura 4 – Zonas de proteção e tempo de atuação do relé 21.



Fonte: Autoria Própria.

O alcance desta segunda zona geralmente é ajustado entre 120% e 150% do comprimento da linha AB. Por precaução, o ajuste da Zona 2 do relé  $R_{AB}$  não deve ultrapassar o limite da primeira zona do relé que protege o próximo trecho da linha (entre as Barras B e C). Isto é feito a fim de evitar o desligamento desnecessário das duas LTs, caso ocorra uma falta simultânea nas segundas zonas de ambos os relés.

A segunda zona de proteção do relé  $R_{AB}$  dá proteção de retaguarda para a linha BC. Essa retaguarda depende do ajuste de alcance para esta zona. Para prover a proteção de retaguarda para toda a linha, o relé deve ser equipado com uma terceira zona de proteção. Essa Zona 3 é ajustada de modo a alcançar de 120% a 180% do trecho seguinte da linha BC e deve



ser coordenada de acordo com o tempo e distância da segunda zona do circuito vizinho. O tempo de coordenação dessa zona é da ordem de 1 segundo.

Para faltas localizadas a montante do relé, pode ser adicionada uma quarta zona de proteção, que é reversa em relação às outras zonas, para assim localizar tais defeitos.

### 2.2.2 Impedância aparente e Diagrama R-X

A impedância aparente primária é obtida através da Equação (2) e é dada em ohms primários.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Sendo V e I, respectivamente, a tensão e a corrente na barra adjacente ao relé.

Como a impedância aparente secundária é obtida nos enrolamentos secundários de seus respectivos transformadores, utiliza-se a Equação (3):

$$Z = \frac{V}{I} * \frac{RTC}{RTP} \quad (3)$$

Onde:

RTC= Relação do transformador de corrente.

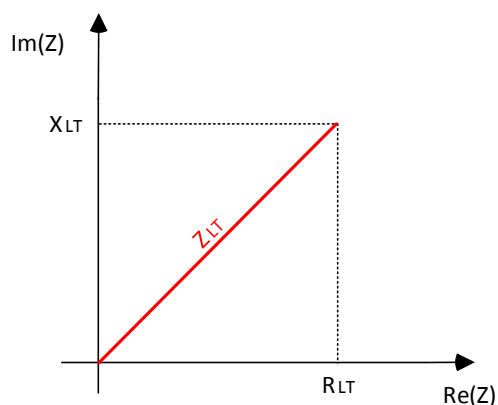
RTP= Relação do transformador de potencial.

A impedância aparente possui uma parte real (resistência aparente) e uma parte imaginária (reatância aparente), sendo assim possível colocá-la em um plano complexo chamado de Diagrama R-X.

Para a determinação das regiões de operação e não operação de um relé de distância, ou até mesmo para a identificação dos casos de sub e sobrealcance, é extremamente útil o uso deste diagrama. Isso ocorre pois os torques dos diversos tipos de relé possuem regiões de operação bem definidas no plano R-X. Através dessa ferramenta é possível analisar o desempenho do relé de distância sob a condição de saturação dos transformadores de corrente.

Na Figura 5 pode-se observar o Diagrama R-X, onde  $Z_{LT}$  é a impedância aparente da linha de transmissão.

Figura 5 – Diagrama R-X e impedância aparente da LT.

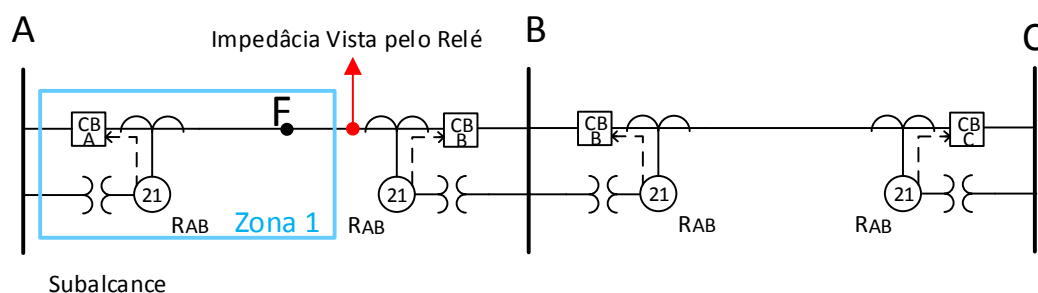


Fonte: Autoria Própria.

### 2.2.3 Impactos da Saturação na Proteção de distância

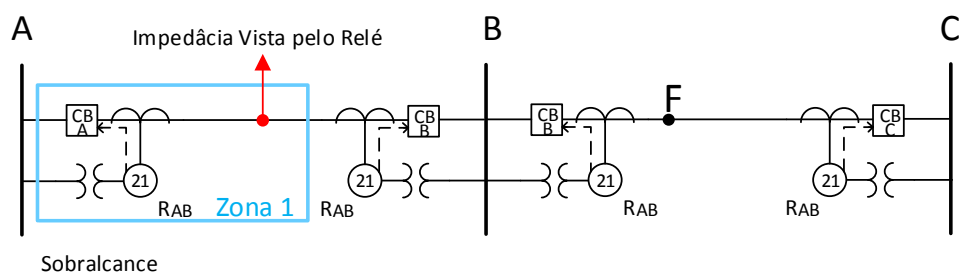
A saturação do TC pode causar subalcance e sobrealcance das zonas de operação, ou ainda atrasos na atuação de um relé de distância. Na Figura 6, pode-se observar um caso de subalcance na primeira zona de atuação (Zona instantânea) do relé da barra A, sendo que o ponto F indica o local da ocorrência do curto-circuito. Já na Figura 7, o que se observa é um caso de sobrealcance, onde o relé acaba “enxergando” a falta na primeira zona, sendo que a mesma ocorre na segunda zona de operação (Zona temporizada).

Figura 6 – Caso de Subalcance de zona.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 7 – Caso de sobrealcance de zona.



Fonte: Autoria Própria.

(MOONEY, 2008) avalia o impacto causado pela saturação dos transformadores de corrente sobre os elementos da proteção de distância. Segundo ele, a saturação de um TC pode causar graves distorções na forma de onda da corrente secundária. A saturação pode ser tão severa a ponto de que a corrente vista no enrolamento secundário pode ser efetivamente zero. Através de simulações, o autor percebeu que faltas que ocorreram dentro da zona 1 de atuação do relé foram interpretadas como ocorridas na zona 2. Isso ocorre devido ao efeito da saturação do núcleo do TC. Ele concluiu que o resultado da saturação de um TC pode modificar a amplitude e a fase da corrente vista no enrolamento secundário, o que pode causar um efeito de subalcance das zonas de atuação dos relés de distância. Para amenizar esses efeitos, o TC deve ser dimensionado adequadamente para a aplicação com relé de distância e ser colocado em locais-chave do sistema. Os mesmos cuidados devem ser tomados para dimensionamento de TCs para proteção diferencial.

Além disso, a influência da carga sob a saturação do núcleo é abordada em (POWELL, 1979). Algumas ideias para evitar a saturação são discutidas no referido trabalho. Um bom dimensionamento do TC pode minimizar esses problemas. Manter a carga no secundário do TC baixa também é uma boa medida a ser tomada a fim de evitar a saturação. Instalar os relés o mais próximo possível do equipamento, ou, se isso não for possível, utilizar cabos com diâmetros maiores, para diminuir a resistência elétrica deste condutor, são formas de se diminuir a carga no secundário do transformador de corrente.

Ainda, pode-se afirmar que, utilizando a curva de carga disponibilizada pelos fabricantes dos TCs e casá-las com a do relé, calculando o erro que a saturação mais severa poderá ocasionar, pode ajudar a evitar atuações indevidas dos equipamentos de proteção.

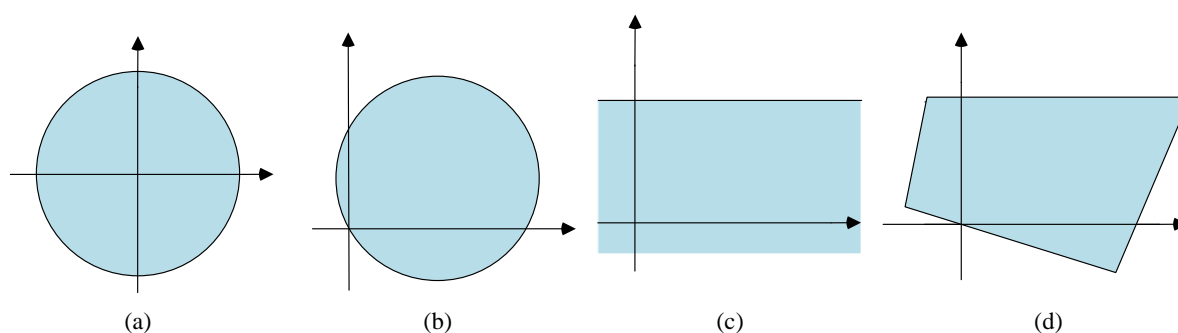
Também, vale ressaltar que (CAMARENA, 2004) fez uma modelagem e simulação de um transformador de corrente utilizado para proteção de distância. Utilizando o software

EMTP/ATP, foram realizadas simulações com um modelo de transformador com núcleo saturável, considerando diversas condições de um sistema elétrico para verificar a atuação do relé de distância. Compararam-se os dados das simulações com dados reais de ensaios realizados em laboratório, e assim, se obteve a curva de saturação do transformador de corrente. O transformador utilizado para ensaio era do tipo bucha. Os resultados obtidos nas simulações reproduzem muito bem os obtidos em laboratório, comprovando que se podem simular as características de um TC com significativos cenários de curto-circuito para obter os ajustes necessários, de modo a se conseguir um bom desempenho do relé de distância.

### 2.3 Tipos de relés de distância

Os tipos mais comuns de relés de distância, ANSI 21 são: Relé de impedância, relé de admitância ou relé MHO, relé de reatância e relé quadrilateral. Suas características estão mostradas na Figura 8.

Figura 8 – Características dos tipos de relés mais comuns. (a) Relé de impedância. (b) Relé de admitância ou MHO. (c) Relé de reatância. (d) Relé quadrilateral.



Fonte: Autoria Própria.

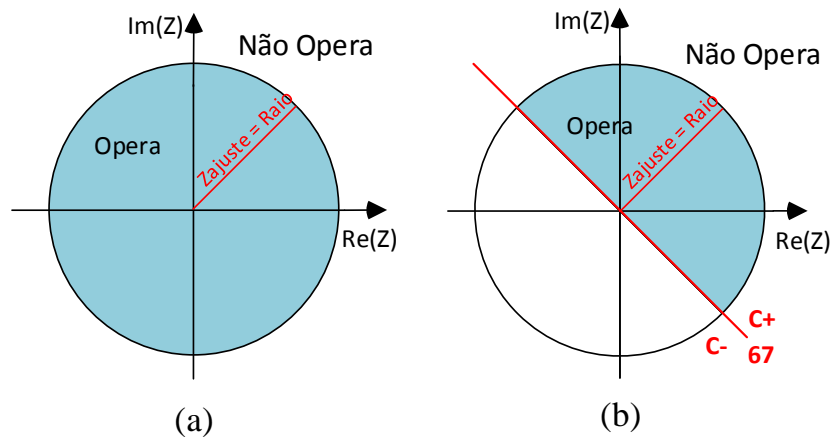
#### 2.3.1 Relé de impedância

As características dos relés de impedância são:

- A equação do conjugado forma uma circunferência no Diagrama R-X, com centro na origem Figura 9 (a);
- Sua impedância de ajuste é igual ao raio da circunferência;
- A região de atuação é definida pela parte interna da circunferência, ou seja, o relé só opera para as impedâncias que se encontram nesta parte.
- O limiar de operação é definido pela fronteira do círculo;

- Não possui direcionalidade, para isso deve ser adicionada uma unidade direcional (67), conforme ilustra a Figura 9 (b).

Figura 9 – Relé de impedância. (a) Relé de impedância sem unidade direcional. (b) Relé de impedância com unidade direcional.



Fonte: Autoria Própria.

### Ajuste e temporização das zonas

$$\text{Zona 1: } \begin{cases} Z_{\text{ajuste 1}} = 80\% \text{ a } 90\% \text{ da LT a jusante do relé} \\ T_1 = \text{Zero, atua elemento instantâneo do relé} \end{cases}$$

$$\text{Zona 2: } \begin{cases} Z_{\text{ajuste 2}} = 100\% \text{ da LT a jusante} + 50\% \text{ da LT seguinte} \\ T_2 = \Delta T \end{cases}$$

$$\text{Zona 3: } \begin{cases} Z_{\text{ajuste 3}} = 100\% \text{ da LT a jusante} + 100\% \text{ da LT 2} + 20\% \text{ da LT 3} \\ T_1 = T_2 + \Delta T = 2\Delta T \end{cases}$$

Além destes critérios, os relés podem ser ajustados conforme os critérios abaixo:

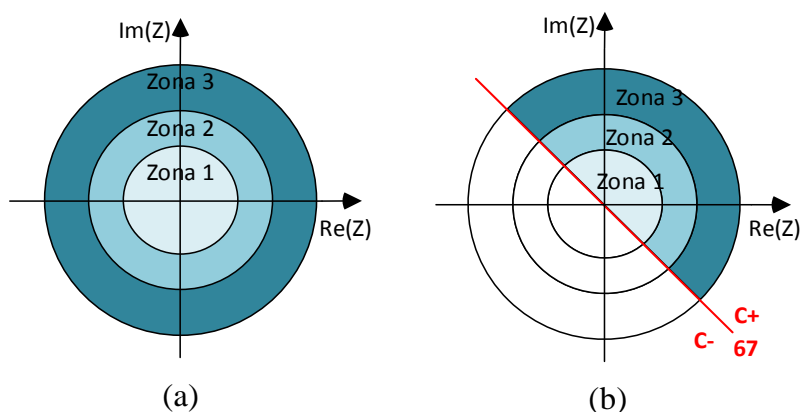
1ª Zona: 85 a 90% da impedância da LT a jusante do relé;

2ª Zona: 120 a 150% da LT a jusante do relé;

3ª Zona: 120 a 180% da LT seguinte.

A Figura 10 ilustra as zonas de atuação do relé de impedância.

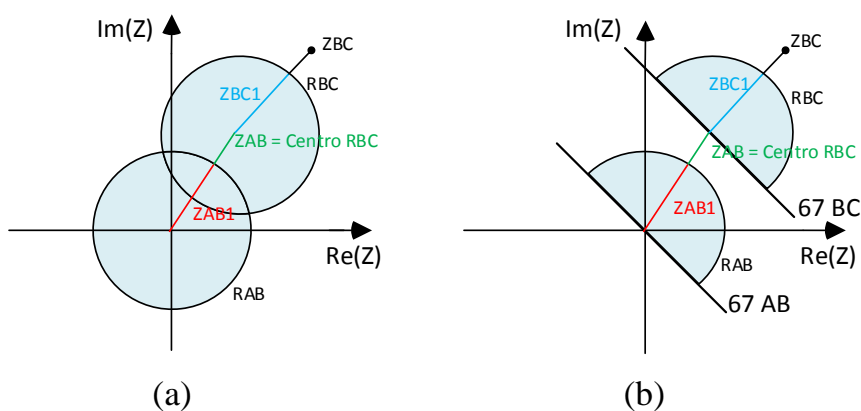
Figura 10 – Zonas de atuação do relé de impedância. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 11 demonstra o funcionamento de uma proteção em 2 linhas de transmissão (como o sistema da Figura 6) para as primeiras zonas de dois relés (AB e BC). Estas zonas não devem ter pontos em comum por serem de atuação instantânea. Por isso utiliza-se uma unidade direcional, a fim de evitar a atuação indevida dos relés para faltas fora das respectivas zonas de proteção. Este esquema é semelhante para os demais tipos de relés de distância, sendo distinguidas apenas as regiões de operação de cada um.

Figura 11 – Relés de impedância para o esquema da Figura 4. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.



Fonte: Autoria Própria.

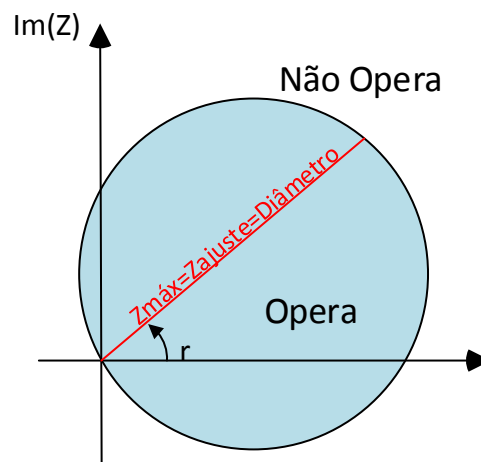
### 2.3.2 Relé de Admitância ou MHO

- De forma análoga ao relé de impedância, a equação de torque do relé MHO define uma região circular no Diagrama R-X;
- Essa circunferência passa pela origem e seu diâmetro é igual à impedância de ajuste;
- O centro da circunferência é obtido através da Equação (4).
- A região de operação é definida pelo círculo;
- Também opera somente para impedâncias internas ao círculo;
- Possui direcionalidade, não há necessidade do acréscimo de uma unidade direcional;
- Por ser direcional possui garantia de seletividade;
- Possui alcance bem definido;

$$Z_{centro} = \frac{Z_{ajuste}}{2} \quad (4)$$

A Figura 12 ilustra a região de operação do relé MHO, onde  $r$  é o ângulo de máximo torque do mesmo. Este ângulo é importante para o ajuste das zonas de proteção.

Figura 12 – Relé de Admitância ou MHO.

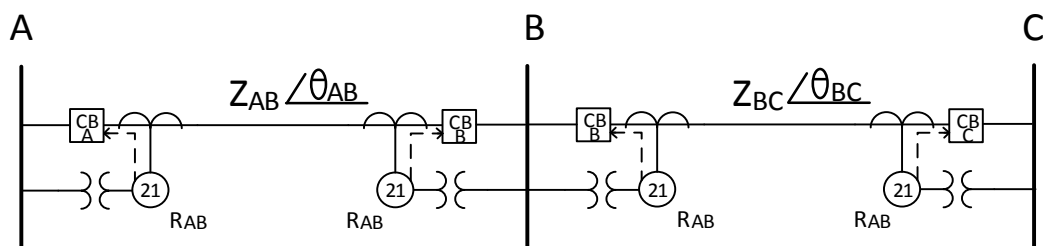


Fonte: Autoria Própria.

### Ajuste e Temporização das Zonas

Para melhor entendimento, considera-se o sistema da Figura 13.

Figura 13 – Ajuste do relé MHO.



Fonte: Autoria Própria.

### 1ª ZONA

O ajuste da primeira zona do relé de admitância, assim como o de impedância, é entre 80 e 90% da impedância da primeira LT. O que diferencia este tipo de relé, é que o ângulo de máximo torque do mesmo, não coincide com o ângulo da impedância da linha. Levando isso em consideração, tem-se que o ajuste da primeira zona de proteção se dá através da Equação (5).

$$Z_{Ajuste1} = \frac{|Z_{80\%LT-AB}|}{\cos(\theta_{AB} - r)} \quad (5)$$

Como a primeira zona tem atuação instantânea o tempo de atuação é zero ( $T_1 = 0$ ).

### 2ª ZONA

Para o ajuste da segunda zona, se considera 100% da impedância da primeira LT e soma-se cerca de 50 a 60% da impedância da segunda linha. O ajuste é semelhante ao da primeira zona, como demonstra a Equação (6).

$$Z_{Ajuste2} = \frac{|Z_{protegido2}|}{\cos(\theta_2 - r)} \quad (6)$$

Onde  $Z_{protegido2}$  e  $\theta_2$ , são definidos conforme a Equação (7).

$$Z_{protegido2} = Z_{AB} + Z_{50\%LT-BC} = |Z_{protegido2}| \angle \theta_2 \quad (7)$$

O tempo de atuação desta zona será:

$$T_2 = T_1 + \Delta_T = 0 + \Delta_T = \Delta_T$$



### 3ª ZONA

A terceira zona deve cobrir todas as linhas AB e BC mais um trecho da terceira linha (entre 20 e 30%). O ajuste desta zona é dado através da Equação (8).

$$Z_{Ajuste3} = \frac{|Z_{protegido3}|}{\cos(\theta_3 - r)} \quad (8)$$

Onde  $Z_{protegido3}$  e  $\theta_3$  são definidos através da Equação (9).

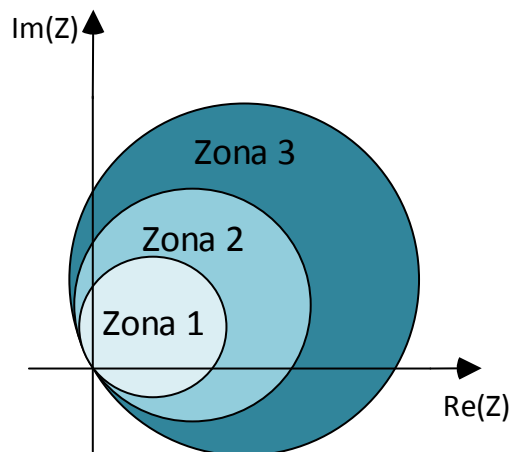
$$Z_{protegido3} = Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{20\% LT seguinte} = |Z_{protegido3}| \angle \theta_3 \quad (9)$$

A temporização desta zona será:

$$T_3 = T_2 + \Delta_T = 2\Delta_T$$

A Figura 14 ilustra as zonas de atuação de um relé de admitância ou MHO.

Figura 14 – Zonas de proteção de um relé MHO.



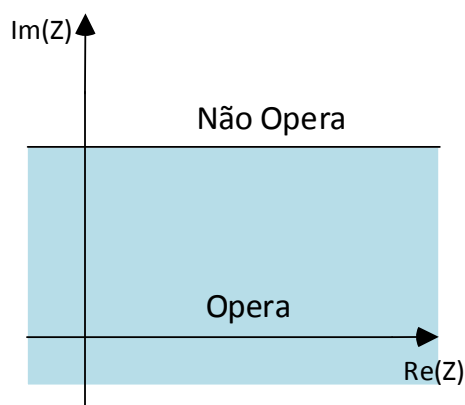
Fonte: Autoria Própria.

#### 2.3.3 Relé de Reatância

- Opera somente pela sensibilidade à reatância do sistema;
- Sua região de operação é definida por uma reta paralela ao eixo R, sendo as outras direções estendidas até o infinito Figura 15;
- Atua para as impedâncias cujas reatâncias sejam menores que a de ajuste do relé;

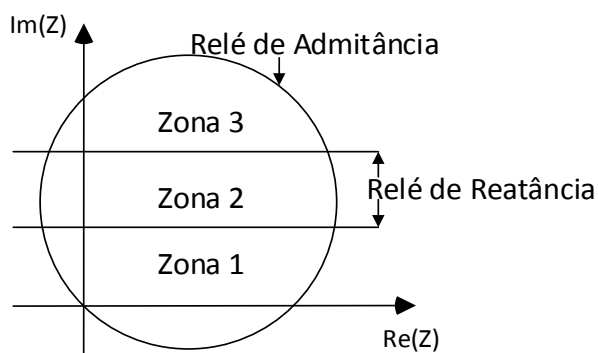
- Possui maior imunidade aos efeitos provenientes do arco elétrico;
- Pelo fato de ver apenas a reatância do sistema, pode atuar indevidamente devido às oscilações de carga;
- Para diminuir a possibilidade de o relé de reatância atuar com as oscilações de carga, pode-se adicionar um relé de admitância para supervisioná-lo (KINDERMANN, 1999). A Figura 16 ilustra esta situação.

Figura 15 – Relé de reatância.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Relé de reatância associado ao relé de admitância.



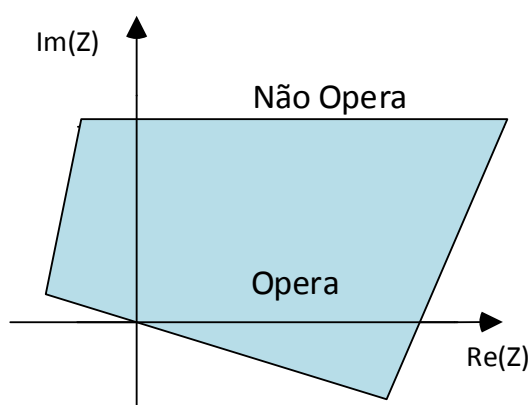
Fonte: Autoria Própria.

### 2.3.4 Relé Quadrilateral

- Sua região de operação é definida por quatro retas conforme mostra a Figura 17;
- Necessita-se de quatro comparadores, no mínimo, um para cada lado da característica;

- São ajustados limites máximos e mínimos de reatância e resistência;
- Um elemento direcional deve ser adicionado, para definir os limites inferiores da região de operação;
- Devido à complexidade desta característica, só é possível esse tipo de operação em relés digitais ou microprocessados.

Figura 17 – Região de operação do relé quadrilateral.



Fonte: Autoria Própria.

## 2.4 Principais tipos de polarização para o relé MHO

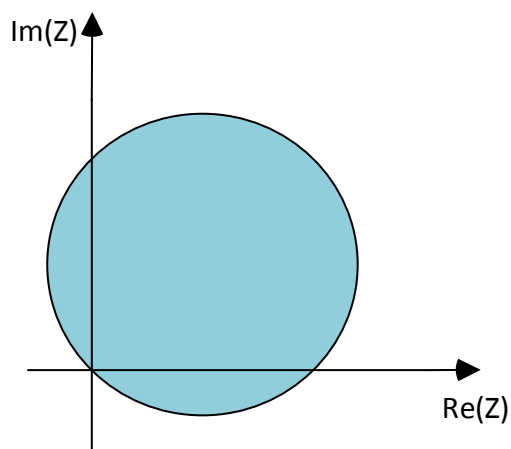
A característica MHO é obtida através de um comparador de fase do tipo cosseno. Esse comparador mede o ângulo de fase entre os sinais de operação, que produz torque favorável ao fechamento dos contatos do relé, e de restrição, o qual produz torque contrário ao fechamento dos contatos do relé. A característica é circular no plano R-X, e seus limites se encontram entre os ângulos  $-90^\circ$  e  $90^\circ$  (ROBERTS, 1993).

### 2.4.1 Autopolarização

- Utiliza a tensão de fase como grandeza de restrição e a corrente de fase como grandeza de operação (ROBERTS, 1997);
- Ideal para proteção contra faltas bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas;
- Não garante proteção para faltas monofásicas francas à terra.

A Figura 18 mostra a característica de atuação do relé MHO autopolarizado.

Figura 18 – Característica autopolarizada.



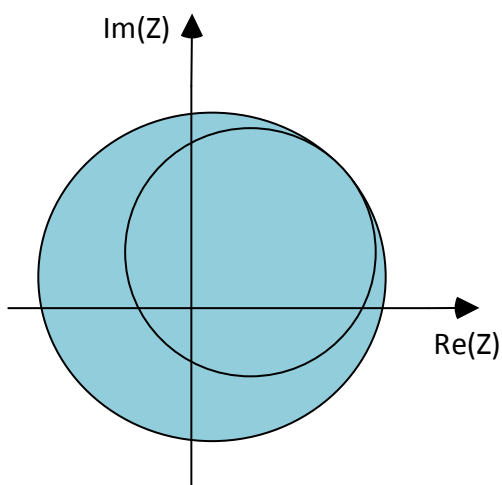
Fonte: Autoria Própria.

#### 2.4.2 Polarização Cruzada

- Utiliza tensão entre as demais fases como grandeza de restrição;
- Garante proteção para curto-circuito franco à terra;
- Requer unidade direcional.

A Figura 19 demonstra a característica de atuação de um relé MHO com polarização cruzada.

Figura 19 – Polarização cruzada.



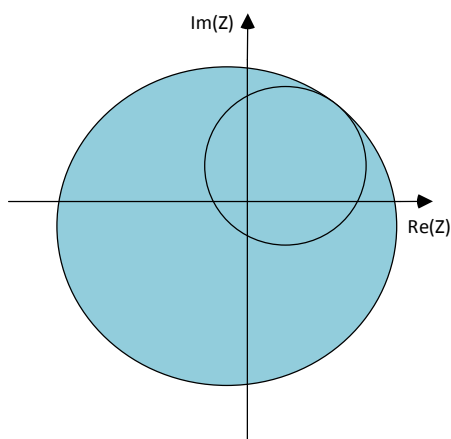
Fonte: Autoria Própria.

### 2.4.3 Polarização por memória de tensão de sequência positiva

- Utiliza tensão de sequência positiva como grandeza de restrição;
- Garante proteção contra curto-circuito monofásico franco;
- Promove maior expansão da região de operação;
- Requer unidade direcional.

A polarização por memória de tensão de sequência positiva pode se visualizada na Figura 20.

Figura 20 – Polarização por memória de tensão de sequência positiva.



Fonte: Autoria Própria.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, onde as simulações de curto-circuito se deram com o software EMTP-ATP, que foram posteriormente analisados em um algoritmo que simula um relé de distância no software MATLAB<sup>®</sup>. A análise de desempenho foi feita para um relé de admitância (característica MHO) de fase com polarização direta, considerando o efeito causado pela saturação dos transformadores de corrente.

Tendo em vista os assuntos abordados no capítulo anterior, optou-se pela utilização de um relé de distância do tipo MHO, autopolarizado, para a realização do trabalho, uma vez que esta característica é amplamente utilizada e apresenta a vantagem de ser naturalmente direcional, não sendo necessária a combinação com um relé direcional 67.

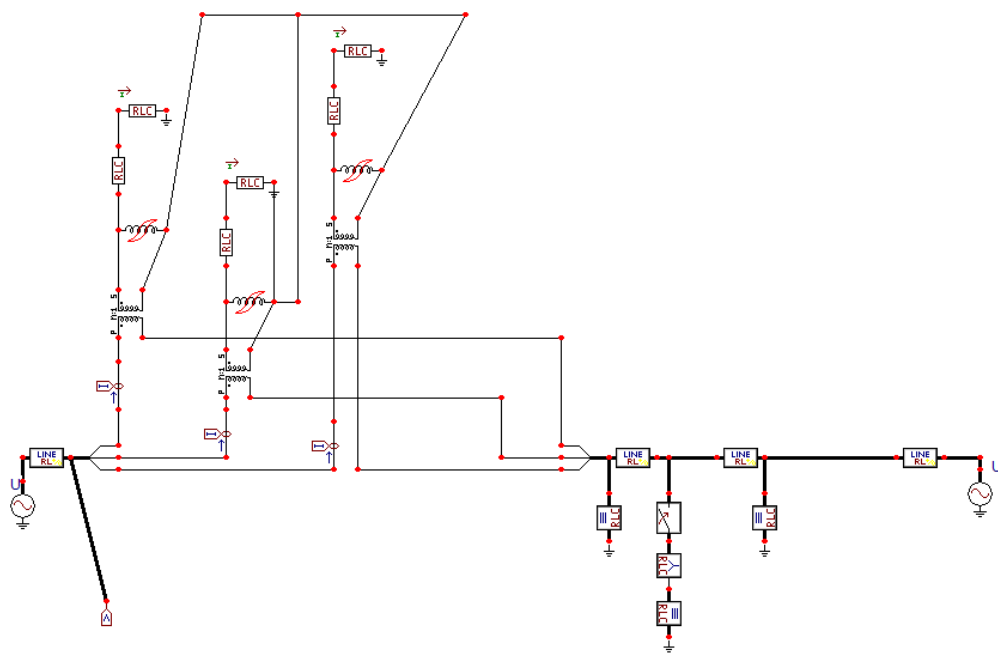
#### 3.1 Sistema Teste

O sistema teste utilizado para as simulações de curto-circuito no software EMTP-ATP<sup>®</sup> pode ser visualizado na Figura 21.

A frequência do sistema é 60 Hz. Os geradores ( $G_A$  e  $G_B$ ) possuem impedâncias de sequência zero ( $G_{Z0}$ ) e sequência positiva ( $G_{Z1}$ ), respectivamente, de  $3,681 + j24,515\Omega$  e  $0,819 + j7,757\Omega$ . As tensões aplicadas nos geradores A e B possuem a mesma amplitude de 190 kV, porém, com um ângulo de defasagem entre eles de  $30^\circ$  para que o fluxo de potência se dê na direção  $G_A$  para  $G_B$ . A linha de transmissão possui comprimento de 100 km. Suas impedâncias de sequência zero e positiva são respectivamente:  $Z_0 = 18,41 + j 122,58\Omega$  e  $Z_1 = 4,1 + j 38,78\Omega$ .

O tempo total de cada simulação foi de 0,6 segundos, e, para todos os casos analisados, o curto-circuito ocorre no instante 0,2 s, equivalente a um ângulo de incidência de falta de zero graus na fase A do sistema e correspondente a doze ciclos da onda de tensão após o início da simulação.

Figura 21 – Sistema teste simulado em EMTP-ATP.



Fonte: Autoria Própria.

Diversos casos de curto-circuito foram simulados no sistema teste no EMTP-ATP, variando o local da falta, o tipo de curto-circuito, o nível de fluxo remanescente e a carga no secundário do TC. Foram simulados curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos, com uma carga de 4 ohms puramente resistiva no secundário do transformador de corrente. Os pontos de falta foram tomados a partir de 5% da LT, passando por 10%, 25%, 50% e 80% da linha de transmissão. Além disso, as faltas foram simuladas para valores de 0%, 25%, 50% e 80% de fluxo remanescente no núcleo do TC da fase A.

### 3.2 Representação do Relé através de um Algoritmo

O relé teve sua característica simulada a partir de um algoritmo estruturado no software MATLAB<sup>®</sup>, o qual simula o funcionamento de um relé de distância do tipo MHO autopolarizado, para ângulo de ajuste de  $89,96^\circ$ . Esse ângulo corresponde ao ângulo da linha, o qual foi escolhido por tratar-se de um relé digital.

Um filtro de Fourier de ciclo completo implementado no software MATLAB<sup>®</sup> foi utilizado para determinar os valores RMS instantâneos dos sinais de tensão e de corrente obtidos nas simulações de curto-circuito. Esses sinais que foram salvos em um banco de dados, uma vez que o relé em questão tem sua operação determinada pelo processamento desses valores.

Como base para a análise foram utilizados os conceitos de subalcance e sobrealcance, bem como o atraso de operação. Nas análises feitas neste trabalho, um problema de subalcance é caracterizado quando a impedância vista pelo relé é maior do que o seu ajuste da Zona 1 para uma falta dentro da primeira zona de proteção. Do contrário, quando a impedância vista pelo relé é menor do que seu ajuste da Zona 1 para uma falta externa a essa zona, fica caracterizado um problema de sobrealcance. Por fim, o atraso na atuação do relé é caracterizado pela diferença entre os instantes de atuação do relé processando a forma de onda ideal e a forma de onda distorcida por saturação.

### **3.3 Estudos Preliminares para o Desenvolvimento da Técnica de Ajuste Adaptativo**

Nesta seção serão apresentados os problemas resultantes quando o ângulo de máximo torque do relé de distância é ajustado em um único ângulo. Para isto, serão considerados os ângulos que habitualmente são utilizados nesses relés, sendo estes valores iguais a 30°, 45°, 60°.

Esses estudos fizeram-se necessários para encontrar os melhores ângulos de ajuste do relé sob condição da saturação do TC, dando embasamento para o desenvolvimento da técnica de ajuste adaptativo.

#### **3.3.1 Ajuste do Relé de Distância com o Ângulo de Máximo Torque em 30°**

Ajustando o ângulo de máximo torque do relé em 30°, foram analisados todos os casos de curto-circuito já mencionados anteriormente, com as variações de fluxo remanescente também já citadas.

Os resultados obtidos com esse ajuste de ângulo foram expostos nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, onde foram informados os casos, os tempos em que o relé deveria operar ( $T_{ideal}$ ), quando a impedância vista por ele fosse um sinal ideal sem distorção devida à saturação, os tempos em que o relé acabou atuando em função da distorção imposta pela saturação ( $T_{real}$ ) e os tempos de atraso de operação ou efeitos de subalcances e sobrealcances causados por esta (Efeito/ $T_{atraso}$ ).

Os curtos-circuitos monofásicos expostos na Tabela 1, não apresentaram problemas significativos quando as faltas ocorreram em 5%, 10% e 25% da linha, e com qualquer fluxo remanescente no interior do TC. Constataram-se, em alguns desses casos, atrasos de operação, sendo que o maior ocorreu quando a falta aconteceu em 25% da linha e o fluxo remanescente



de 80%, chegando ao tempo de 3,7 ms. Esse atraso pode ser visto na Figura 22. Considerando que o relé de distância não deve operar no limiar de operação, ou seja, em 80% da linha, para a ocorrência de falta monofásica nesse trecho da linha o relé não atuou, tanto com a impedância ideal, como para a real, vista por ele.

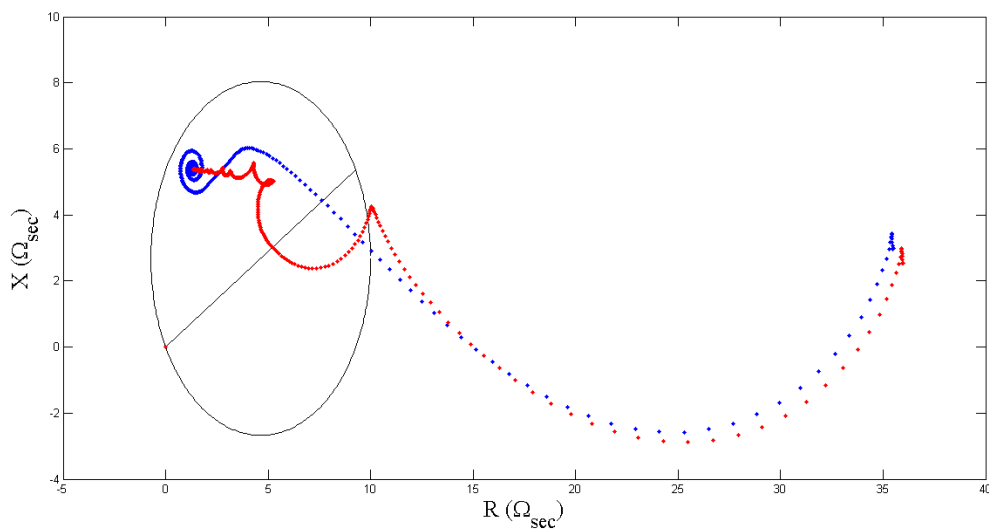
Tabela 1 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos com ângulo ajustado em 30°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_25%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_50%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_80%FR	0,0004	0,2058	0,2062
10%LT_0%FR	0,0002	0,2062	0,2064
10%LT_25%FR	0,0002	0,2062	0,2064
10%LT_50%FR	0,0002	0,2062	0,2064
10%LT_80%FR	0,0005	0,2062	0,2067
25%LT_0%FR	0	0,2076	0,2076
25%LT_25%FR	0	0,2076	0,2076
25%LT_50%FR	0	0,2076	0,2076
25%LT_80%FR	0,0037	0,2076	0,2112
50%LT_0%FR	Sublance	Não Atuou	Não Atuou
50%LT_25%FR	Sublance	Não Atuou	Não Atuou
50%LT_50%FR	Sublance	Não Atuou	Não Atuou
50%LT_80%FR	0	Não Atuou	0,2170
80%LT_0%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_25%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_50%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_80%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

Analisando as ocorrências de curtos-circuitos monofásicos em 50% da linha, pode-se observar um grave problema de sublance para os casos de fluxo remanescente 0%, 25% e 50%, caracterizando que a falta ocorre dentro da zona de atuação instantânea do relé, mas a impedância aparente vista pelo mesmo fica fora dessa zona. Em outras palavras, o relé deveria ter atuado. Porém, devido à distorção promovida pela saturação, o relé acaba não atuando. Entretanto, quando o fluxo remanescente no TC foi de 80%, a saturação acabou sendo benéfica, fazendo com que a impedância vista pelo relé entrasse na zona temporizada.

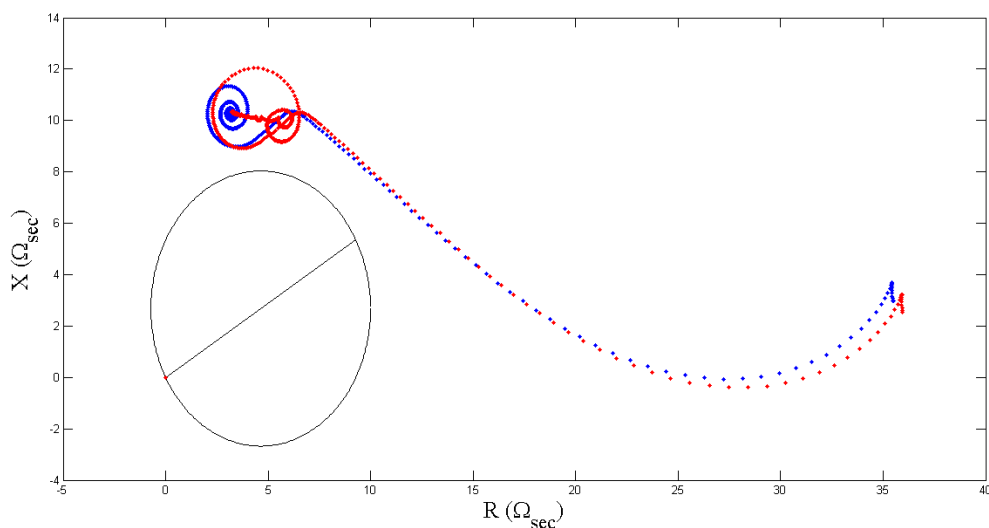
Figura 22 – Atraso de operação, para uma falta monofásica em 25% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 23 representa um dos casos de subbalcance encontrados quando o curto-circuito monofásico aconteceu em 50% da linha.

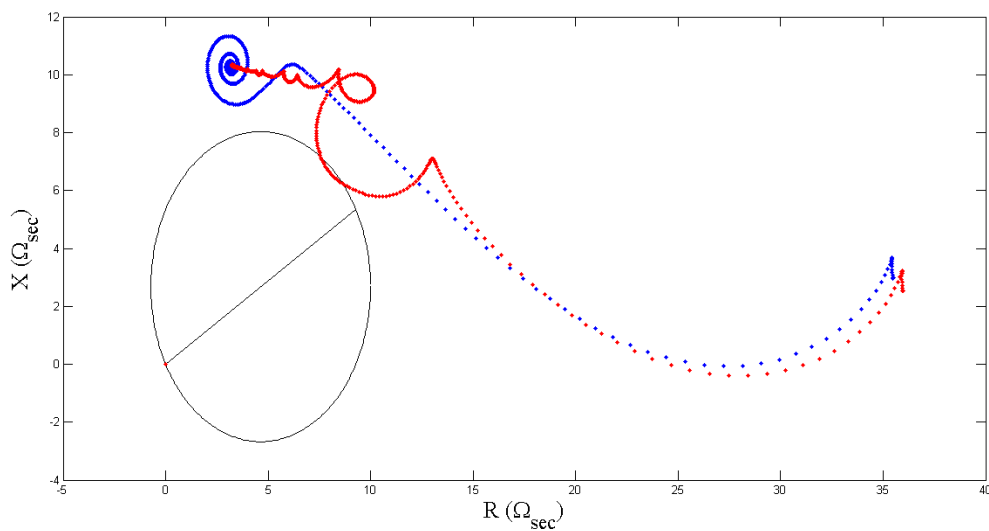
Figura 23 – Subbalcance, para uma falta monofásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 50% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 24 pode-se observar que a saturação teve um efeito profícuo, fazendo com que o relé enxergasse essa impedância dentro da zona temporizada e atuasse, levando em conta que o sinal tido como ideal não fora visto dentro dessa zona.

Figura 24 – Efeito benéfico da saturação, para uma falta monofásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Para curtos-circuitos bifásicos, os resultados contidos na Tabela 2 evidenciam atrasos de operação e alguns casos de sobrealcances em outros. Nota-se que os atrasos mais significativos aconteceram quando o fluxo remanescente é de 80% nas faltas em 5%, 10%, 24% e 50% da linha, com tempos de 1,1 ms, 1 ms, 6,1 ms e 6,6 ms, respectivamente. Os sobrealcances aconteceram nas faltas em 80% da linha com fluxos remanescente de 0%, 25% e 50%, mas, quando esse foi de 80%, a saturação fez com que o relé deixasse de atuar, visto que o sinal ideal estava dentro da zona instantânea vista pelo relé, mas deveria estar na zona temporizada, devendo não operar para uma falta em 80% da linha.

Um dos atrasos de operação observados em curtos-circuitos bifásicos pode ser melhor visualizado a partir da Figura 25. O caso escolhido para demonstrar esse atraso foi o que apresentou maior representatividade com 6,6 ms.

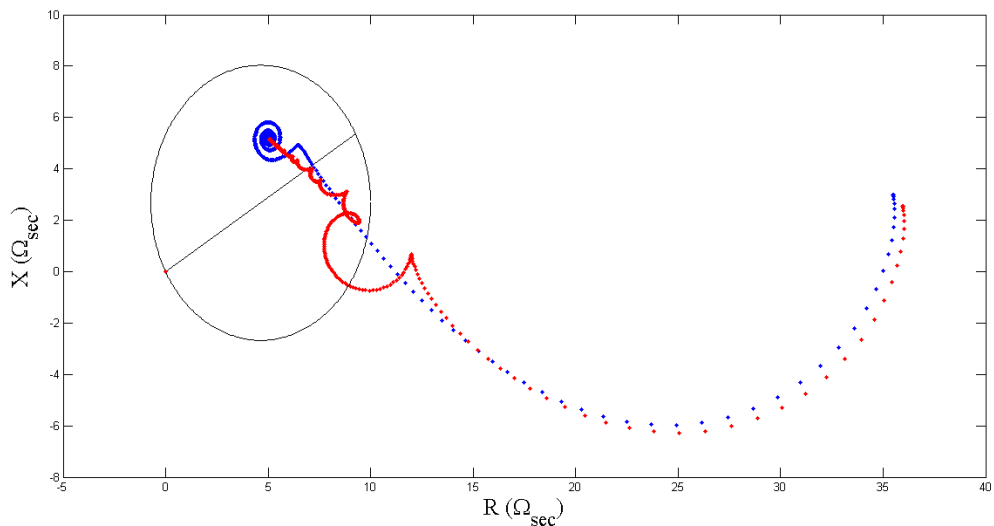
Tabela 2 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos com ângulo ajustado em 30°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2053	0,2053
5%LT_25%FR	0	0,2053	0,2053
5%LT_50%FR	0,0002	0,2053	0,2055
5%LT_80%FR	0,0011	0,2053	0,2064
10%LT_0%FR	0	0,2055	0,2055
10%LT_25%FR	0	0,2055	0,2055
10%LT_50%FR	0,0002	0,2055	0,2057
10%LT_80%FR	0,0010	0,2055	0,2065
25%LT_0%FR	0	0,2062	0,2062
25%LT_25%FR	0	0,2062	0,2062
25%LT_50%FR	0	0,2062	0,2062
25%LT_80%FR	0,0061	0,2062	0,2113
50%LT_0%FR	0,0002	0,2074	0,2076
50%LT_25%FR	0,0002	0,2074	0,2076
50%LT_50%FR	0,0002	0,2074	0,2076
50%LT_80%FR	0,0066	0,2074	0,2140
80%LT_0%FR	Sobrealcance	0,2156	0,2156
80%LT_25%FR	Sobrealcance	0,2156	0,2156
80%LT_50%FR	Sobrealcance	0,2156	0,2152
80%LT_80%FR	Não Atuou	0,2156	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

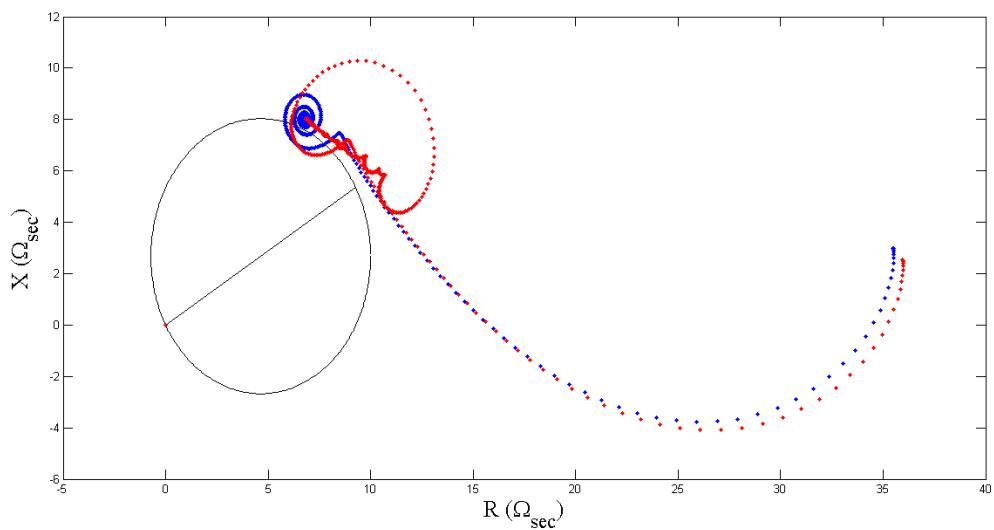
Na Figura 26, observa-se um sobrealcance do relé 21, tanto para o sinal ideal quanto para o sinal distorcido pela saturação. Na Figura 27, para uma falta em 80% da LT com 80% de FR, observa-se que o sinal distorcido pela saturação, encontra-se fora da área de operação do relé. Sendo assim, nesse caso, a saturação contribuiu para que a impedância vista pelo relé estivesse fora da zona instantânea.

Figura 25 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



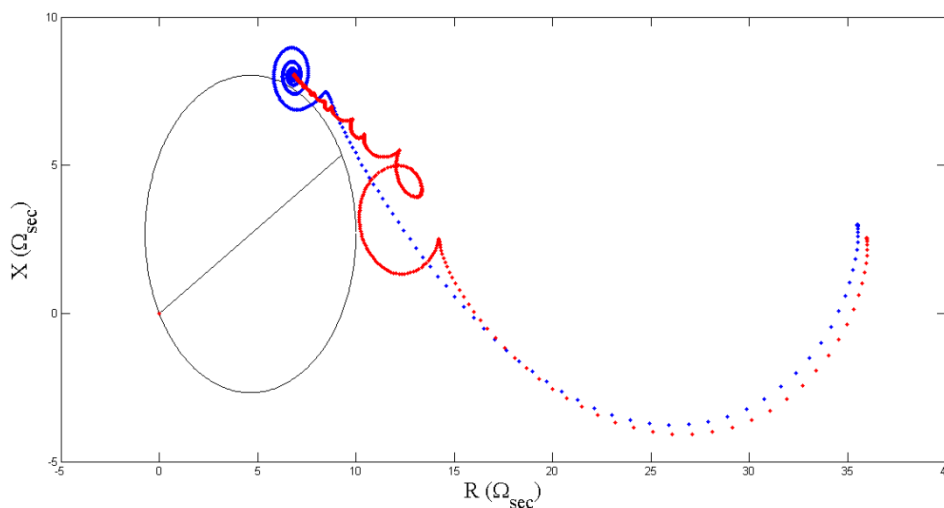
Fonte: Autoria Própria.

Figura 26 – Sobrealcançe, para uma falta bifásica em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 50% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

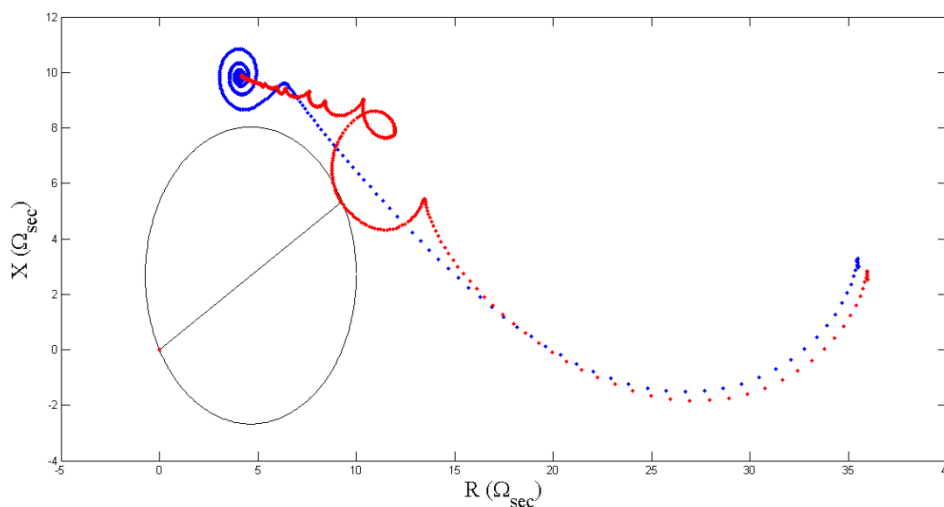
Figura 27 – Efeito benéfico da saturação fazendo com que o relé não atue na região limiar de operação, para uma falta bifásica em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Em curtos-circuitos bifásicos-terra, os resultados se assemelham aos obtidos para as faltas bifásicas, com pequenos atrasos e somente um atraso significativo. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 3. Observa-se também um caso de sobrealcançe que pode ser melhor visualizado na Figura 28.

Figura 28 – Sobrealcançe, para uma falta bifásica-terra em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 3 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra com ângulo ajustado em 30°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2051	0,2051
5%LT_25%FR	0	0,2051	0,2051
5%LT_50%FR	0	0,2051	0,2051
5%LT_80%FR	0,0006	0,2051	0,2057
10%LT_0%FR	0	0,2055	0,2055
10%LT_25%FR	0	0,2055	0,2055
10%LT_50%FR	0	0,2055	0,2055
10%LT_80%FR	0,0005	0,2055	0,2060
25%LT_0%FR	0	0,2062	0,2062
25%LT_25%FR	0	0,2062	0,2062
25%LT_50%FR	0	0,2062	0,2062
25%LT_80%FR	0,0009	0,2062	0,2071
50%LT_0%FR	0,0002	0,2074	0,2076
50%LT_25%FR	0,0002	0,2074	0,2076
50%LT_50%FR	0,0002	0,2074	0,2076
50%LT_80%FR	0,0054	0,2074	0,2128
80%LT_0%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_25%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_50%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_80%FR	Sobrealcance	Não Atuou	0,2173

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 4 podem ser vistos os resultados para curtos trifásicos, em que o relé com o ângulo de máximo torque ajustado em 30° operou de maneira bem satisfatória, apresentando pequenos ou nenhum atraso na maioria dos casos. Além disso, para esse ajuste, o relé deixou de operar no limiar de operação em 80% da linha para todos os casos de fluxo remanescente o TC.

O maior problema ficou por conta do atraso de operação em 50% da linha quando o fluxo no interior do TC se encontrava em 80%, onde foi registrado um atraso de 4,7 ms.

Tabela 4 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos com ângulo ajustado em 30°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2053	0,2053
5%LT_25%FR	0	0,2053	0,2053
5%LT_50%FR	0	0,2053	0,2053
5%LT_80%FR	0,0004	0,2053	0,2057
10%LT_0%FR	0,0002	0,2055	0,2057
10%LT_25%FR	0,0002	0,2055	0,2057
10%LT_50%FR	0,0002	0,2055	0,2057
10%LT_80%FR	0,0003	0,2055	0,2058
25%LT_0%FR	0	0,2064	0,2064
25%LT_25%FR	0	0,2064	0,2064
25%LT_50%FR	0	0,2064	0,2064
25%LT_80%FR	0,0005	0,2064	0,2069
50%LT_0%FR	0	0,2079	0,2079
50%LT_25%FR	0	0,2079	0,2079
50%LT_50%FR	0	0,2079	0,2079
50%LT_80%FR	0,0047	0,2079	0,2126
80%LT_0%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_25%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_50%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_80%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.2 Ajuste do Relé de Distância com o Ângulo de Máximo Torque em 45°

Com o ângulo de máximo torque ajustado em 45°, novamente serão analisados curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos, com os fluxos remanescentes no TC de 0%, 25%, 50% e 80%.

Na Tabela 5 estão contidos os resultados de falta monofásicas com seus respectivos fluxos remanescentes e suas posições de ocorrência em percentual na linha de transmissão. Nestas condições, foi observado somente um atraso significativo de 4,7 ms, em 25% da linha e com 80% de fluxo no TC. No restante dos casos, a saturação ocasionou pequenos ou nenhum atraso e, até mesmo, adiantamentos na operação em relação ao sinal ideal. Esse fenômeno aconteceu em dois casos, em 50% da linha com fluxos de 50% e 80%.



Tabela 5 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos com ângulo ajustado em 45°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2064	0,2064
5%LT_25%FR	0	0,2064	0,2064
5%LT_50%FR	0	0,2064	0,2064
5%LT_80%FR	0,0005	0,2064	0,2069
10%LT_0%FR	0	0,2067	0,2067
10%LT_25%FR	0	0,2067	0,2067
10%LT_50%FR	0	0,2067	0,2067
10%LT_80%FR	0,0007	0,2067	0,2074
25%LT_0%FR	0	0,2079	0,2079
25%LT_25%FR	0	0,2079	0,2079
25%LT_50%FR	0	0,2079	0,2079
25%LT_80%FR	0,0047	0,2079	0,2126
50%LT_0%FR	0	0,2177	0,2177
50%LT_25%FR	0	0,2177	0,2177
50%LT_50%FR	-0,0004	0,2177	0,2173
50%LT_80%FR	-0,0004	0,2177	0,2173
80%LT_0%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_25%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_50%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_80%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

Para faltas bifásicas, ocorreram maiores problemas com o ângulo ajustado em 45°, quando o fluxo remanescente foi de 80% para 5%, 10%, 25% e 50% da linha, sendo que os atrasos de operação foram muito grandes, com tempos de 12,2 ms, 9,4 ms, 7,8 ms e 8,2 ms, respectivamente. Também, ocorreram problemas de sobrealcançe para todos os fluxos em 80% da LT. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos com ângulo ajustado em 45°

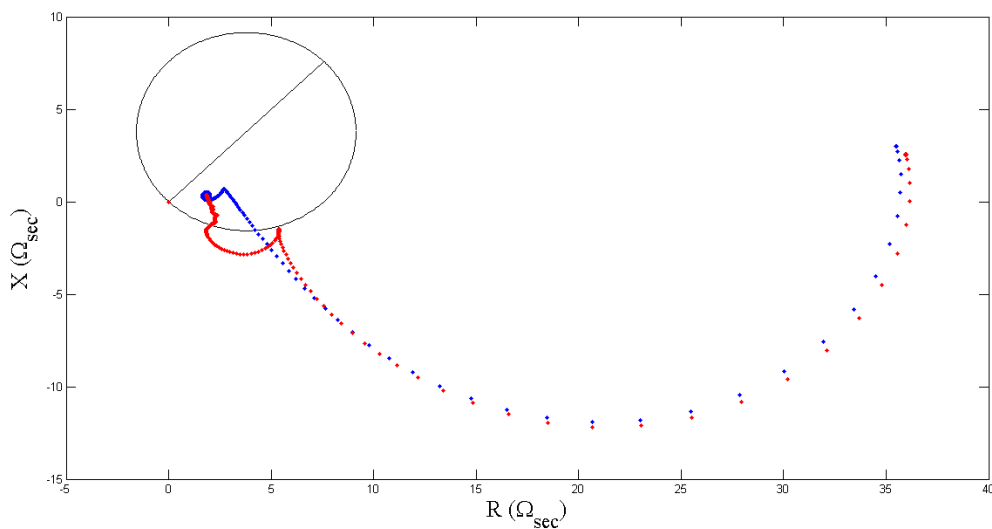
Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2060	0,2060
5%LT_25%FR	0	0,2060	0,2060
5%LT_50%FR	0,0004	0,2060	0,2064
5%LT_80%FR	0,0122	0,2060	0,2182
10%LT_0%FR	0	0,2062	0,2062
10%LT_25%FR	0	0,2062	0,2062
10%LT_50%FR	0,0002	0,2062	0,2064
10%LT_80%FR	0,0094	0,2062	0,2156
25%LT_0%FR	0	0,2069	0,2069
25%LT_25%FR	0	0,2069	0,2069
25%LT_50%FR	0	0,2069	0,2069
25%LT_80%FR	0,0078	0,2069	0,2177
50%LT_0%FR	0	0,2081	0,2081
50%LT_25%FR	0,0002	0,2081	0,2083
50%LT_50%FR	0,0002	0,2081	0,2083
50%LT_80%FR	0,0082	0,2081	0,2163
80%LT_0%FR	Sobrealcance	0,2151	0,2152
80%LT_25%FR	Sobrealcance	0,2151	0,2152
80%LT_50%FR	Sobrealcance	0,2151	0,2151
80%LT_80%FR	Sobrealcance	0,2156	0,2831

Fonte: Autoria Própria.

Desses atrasos relativamente grandes encontrados nesse tipo de curto em que o ângulo do relé foi ajustado em 45°, o caso que teve maior atraso de 12,2 ms em 5% da linha com fluxo remanescente de 80% é exposto na Figura 29, para que se possa ter uma maior compreensão do efeito causado pela saturação do TC.

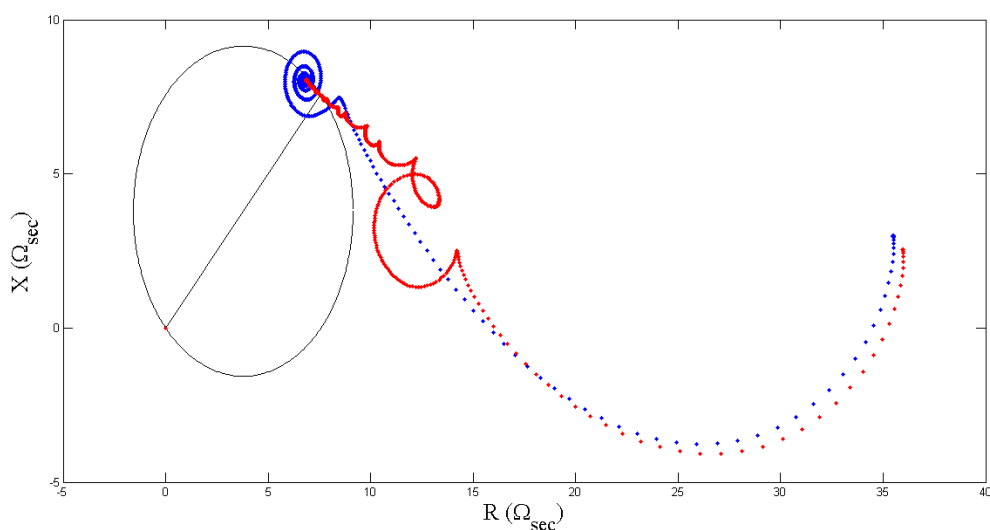
A Figura 30 demonstra o comportamento de sobrealcance encontrado em 80% LT com 80% FR no interior do TC.

Figura 29 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 5% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 30 – Sobrealcançe, para uma falta bifásica em 80% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Nos curtos bifásicos-terra, ocorreram atrasos significativos de operação causados pela saturação do TC em 5, 10, 25 e 50% da LT com 80% de FR, sendo que, o maior ocorreu em 50% da linha com 6,1 ms. Ainda, ocorreram sobrealcances em 80% da LT com FRs de 0%, 25% e 50%. Entretanto, quando o fluxo foi de 80% a saturação ajudou o relé a não atuar. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra com ângulo ajustado em 45°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2057	0,2057
5%LT_25%FR	0	0,2057	0,2057
5%LT_50%FR	0,0001	0,2057	0,2058
5%LT_80%FR	0,0007	0,2057	0,2064
10%LT_0%FR	0,0002	0,2058	0,2060
10%LT_25%FR	0,0002	0,2058	0,2060
10%LT_50%FR	0,0002	0,2058	0,2060
10%LT_80%FR	0,0009	0,2058	0,2067
25%LT_0%FR	0,0002	0,2065	0,2067
25%LT_25%FR	0,0002	0,2065	0,2067
25%LT_50%FR	0,0002	0,2065	0,2067
25%LT_80%FR	0,0017	0,2065	0,2083
50%LT_0%FR	0	0,2079	0,2079
50%LT_25%FR	0	0,2079	0,2079
50%LT_50%FR	0	0,2079	0,2079
50%LT_80%FR	0,0061	0,2079	0,2140
80%LT_0%FR	Sobrealcance	0,2165	0,2166
80%LT_25%FR	Sobrealcance	0,2165	0,2165
80%LT_50%FR	Sobrealcance	0,2165	0,2161
80%LT_80%FR	Não Atuou	0,2165	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

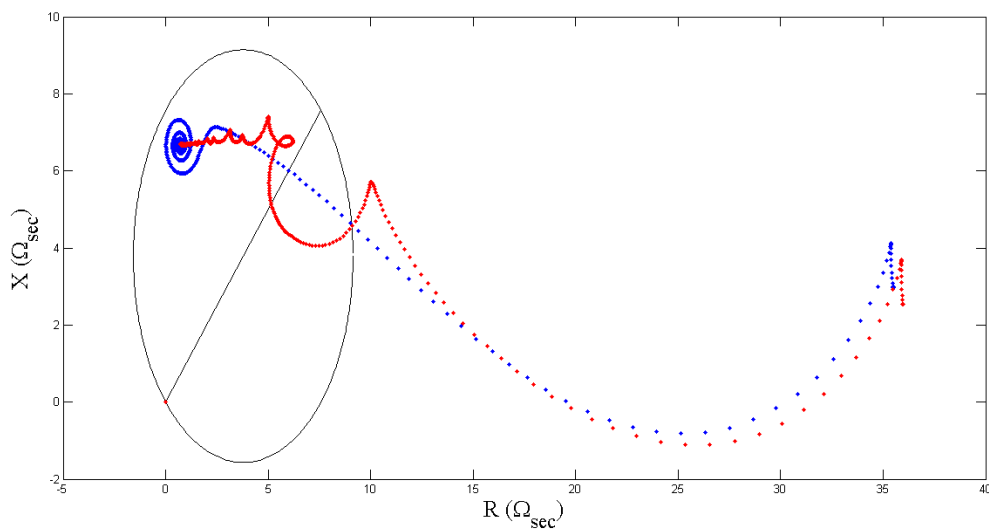
Analisando a Tabela 8, conclui-se que, em curtos-circuitos trifásicos, a saturação causou um sobrealcançe em 80% da linha com um FR de 80%, além de alguns atrasos de operação, onde o maior foi de 5,2 ms, para uma falta em 50% d LT com 80% de fluxo remanescente no núcleo do TC, como pode ser visto na Figura 31.

Tabela 8 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos com ângulo ajustado em 45°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_25%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_50%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_80%FR	0,0004	0,2058	0,2062
10%LT_0%FR	0	0,2060	0,2060
10%LT_25%FR	0	0,2060	0,2060
10%LT_50%FR	0	0,2060	0,2060
10%LT_80%FR	0,0005	0,2060	0,2065
25%LT_0%FR	0	0,2067	0,2067
25%LT_25%FR	0	0,2067	0,2067
25%LT_50%FR	0	0,2067	0,2067
25%LT_80%FR	0,0009	0,2067	0,2076
50%LT_0%FR	0	0,2081	0,2081
50%LT_25%FR	0,0002	0,2081	0,2083
50%LT_50%FR	0,0002	0,2081	0,2083
50%LT_80%FR	0,0052	0,2081	0,2133
80%LT_0%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
5%LT_0%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_25%FR	0	0,2058	0,2058
5%LT_50%FR	0	0,2058	0,2058

Fonte: Autoria Própria.

Figura 31 – Atraso de operação, para uma falta trifásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.3 Ajuste do Relé de Distância com o Ângulo de Máximo Torque em 60°

Continuando a análise dos resultados obtidos com os ângulos de máximo torque mais usados em relés de distância, o ângulo ajustado dessa vez foi de 60°. Da mesma forma que foram realizados para os dois itens anteriores, serão considerados os curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos, para todos os fluxos remanescente mencionados anteriormente.

Com o relé ajustado em 60° para faltas monofásicas um sério problema de subalcance aconteceu quando esta ocorreu em 50% da linha e com 80% de FR. Além disso, atrasos de ordem maior com esse mesmo fluxo em 5%, 10% e 25% da LT, casos de sobrealcance não foram encontrados nesse tipo de curto-circuito.

Os resultados estão expostos na Tabela 9.

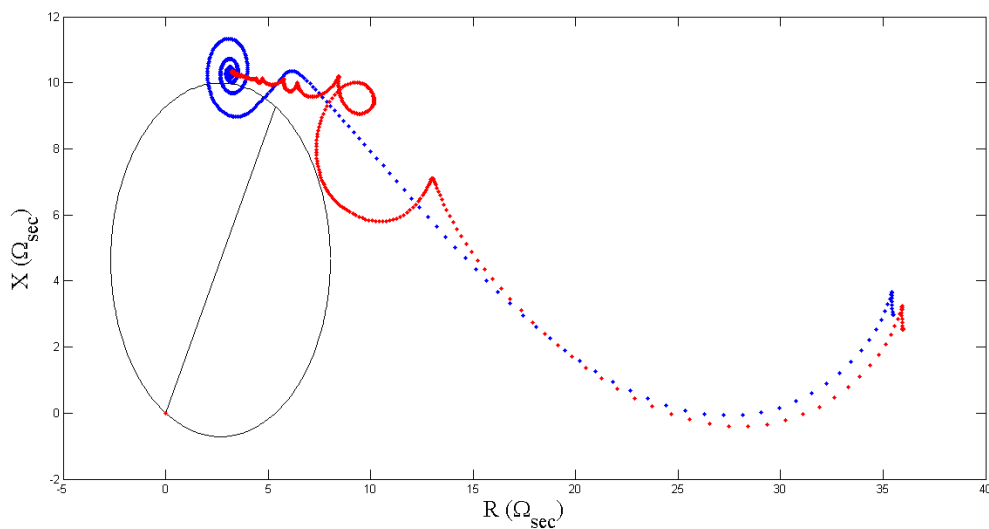
Tabela 9 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos com ângulo ajustado em 60°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0	0,2069	0,2069
5%LT_25%FR	0	0,2069	0,2069
5%LT_50%FR	0	0,2069	0,2069
5%LT_80%FR	0,0007	0,2069	0,2076
10%LT_0%FR	0	0,2072	0,2072
10%LT_25%FR	0	0,2072	0,2072
10%LT_50%FR	0	0,2072	0,2072
10%LT_80%FR	0,0014	0,2072	0,2086
25%LT_0%FR	0	0,2085	0,2085
25%LT_25%FR	0	0,2085	0,2085
25%LT_50%FR	0	0,2085	0,2085
25%LT_80%FR	0,0056	0,2085	0,2140
50%LT_0%FR	0,0002	0,2163	0,2165
50%LT_25%FR	0,0002	0,2163	0,2165
50%LT_50%FR	0	0,2163	0,2163
50%LT_80%FR	Sublance	0,2163	Não Atuou
80%LT_0%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_25%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_50%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou
80%LT_80%FR	Não Atuou	Não Atuou	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

O sublance proveniente da falta em 50% da LT e com 80% de FR pode ser facilmente visualizado na Figura 32. Lembrando que um caso de sublance pode ter efeitos devastadores, já que o relé deixa de atuar, não enviando um sinal para abertura do disjuntor, podendo assim danificar diversos equipamentos ao longo da linha e das subestações que possam ser atingidas por essa falta não vista pelo relé, dependendo da magnitude da corrente de curto-circuito.

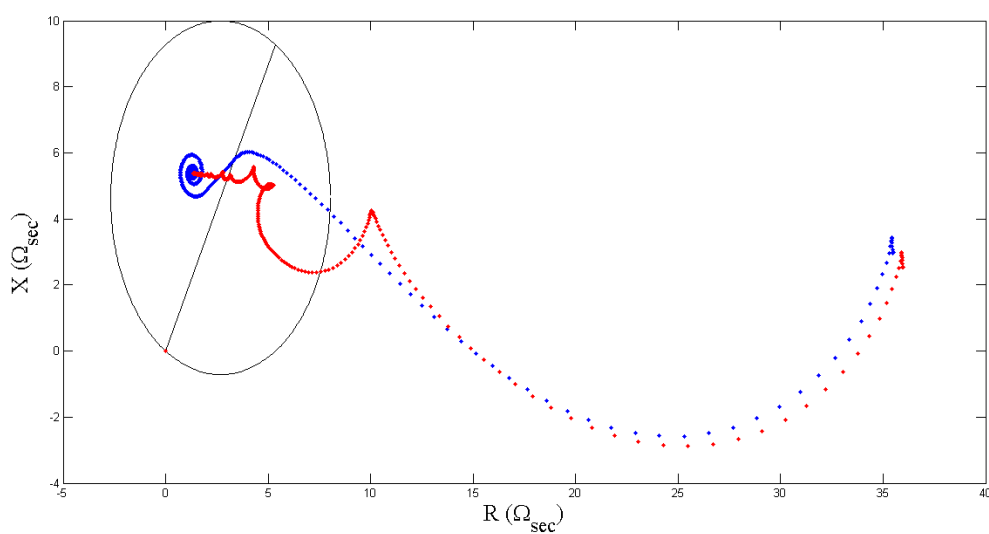
Figura 32 – Subbalcance, para uma falta monofásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

O atraso de 5,6 ms, em 25% da LT com 80% de FR pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 – Atraso de operação, para uma falta monofásica em 25% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.



Para faltas bifásicas ocorreram atrasos na maioria dos casos, mas com ênfase para cinco casos, com FR de 80% para 5, 10, 25 e 50% da linha, e 5% da LT com 50% de FR, além de sobrealcançe para todos com os casos em 80% da linha. Isso não foi verificado quando o fluxo remanescente no TC foi de 80%, onde a saturação ajudou a não atuação do relé. Esses fenômenos podem ser observados analisando a Tabela 10.

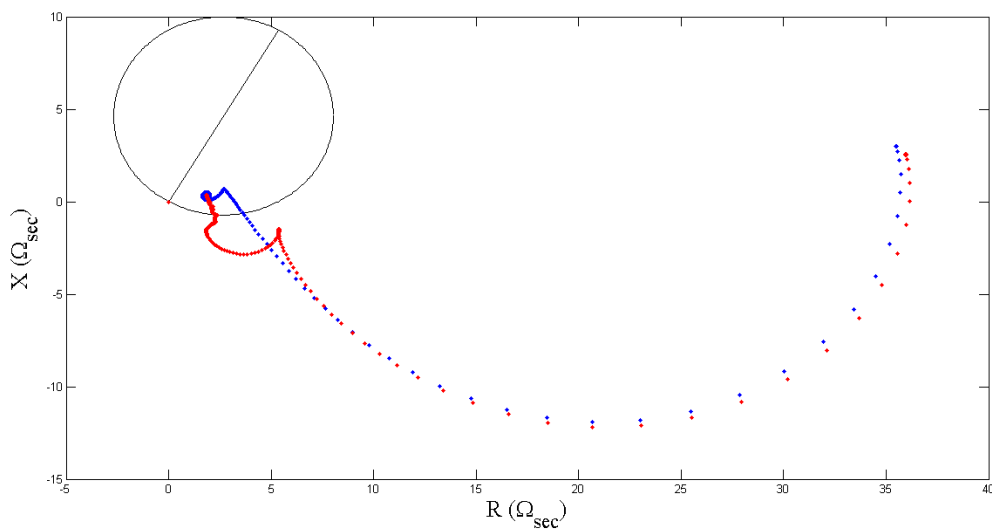
Tabela 10 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos com ângulo ajustado em 60°

Caso	Efeito/ $T_{atraso}$ [s]	$T_{ideal}$ [s]	$T_{real}$ [s]
5%LT_0%FR	0	0,2069	0,2069
5%LT_25%FR	0,0002	0,2069	0,2071
5%LT_50%FR	0,0322	0,2069	0,2391
5%LT_80%FR	0,0324	0,2069	0,2393
10%LT_0%FR	0	0,2071	0,2071
10%LT_25%FR	0	0,2071	0,2071
10%LT_50%FR	0,0012	0,2071	0,2083
10%LT_80%FR	0,0254	0,2071	0,2325
25%LT_0%FR	0,0002	0,2076	0,2078
25%LT_25%FR	0,0002	0,2076	0,2078
25%LT_50%FR	0,0007	0,2076	0,2083
25%LT_80%FR	0,0110	0,2076	0,2185
50%LT_0%FR	0,0002	0,2091	0,2093
50%LT_25%FR	0,0002	0,2091	0,2093
50%LT_50%FR	0,0006	0,2091	0,2097
50%LT_80%FR	0,0322	0,2091	0,2413
80%LT_0%FR	Sobrealcançe	0,2159	0,2161
80%LT_25%FR	Sobrealcançe	0,2159	0,2161
80%LT_50%FR	Sobrealcançe	0,2159	0,2163
80%LT_80%FR	Não Atuou	0,2159	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

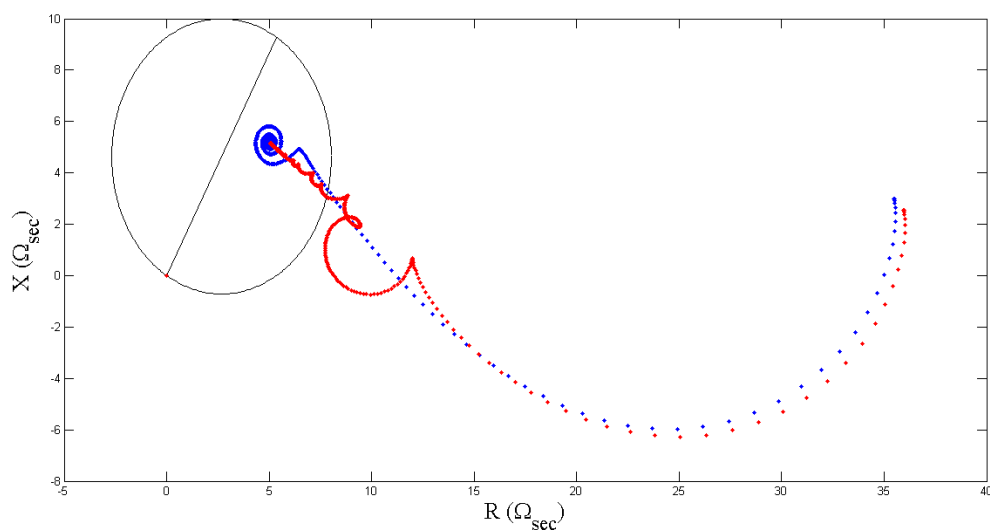
As Figuras 34 e 35 mostram o comportamento do relé frente a impedância vista pelo relé quando a falta foi em 5% e 50% da linha com 80% de FR, exemplificando dois casos de atraso relevante de operação deste tipo de falta, sendo estes tempos equivalentes a 32,4 ms e 32,2 ms, respectivamente.

Figura 34 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 5% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 35 – Atraso de operação, para uma falta bifásica em 50% da linha e com fluxo remanescente no interior do TC de 80% (sinal ideal de impedância processado (azul) e sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Analisando os dados contidos na Tabela 11 para faltas bifásicas-terra, o relé ajustado em  $60^\circ$  teve em parte um bom desempenho, excluindo-se os casos de atraso e sobrealcançe, que podem ser visualizados logo a seguir.

Tabela 11 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra com ângulo ajustado em  $60^\circ$

Caso	Efeito/ $T_{\text{atraso}}$ [s]	$T_{\text{ideal}}$ [s]	$T_{\text{real}}$ [s]
5%LT_0%FR	0	0,2064	0,2064
5%LT_25%FR	0	0,2064	0,2064
5%LT_50%FR	0,0001	0,2064	0,2065
5%LT_80%FR	0,0010	0,2064	0,2074
10%LT_0%FR	0	0,2065	0,2065
10%LT_25%FR	0	0,2065	0,2065
10%LT_50%FR	0,0002	0,2065	0,2067
10%LT_80%FR	0,0014	0,2065	0,2079
25%LT_0%FR	0	0,2072	0,2072
25%LT_25%FR	0	0,2072	0,2072
25%LT_50%FR	0	0,2072	0,2072
25%LT_80%FR	0,0063	0,2072	0,2137
50%LT_0%FR	0	0,2086	0,2086
50%LT_25%FR	0	0,2086	0,2086
50%LT_50%FR	0,0002	0,2086	0,2088
50%LT_80%FR	0,0070	0,2086	0,2156
80%LT_0%FR	Sobrealcançe	0,2158	0,2159
80%LT_25%FR	Sobrealcançe	0,2158	0,2159
80%LT_50%FR	Sobrealcançe	0,2158	0,2158
80%LT_80%FR	Não Atuou	0,2158	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

Em curtos trifásicos os comportamentos foram semelhantes aos vistos anteriormente para as faltas bifásicas-terra, com alguns atrasos e sobrealcançes percebidos. Esses comportamentos estão expostos na Tabela 12 para averiguação.

Tabela 12 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos com ângulo ajustado em 60°

Caso	Efeito/T <sub>atraso</sub> [s]	T <sub>ideal</sub> [s]	T <sub>real</sub> [s]
5%LT_0%FR	0,0002	0,2062	0,2064
5%LT_25%FR	0,0002	0,2062	0,2064
5%LT_50%FR	0,0002	0,2062	0,2064
5%LT_80%FR	0,0007	0,2062	0,2069
10%LT_0%FR	0	0,2065	0,2065
10%LT_25%FR	0	0,2065	0,2065
10%LT_50%FR	0	0,2065	0,2065
10%LT_80%FR	0,0007	0,2065	0,2072
25%LT_0%FR	0	0,2072	0,2072
25%LT_25%FR	0	0,2072	0,2072
25%LT_50%FR	0	0,2072	0,2072
25%LT_80%FR	0,0016	0,2072	0,2088
50%LT_0%FR	0	0,2086	0,2086
50%LT_25%FR	0	0,2086	0,2086
50%LT_50%FR	0	0,2086	0,2086
50%LT_80%FR	0,0057	0,2086	0,2144
80%LT_0%FR	Sobrealcance	0,2177	0,2177
80%LT_25%FR	Sobrealcance	0,2177	0,2177
80%LT_50%FR	Sobrealcance	0,2177	0,2172
80%LT_80%FR	Não Atuou	0,2177	Não Atuou

Fonte: Autoria Própria.

### 3.4 Desenvolvimento da Técnica de Ajuste Adaptativo

Verificados os problemas de subalcance, sobrealcance ou atraso de operação dos relés de distância, conclui-se que o ângulo de ajuste do relé para suprir todos problemas causados pela saturação não poderia ser um valor fixo. Esse valor deve ser ajustado automaticamente de acordo com a severidade da saturação.

Sendo assim, deve-se detectar o instante em que a saturação do TC começa distorcer a forma de onda da corrente. Para tal, a metodologia proposta utiliza o cálculo da terceira derivada dos valores de impedância vistos pelo relé conforme as Equações (10) e (11). Nestas equações, são obtidos, respectivamente, os valores da parte real e da parte imaginária da impedância vista pelo relé.

$$R_{est}(n) = 4 \cdot R(n - 1) - 6 \cdot R(n - 2) + 4 \cdot R(n - 3) - R(n - 4) \quad (10)$$

$$X_{est}(n) = 4 \cdot X(n - 1) - 6 \cdot X(n - 2) + 4 \cdot X(n - 3) - X(n - 4) \quad (11)$$

Nas Equações (10) e (11),  $n$  representa um ponto futuro de impedância estimado a partir das terceiras derivadas de cada coordenada no plano R-X, a impedância vista pelo relé de acordo com as amostras de tensão e corrente é comparada com o valor estimado através da distância euclidiana entre estes pontos Equação (12).

$$dist(n) = \sqrt{(R_{visto}(n) - R_{est}(n))^2 + (X_{visto}(n) - X_{est}(n))^2} \quad (12)$$

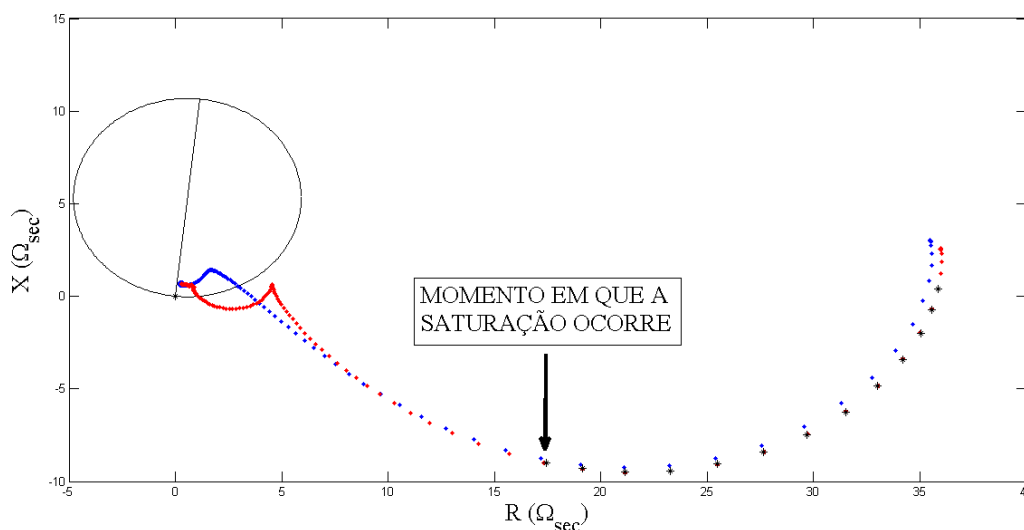
Uma vez que o TC não esteja saturado, o valor da distância entre a impedância vista pelo relé e a estimativa, feita através da terceira derivada deve ter um valor próximo de zero. Quando a impedância vista pelo relé é obtida a partir de um dado de corrente distorcido por saturação, essa distância apresenta um incremento considerável.

No algoritmo proposto, a detecção da saturação ocorre quando o valor de distância excede o valor limite dado pela Equação (13).

$$det_{sat}(n) = dist(n - 1) + 2 \cdot dist(n - 1) \quad (13)$$

Depois de estruturar o método de detecção da saturação no algoritmo que simula o funcionamento de um relé distância, foram simulados todos os casos de curtos-circuitos mencionados em 3.1. Assim, verificou-se que a metodologia detecta o exato momento em que ocorre a saturação do TC e, por consequência, o momento preciso em que há distorção do sinal de impedância vista pelo relé para todos os casos simulados. Este momento pode ser visto na Figura 36, onde o último ponto em preto indica até onde o sinal é confiável, ou seja, a partir dele o sinal sofre influência da saturação. Analisando os tempos em que acontece a distorção da impedância em relação ao um sinal ideal, montou-se uma lógica para o ajuste adaptativo do ângulo de máximo torque ideal para cada caso estudado.

Figura 36 – Momento exato em que acontece a saturação, (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

Pela Figura 36, nota-se que, a partir do instante em que ocorre saturação do TC, a impedância vista pelo relé é desviada da trajetória desenvolvida pelos pontos ideais de impedância. Isso provoca um atraso na operação do relé, pois a impedância aparente vista por este dispositivo entrará na zona de atuação após aqueles considerados como ideais para operação do relé.

Os curtos-circuitos nas simulações no software EMTP-ATP® aconteceram em 0,2 s. Antes da ocorrência do curto-circuito, o valor de impedância obtido através dos dados de tensão e de corrente é bem superior ao valor da impedância de ajuste do relé de distância no plano R-X, ou seja, a impedância encontra-se no lugar geométrico das cargas, longe da área de operação do relé.

Como parâmetro para determinar as faixas de tempo da saturação em que os ângulos deveriam ser modificados, se subdividiu um ciclo em várias partes. Sabendo que o período de um ciclo tem 16,6667 ms, a melhor forma de ajuste encontrada empiricamente através dos estudos preliminares foram as seguintes:

$$Instante_{saturação} < \frac{5}{32} \cdot 16,6667 \text{ ms} \rightarrow \hat{Angulo}_{Ajuste} = 89,96^{\circ}$$

$$\frac{5}{32} \cdot 16,6667 \text{ ms} \leq Instante_{saturação} \leq \frac{3}{8} \cdot 16,6667 \text{ ms} \rightarrow \hat{Angulo}_{Ajuste} = 30^{\circ}$$

$$\frac{3}{8} \cdot 16,6667 \text{ ms} < \text{Instante}_{\text{Saturação}} \leq \frac{9}{16} \cdot 16,6667 \text{ ms} \rightarrow \hat{\text{Angulo}}_{\text{Ajuste}} = 60^\circ$$

$$\frac{9}{16} \cdot 16,6667 \text{ ms} < \text{Instante}_{\text{Saturação}} < \frac{7}{8} \cdot 16,6667 \text{ ms} \rightarrow \hat{\text{Angulo}}_{\text{Ajuste}} = 89,96^\circ$$

$$\frac{7}{8} \cdot 16,6667 \text{ ms} \leq \text{Instante}_{\text{Saturação}} \leq \frac{15}{16} \cdot 16,6667 \text{ ms} \rightarrow \hat{\text{Angulo}}_{\text{Ajuste}} = 30^\circ$$

$$\text{Instante}_{\text{Saturação}} > \frac{15}{16} \cdot 16,6667 \text{ ms} \rightarrow \hat{\text{Angulo}}_{\text{Ajuste}} = 89,96^\circ$$

Assim quando a saturação encontra-se dentro de uma dessas faixas de tempo, ajusta-se automaticamente o ângulo de máximo torque do relé para um dos ângulos acima citados.

### 3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada toda metodologia envolvida no desenvolvimento da técnica proposta neste trabalho. Foram apresentados o sistema teste usado para simular os curtos-circuitos, as simulações para verificar o comportamento do relé de distância mediante aos ângulos usualmente ajustados para estes relés e a lógica do processo de ajuste adaptativo.

Vários casos foram apresentados, onde o nível de saturação foi variado, em função dos diferentes níveis de fluxo remanescente no núcleo do TC e da distância até ponto de falta. Ângulos diferentes de ajuste do relé de distância foram testados nas análises, onde foi constatado que nenhum dos ângulos testados atendeu a todos os casos de forma satisfatória.

Pode-se assim concluir que a saturação causa sérios problemas na atuação da proteção, como grandes atrasos na operação do relé de distância, ou, até mesmo, situações de sub ou sobrealcance da primeira zona de atuação deste equipamento. (CRUZ, 2013) já tinha demonstrado que tais problemas podem provocar desligamentos desnecessários de outras linhas de transmissão, o que caracteriza não atuação seletiva da proteção, prejudicando a operação do sistema elétrico de potência e reduzindo sua confiabilidade.

Com base nos resultados obtidos, criou-se uma técnica de ajuste adaptativo para os relés 21 sob condição de saturação do transformador de corrente, na qual identifica o momento em que se inicia essa saturação e a partir dessa informação, ajusta automaticamente o ângulo de máximo torque do relé, para melhor atender qualquer tipo de falta, eliminando os problemas causados pela saturação.

Por fim, a eficácia da técnica descrita anteriormente, poderá ser comprovada na análise dos resultados do próximo capítulo, demonstrando desta forma que ela pode ser aplicada para melhorar o desempenho dos relés de distância sob condição de saturação dos transformadores de corrente.



## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos utilizando a técnica de ajuste adaptativo sob condição da saturação do TC proposta neste trabalho, que através da detecção do momento em que esta ocorre, muda automaticamente o ângulo de ajuste com o intuito de eliminar os efeitos de atraso de operação, subalcances ou sobrealcances decorrentes desta saturação.

### 4.1 Validação da Técnica de Ajuste Adaptativo Proposta

Com a análise dos resultados do estudo preliminar da seção 3.3, observou-se que:

- Com ângulo de máximo torque ajustado em 30°, o comportamento foi satisfatório na maioria dos casos estudados, com atrasos de certa forma aceitáveis e sobrealcances no limiar de operação, mas nos curtos monofásicos em 50% da LT, encontrou-se o maior problema, onde houveram subalcances e um atraso significativo.
- Mudando o ângulo para 45°, os maiores problemas ficaram por conta dos curtos-circuitos bifásicos, por conta de seus atrasos mais significativos e sobrealcances no limiar de operação tanto nas faltas bifásicas quanto nas bifásicas-terra, para monofásicas e trifásicas o desempenho foi bem melhor com somente um caso de sobrealcance.
- Em 60° a saturação causou um significativo problema de subalcance nos curtos-circuitos monofásicos, atrasos de operação inaceitáveis nos bifásicos, e sobrealcance em 80% da linha para a maioria dos curtos com exceção do monofásico.

Diante disso, conclui-se que o ângulo de ajuste do relé de distância para suprir todas as formas de curtos-circuitos não poderia ser fixo e, sim ajustar-se automaticamente para o melhor ângulo assim que a falta acontecesse. Para tal, desenvolveu-se a técnica descrita na seção 3.5, que detecta a saturação através do método da terceira derivada, e a partir do momento em que a saturação acontece ajusta automaticamente o ângulo de máximo torque do relé de distância, reparando problemas de atraso de operação, subalcances e sobrealcances decorrentes desta saturação.

Como em relés digitais usualmente utiliza-se o ângulo da própria linha para ajustar o ângulo de máximo torque do relé, neste estudo o ângulo inicialmente ajustado foi de 89,96°, que corresponde ao ângulo da linha. Depois de detectada a saturação, o relé teve seu ângulo

ajustado automaticamente para 30° e 60° ou ainda se manteve em 89,96°, esses novos ângulos dependem diretamente do tempo em que se detectou a saturação.

Os resultados obtidos com esses novos ajustes nos curtos-circuitos já mencionados podem ser verificados de forma expositiva nas Tabelas, Figuras e comentários a seguir:

A Tabela 13 apresenta todos resultados encontrados nas simulações para um curto-circuito monofásico, na primeira coluna encontram-se os casos simulados, na segunda os efeitos ou atrasos causados pela saturação (Efeito/ $T_{\text{atraso}}$ ), na coluna três os tempos em que se inicia a saturação ( $T_{\text{sat}}$ ) e dá início a distorção do sinal real, na quarta o tempo que o relé atuaria com um sinal de impedância ideal ( $T_{\text{ideal}}$ ) sem sofrer qualquer efeito relacionado à saturação, a quinta coluna trás os tempos em que o relé atuou com o sinal real ( $T_{\text{real}}$ ), a coluna seis mostra os tempos que o relé atuou após o ajuste ( $T_{\text{ajuste}}$ ) para um novo ângulo de máximo torque e finalmente na coluna sete estão contidos os novos ângulos ( $r_{\text{ajuste}}$ ).

Tabela 13 – Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos

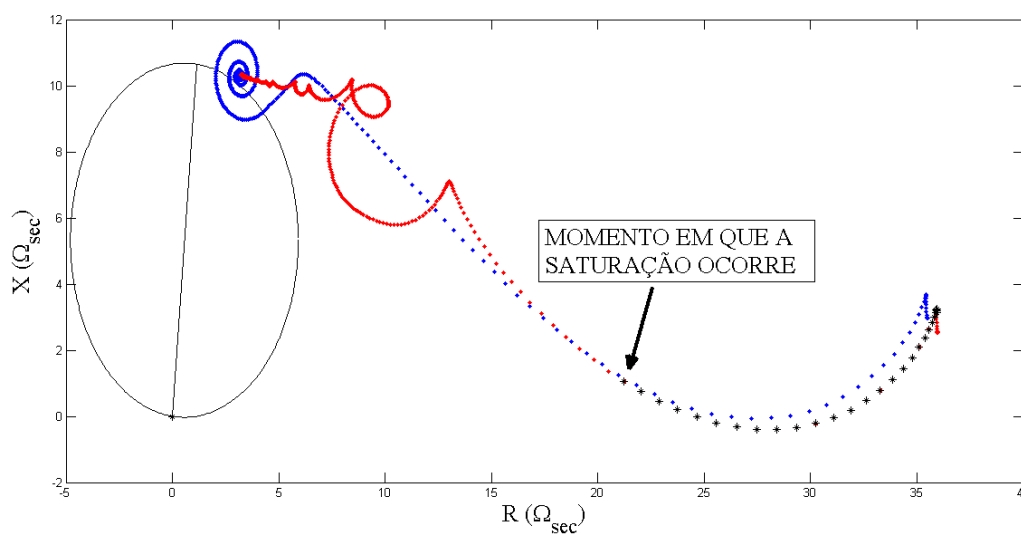
Caso	Efeito/ $T_{\text{atraso}}$ [s]	$T_{\text{sat}}$ [s]	$T_{\text{ideal}}$ [s]	$T_{\text{real}}$ [s]	$T_{\text{ajuste}}$	$r_{\text{ajuste}}$
5%LT_0%FR	0	0,2098	0,2078	0,2078	0,2078	83,96°
5%LT_25%FR	0	0,2088	0,2078	0,2078	0,2078	83,96°
5%LT_50%FR	0,0003	0,2071	0,2078	0,2081	0,2069	60°
5%LT_80%FR	0,0071	0,2043	0,2078	0,2149	0,2062	30°
10%LT_0%FR	0	0,2163	0,2083	0,2083	0,2083	83,96°
10%LT_25%FR	0	0,2088	0,2083	0,2083	0,2083	83,96°
10%LT_50%FR	0,0002	0,2078	0,2083	0,2083	0,2072	60°
10%LT_80%FR	0,0066	0,2044	0,2083	0,2149	0,2067	30°
25%LT_0%FR	0	0,2111	0,2100	0,2100	0,2100	83,96°
25%LT_25%FR	0	0,2168	0,2100	0,2100	0,2100	83,96°
25%LT_50%FR	0,0002	0,2086	0,2100	0,2102	0,2085	60°
25%LT_80%FR	0,0066	0,2050	0,2100	0,2166	0,2112	30°
50%LT_0%FR	0,0002	0,2109	0,2173	0,2175	0,2175	83,96°
50%LT_25%FR	0,0002	0,2168	0,2173	0,2175	0,2175	83,96°
50%LT_50%FR	0,0002	0,2137	0,2173	0,2175	0,2175	83,96°
50%LT_80%FR	Subalcançe	0,2058	0,2173	Não Atua	0,2170	30°
80%LT_0%FR		0,2109	Não Atua	Não Atua	Não Atua	83,96°
80%LT_25%FR		0,2091	Não Atua	Não Atua	Não Atua	60°
80%LT_50%FR		0,2088	Não Atua	Não Atua	Não Atua	60°
80%LT_80%FR		0,2065	Não Atua	Não Atua	Não Atua	60°

Fonte: Autoria Própria.

Analisando os dados da Tabela 13 observa-se que todos os atrasos significativos foram reduzidos, ou até mesmo teve-se um adiantamento na operação do relé em relação ao sinal ideal com os novos ajustes realizados pelo algoritmo proposto, o subbalcance ocorrido em 50% da linha com 80% de FR foi eliminado com o novo ângulo de ajuste. Assim, a técnica de ajuste proposta neste trabalho se mostrou muito eficaz para todos os curtos-circuitos monofásicos.

Na Figura 37 pode-se observar através do sinal em vermelho o subbalcance causado pela saturação, do caso acima citado, e analisando o sinal em preto o momento exato em que se inicia a saturação, pois esse momento indica o último ponto “saudável” do sinal real, ou seja, o sinal é confiável somente até esse ponto, a partir dele a saturação o torna inexato, ou de difícil estimativa.

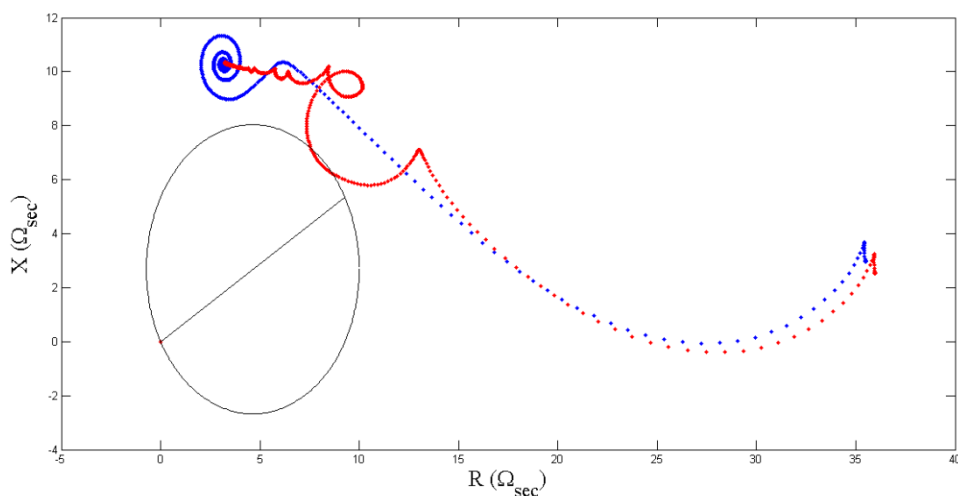
Figura 37 – Subbalcance, (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

O comportamento do relé 21, depois do ajuste, pode ser visualizado na Figura 38, onde se percebe claramente que o ângulo de máximo torque mudou automaticamente de  $89,96^\circ$  para  $30^\circ$  fazendo com que o sinal em vermelho esteja dentro da área de atuação do relé.

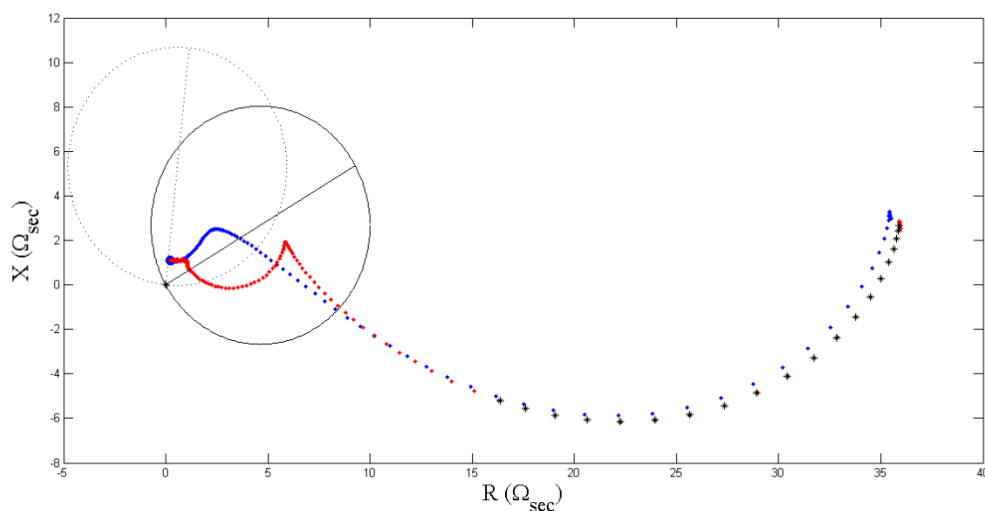
Figura 38 – Relé ajustado com o novo ângulo (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho)).



Fonte: Autoria Própria.

Quando a falta monofásica acontece em 5% da LT com 80% de fluxo remanescente no interior do TC, o atraso de operação antes do ajuste foi de 7,1 ms. Este atraso pode ser facilmente visualizado na Figura 39 comparando quando os sinais azul (ideal) e vermelho (real). Pode-se perceber que ambos entram na área de operação do relé pontilhado com ângulo de 89,96°. Analisando a mesma figura, nota-se que o atraso foi totalmente extinguido com o ângulo do relé ajustado em 30°.

Figura 39 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

Depois do ajuste os sinais entram praticamente ao mesmo tempo na área do relé ajustado em 30°. Assim, comparando o sinal azul quando entra na área do relé ajustado em 89,96° e o vermelho quando entra na área do relé ajustado em 30°, tem-se um tempo ideal de atuação de 0,2078 segundos e um tempo real de atuação de 0,2062 segundos, indicando que depois do ajuste. Além de eliminar o atraso causado pela saturação, o relé melhorou seu desempenho em 0,14 ms.

Os resultados obtidos nos curtos-circuitos bifásicos estão todos expostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos

Caso	Efeito/ $T_{\text{atraso}}$ [s]	$T_{\text{sat}}$ [s]	$T_{\text{ideal}}$ [s]	$T_{\text{real}}$ [s]	$T_{\text{ajuste}}$ [s]	$r_{\text{ajuste}}$
5%LT_0%FR	0,0828	0,2072	0,2090	0,2918	0,2069	60°
5%LT_25%FR	0,0828	0,2062	0,2090	0,2918	0,2053	30°
5%LT_50%FR	0,0828	0,2050	0,2090	0,2918	0,2055	30°
5%LT_80%FR	0,0828	0,2034	0,2090	0,2918	0,2064	30°
10%LT_0%FR	0,0094	0,2081	0,2091	0,2185	0,2071	60°
10%LT_25%FR	0,0505	0,2067	0,2091	0,2596	0,2071	60°
10%LT_50%FR	0,0505	0,2149	0,2091	0,2596	0,2057	30°
10%LT_80%FR	0,0505	0,2036	0,2091	0,2596	0,2065	30°
25%LT_0%FR	0	0,2102	0,2100	0,2100	0,2100	83,96°
25%LT_25%FR	0	0,2102	0,2100	0,2100	0,2100	83,96°
25%LT_50%FR	0,0470	0,2065	0,2100	0,2570	0,2083	60°
25%LT_80%FR	0,0470	0,2036	0,2100	0,2570	0,2123	30°
50%LT_0%FR	0,0002	0,2168	0,2149	0,2151	0,2151	83,96°
50%LT_25%FR	0,0003	0,2168	0,2149	0,2152	0,2152	83,96°
50%LT_50%FR	0,0035	0,2086	0,2149	0,2184	0,2097	60°
50%LT_80%FR	0,0618	0,2041	0,2149	0,2767	0,2140	30°
80%LT_0%FR		0,2137	Não Atua	Não Atua	Não Atua	83,96°
80%LT_25%FR		0,2131	Não Atua	Não Atua	Não Atua	83,96°
80%LT_50%FR		0,2095	Não Atua	Não Atua	Não Atua	83,96°
80%LT_80%FR		0,2020	Não Atua	Não Atua	Não Atua	83,96°

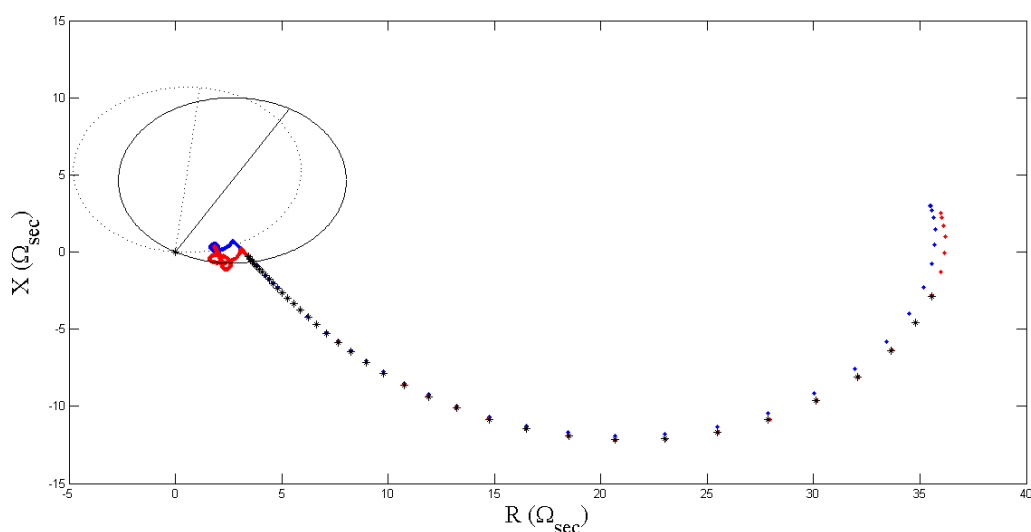
Fonte: Autoria Própria.

Neste tipo de falta, ocorreram na maioria dos casos estudados problemas de atrasos bem significativos decorrentes da saturação do transformador de corrente, mesmo quando o fluxo remanescente em seu interior era baixo, esses atrasos foram todos corrigidos ou minimi-

zados depois do novo ajuste. Como aconteceu em curtos-circuitos monofásicos, nos bifásicos a técnica de ajuste adaptativa corrigiu todos os problemas causados pela saturação do TC.

No atraso de 82,8 ms quando a falta bifásica acontece em 5% da LT com 0% de FR, observa-se na Figura 40 que a saturação acontece bem próxima da área de operação do relé pontilhado. Mesmo assim, o atraso em função dela é muito grande. Isso ocorre porque o ângulo da linha para este ajuste é muito alto. Assim, levando em conta que a falta ocorre em 0,2 segundos e a saturação ocorreu em 0,2062 segundos, dentro do limite de 3/8 e 9/16 de um ciclo, o novo ângulo foi ajustado automaticamente para 60°. Dessa forma, em vez do relé atuar em 0,2090 segundos, atuou em 0,2052 segundos,

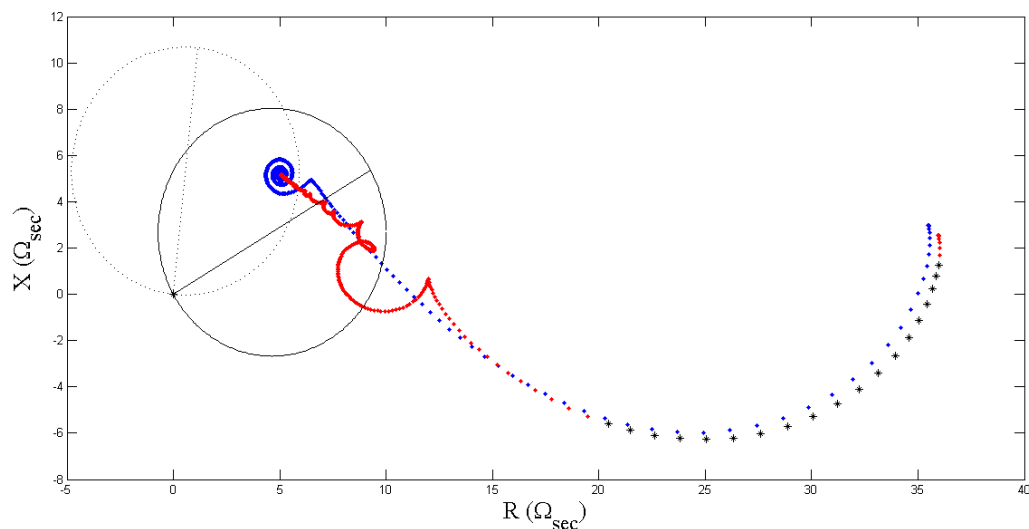
Figura 40 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 41 mostra o caso mais severo de atraso encontrado em curtos-circuitos bifásicos ocorrido em 50% da linha e com fluxo remanescente de 80. Neste caso, o atraso que era de 61,8 ms foi totalmente eliminado com o novo ângulo de ajuste em 30°. Sendo assim, o relé que deveria atuar em 0,2149 segundos com um sinal de impedância ideal, acabou atuando em 0,2140 segundos com o sinal real distorcido pela saturação.

Figura 41 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

Para faltas bifásicas-terra, apesar do comportamento bastante similar com as bifásicas onde ocorreram vários atrasos de operação, notou-se casos de sobrealcance no limiar de operação quando o fluxo remanescente foi de 0%, 25% e 50% no interior do TC. A técnica de ajuste corrigiu ou reduziu todos os casos de atraso de operação mas não foi capaz de eliminar os sobrealcances encontrados nos três casos mencionados, mesmo mudando o ângulo de ajuste para  $60^\circ$  no curto em 80% da LT e 50% de FR. Nos outros dois casos, o momento em que acontece a saturação é muito próximo da área de atuação do relé, assim o ângulo não sofreu alteração pela técnica de ajuste adaptativo.

Apesar da técnica proposta não ter corrigido esses problemas de sobrealcance, analisando a Tabela 15, nota-se que o sinal tido como ideal também acabou entrando na área de atuação do relé. Pode-se concluir então que este fenômeno não está ligado com o problema da saturação do transformador de corrente e, possivelmente, este sobrealcance decorra da impedância de ajuste. Isso pode ser analisado em um trabalho futuro. Entretanto, vale ressaltar que, para proteção de uma LT se tem um relé 21 em cada extremidade da linha. Então, para faltas em 80% da linha, o relé da barra jusante deve atuar primeiro. Ainda, vale ressaltar que, quando o curto-circuito ocorre em 80% da linha com 80% de FR, a saturação tem um efeito benéfico, fazendo com que o relé deixe de operar com o sinal distorcido pela saturação.

Todos casos para faltas bifásicas-terra com seus respectivos resultados podem ser consultados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra

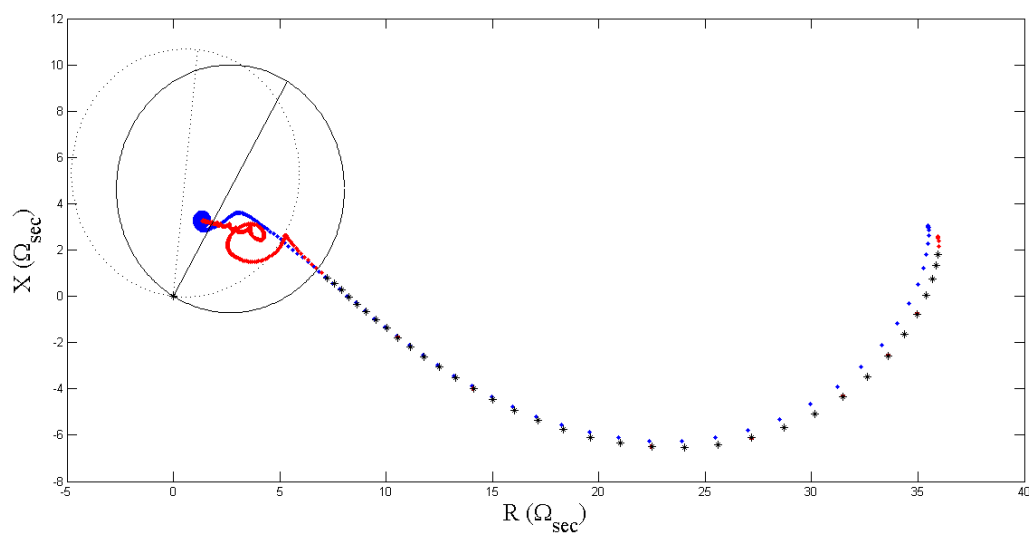
Caso	Efeito/ $T_{\text{atraso}}$ [s]	$T_{\text{sat}}$ [s]	$T_{\text{ideal}}$ [s]	$T_{\text{real}}$ [s]	$T_{\text{ajuste}}$ [s]	$r_{\text{ajuste}}$
5%LT_0%FR	0	0,2076	0,2074	0,2074	0,2074	83,96°
5%LT_25%FR	0,0004	0,2065	0,2074	0,2078	0,2064	60°
5%LT_50%FR	0,0012	0,2051	0,2074	0,2086	0,2051	30°
5%LT_80%FR	0,0080	0,2031	0,2074	0,2154	0,2057	30°
10%LT_0%FR	0	0,2085	0,2078	0,2078	0,2078	83,96°
10%LT_25%FR	0	0,2071	0,2078	0,2078	0,2065	60°
10%LT_50%FR	0,0012	0,2057	0,2078	0,2090	0,2055	30°
10%LT_80%FR	0,0077	0,2039	0,2078	0,2154	0,2060	30°
25%LT_0%FR	0	0,2095	0,2085	0,2085	0,2085	83,96°
25%LT_25%FR	0,0001	0,2079	0,2085	0,2086	0,2072	60°
25%LT_50%FR	0,0047	0,2069	0,2085	0,2131	0,2072	60°
25%LT_80%FR	0,0082	0,2039	0,2085	0,2166	0,2071	30°
50%LT_0%FR	0	0,2168	0,2105	0,2105	0,2105	83,96°
50%LT_25%FR	0	0,2168	0,2105	0,2105	0,2105	83,96°
50%LT_50%FR	0,0028	0,2079	0,2105	0,2133	0,2088	60°
50%LT_80%FR	0,0315	0,2044	0,2105	0,2420	0,2128	30°
80%LT_0%FR	Sobrealcance	0,2111	0,2177	0,2177	0,2177	83,96°
80%LT_25%FR	Sobrealcance	0,2137	0,2177	0,2177	0,2177	83,96°
80%LT_50%FR	Sobrealcance	0,2091	0,2177	0,2178	0,2158	60°
80%LT_80%FR	Sobrealcance	0,2024	0,2177	Não atua	Não Atua	83,96°

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras que seguem mostram dois casos de atraso de operação em curtos-circuitos bifásicos-terra, com seus respectivos ângulos antes de depois do ajuste. Na Figura 42, quando a falta ocorre em 25% da linha e 50% de FR, observa-se que o atraso foi totalmente eliminado. Já na Figura 43 em 50% da LT com 80% de FR, o atraso diminuiu de 31,5 ms para 2,3 ms.

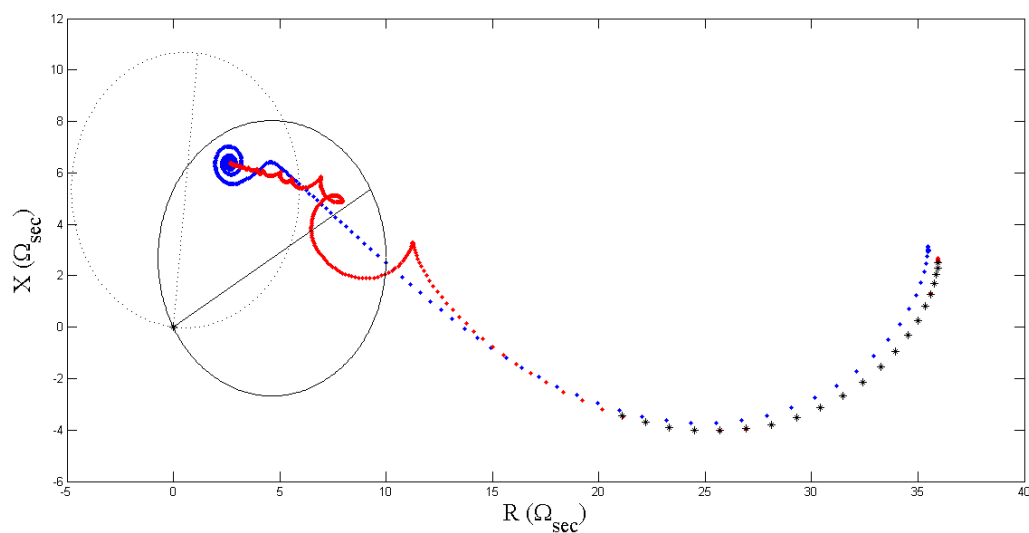


Figura 42 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 43 – Comportamento do relé de distância antes e depois do ajuste (sinal ideal de impedância processado (azul), sinal distorcido pela saturação (vermelho) e sinal sem distorção (preto)).



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, nos curtos-circuitos trifásicos, através da análise dos resultados contidos na Tabela 16, observam-se atrasos de operação, que foram todos corrigidos ou minimizados, além de sobrealcances, que da mesma forma que nos curtos bifásicos-terra, não foram corri-

dos. Lembrando que isso não é um problema, pois o relé da barra jusante deve atuar corretamente, caso não ocorra a saturação do respectivo TC.

Tabela 16 – Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos

Caso	Efeito/ $T_{\text{atraso}}$ [s]	$T_{\text{sat}}$ [s]	$T_{\text{ideal}}$ [s]	$T_{\text{real}}$ [s]	$T_{\text{ajuste}}$ [s]	$r_{\text{ajuste}}$
5%LT_0%FR	0	0,2079	0,2072	0,2072	0,2072	83,96°
5%LT_25%FR	0	0,2069	0,2072	0,2072	0,2064	60°
5%LT_50%FR	0,0004	0,2058	0,2072	0,2076	0,2053	30°
5%LT_80%FR	0,0016	0,2038	0,2072	0,2088	0,2057	30°
10%LT_0%FR	0	0,2086	0,2074	0,2074	0,2074	83,96°
10%LT_25%FR	0,0002	0,2076	0,2074	0,2076	0,2076	83,96°
10%LT_50%FR	0,0005	0,2062	0,2074	0,2079	0,2057	30°
10%LT_80%FR	0,0068	0,2039	0,2074	0,2142	0,2058	30°
25%LT_0%FR	0	0,2098	0,2083	0,2083	0,2083	83,96°
25%LT_25%FR	0	0,2085	0,2083	0,2083	0,2083	83,96°
25%LT_50%FR	0,0003	0,2074	0,2083	0,2086	0,2072	60°
25%LT_80%FR	0,0066	0,2046	0,2083	0,2149	0,2069	30°
50%LT_0%FR	0	0,2111	0,2098	0,2098	0,2098	83,96°
50%LT_25%FR	0	0,2100	0,2098	0,2098	0,2098	83,96°
50%LT_50%FR	0,0002	0,2093	0,2098	0,2100	0,2086	60°
50%LT_80%FR	0,0075	0,2051	0,2098	0,2173	0,2126	30°
80%LT_0%FR	Sobrealcance	0,2111	0,2168	0,2170	0,2170	83,96°
80%LT_25%FR	Sobrealcance	0,2145	0,2168	0,2170	0,2170	83,96°
80%LT_50%FR	Sobrealcance	0,2107	0,2168	0,2170	0,2170	83,96°
80%LT_80%FR	Sobrealcance	0,2062	0,2168	Não atua	Não Atua	30°

Fonte: Autoria Própria.

## 4.2 Considerações Finais da Pesquisa

Analisando os resultados expostos neste capítulo, comprovou-se que a técnica de ajuste adaptável corrigiu todos os problemas causados pela saturação do transformador de corrente em curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos, em todos pontos da linha, para diferentes níveis de fluxo remanescente no núcleo dos TCs, analisados para este estudo.

Os atrasos de operação decorrentes da saturação, que poderiam fazer com que a proteção temporizada atuasse, foram todos eliminados ou minimizados através da técnica. Não

foram verificados problemas de subalcance depois do novo ângulo ser ajustado, garantindo desta forma a seletividade da proteção.

Levando em consideração o limiar de operação de 80% a 85% da LT, região onde o relé pode ou não atuar na região instantânea, que no caso do estudo é para curtos-circuitos em 80% da linha de transmissão, os sobrealcances ocorridos neste ponto da linha não constituem um problema, visto que a proteção da barra jusante deve atuar primeiro. Mesmo assim, a técnica de ajuste adaptativo eliminou alguns desses sobrealcances.

Conclui-se assim, que a técnica desenvolvida neste trabalho, a qual eliminou qualquer problema causado pela saturação do transformador de corrente, o que poderia interferir na correta operação dos relés de distância na proteção em linhas de transmissão, se mostrou eficaz e garantiu a operação correta em todos os casos analisados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de tornar os sistemas elétricos de potência mais robustos e confiáveis frente a curtos-circuitos ocorridos em suas linhas de transmissão, através de um sistema de proteção eficiente e eficaz, buscam-se incansavelmente formas de corrigir quaisquer erros provenientes de equipamentos que compõe a proteção dos SEP.

Um equipamento que faz parte do sistema de proteção é o transformador de corrente que tem por finalidade replicar sinais de corrente de menor intensidade em seu secundário, através de uma relação de transformação, para que estes sinais sejam interpretados pelos relés de proteção. O TC tem seu núcleo constituído por material ferromagnético que é susceptível saturação, e esta pode distorcer esses sinais, podendo prejudicar de forma errônea a operação desses relés.

Através do avanço da microeletrônica nas últimas décadas, os relés de proteção que antes eram eletromagnéticos e não permitiam ajustes precisos, acompanharam esse avanço, passando a operar através de sistemas digitais, permitindo que lógicas computacionais sejam implementadas nas memórias de seus processadores.

Desta forma vários estudos foram publicados nos últimos anos, corrigindo de forma computacional as formas de ondas de corrente distorcidas pelos TCs, mas essas técnicas envolvem complexas lógicas matemáticas, e algumas levam um considerável tempo de processamento.

Este trabalho levou em consideração todas essas variáveis e propôs, através de uma análise minuciosa de todos os tipos de curtos-circuitos, em diferentes pontos da linha e com diferentes níveis de fluxo remanescente no interior do TC, uma nova técnica de ajuste adaptável para o ângulo de máximo torque, corrigindo os problemas de atuação causados pela saturação

Essa técnica caracteriza-se por detectar quando ocorre a saturação no TC, através do método da terceira derivada, obtendo com exatidão o momento em que se inicia a distorção do sinal de impedância, e através do tempo que este acontece, escolhe automaticamente o melhor ângulo de máximo torque em que o relé de distância deve ser ajustado.

Por fim, a técnica de ajuste adaptativo para relés de distância sob condição de saturação dos transformadores de corrente proposta neste trabalho, teve um ótimo desempenho para a todos os casos estudados. Se for utilizada em todos os relés digitais presentes ao longo das

LTs, garante a seletividade, e operação correta dos relés 21 para todos os tipos possíveis de faltas, onde ocorra a saturação dos TCs, nos mais diversos pontos da linha. Logo, fica comprovado, desta forma, que a técnica é eficaz e robusta, melhorando de forma significativa a confiabilidade da proteção em linhas de transmissão feita através de relés digitais de distância, garantindo a correta atuação destes dispositivos.

### **5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros**

Algumas sugestões para trabalhos futuros, visando diminuir o impacto da saturação dos TCs sobre o desempenho dos relés de proteção surgiram durante a elaboração deste trabalho, dentre as quais citam-se:

- Uso da técnica de detecção em outros tipos de relés de proteção;
- Correção da forma de onda de corrente saturada através de técnicas computacionais de processamento de sinais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SANTOS, E. M; CARDOSO, G. Jr; FARIAS, P. E. and MORAIS, A. P., **CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference-Functions**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, 2013.
- SAWKO P., **Impact of Secondary Burden and X/R ratio on CT Saturation**. Wroclaw University of Technology, 2008.
- SANTOS, E. M. **Efeitos da Carga e da Impedância de Falta no Desempenho do Relé de Distância de Terra**. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- MOONEY, J. and P. E., **Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 2008.
- POWELL, L. J., **Current Transformer Burden and Saturation**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15, 1979.
- CAMARENA, J. A. A., **Modelado y Simulación de Transformadores de Corriente con el Programa EMTP/ATP**. Un IEEE Latin America Transactions, vol. 2, 2004.
- KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Edição do autor, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- ROBERTS, J; SCHWEITZER, E. O., **Distance Relay Element Design**, Texas A&M University College Station, Texas, 1993.
- ROBERTS, J; ARORA, R. P. E.; SCHWEITZER, E. O.; POGGI, E.P.E., **Limits to the Sensitivity Ground Directional and Distance Protection**, Pennsylvania Electric Association Relay Committee Allentown, Pennsylvania, 1997.
- CRUZ, MAURÍCIO. E. da, **Análise do Desempenho de Relés de Distância sob Condição de Saturação dos Transformadores de Corrente**. Universidade Federal do Pampa, 2013.