

MAURÍCIO ENGERS DA CRUZ

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE 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.

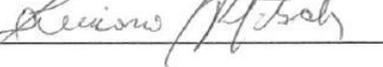
**ALEGRETE
2013**

Autoria: Maurício Engers da Cruz

Título: Análise do Desempenho de Relés de Distância sob condição de Saturação dos Transformadores de Corrente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Eduardo Machado dos Santos	Prof. Me.		unipampa
2	Lucas Santos Pereira	Prof.		unipampa
3	Luciano Lopes Pfitscher	Prof. Dr.		UFSC

Data da aprovação: 11 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Marçal e Maria Terezinha pelo apoio e suporte durante toda minha caminhada até este momento especial.

Deixo um agradecimento especial ao professor e amigo Eduardo Machado dos Santos pela paciência e dedicação durante a elaboração deste trabalho, pois sem o excelente acompanhamento que me concedeste não seria possível tal realização.

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

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

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

RESUMO

Os relés de distância são amplamente utilizados na proteção de linhas de transmissão (LTs) e seu funcionamento 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 específicos para proteção. Sendo assim, transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs) têm por função replicar os sinais de tensão e corrente da forma mais fiel possível, possibilitando o funcionamento adequado dos relés de proteção conectados em seus respectivos 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 se propõe a investigar o desempenho de relés de distância sob o efeito da saturação dos transformadores de corrente, de modo a identificar possíveis problemas de sub ou sobrealcance, considerando diferentes níveis de fluxo remanescente nos núcleos dos TCs e diferentes tipos de curto-circuito. Para tal, será usado um sistema teste, simulando uma linha de transmissão em EMTP-ATP, a partir do qual serão obtidos os sinais de tensão e corrente a serem utilizados no estudo. Os relés serão simulados a partir de programas em MATLAB®, para determinação do desempenho dos mesmos, considerando diferentes características de operação e diferentes polarizações. Após a verificação dos possíveis problemas, serão propostas soluções para contornar o fenômeno da saturação na proteção de distância das linhas de transmissão.

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

ABSTRACT

Distance relays are widely used in the protection of transmission lines (TLs) and its functioning is characterized by measuring the impedance to the fault point. The voltage and current signals of the network are processed by the relay, which calculates the impedance from the relay installation point to the fault occurrence point. The voltage and current signal are provided by particular transformers appropriate for protection purposes. Thus, potential (PTs) and current transformers (TCs) are designed to replicate the voltage and current signals as faithfully as possible, allowing for the proper functioning of protective relays connected in their secondary winding. However, current transformers are subject to saturation of the core. This phenomenon causes distortions in the waveform of the current signals received by protective relays, which could maloperates or even 'not operate for short-circuits inside their protection zones. This study aims to investigate the performance of distance relays processing current signals provided by saturated TCs in order to identify possible problems of under or overreach considering different levels of remanent flux core and different fault types. A system test was used to simulate a transmission line in EMTP-ATP. The voltage and current signals obtained from the simulations were used in the study. The distance relays operational logics were programed in MATLAB[®] to determinate the distance protection performance considering different polarizations. After the verification of the possible problems, solutions are proposed to rely with the saturation phenomenon in distance protection of transmission lines.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Zonas de proteção e tempo de atuação do relé 21	17
FIGURA 2 – Diagrama R-X e impedância aparente da LT	19
FIGURA 3 – Características dos tipos de relés mais comuns. (a) Relé de Impedância. (b) Relé de admitância ou mho. (c) Relé de reatância. (d) Relé quadrilateral.....	20
FIGURA 4 – Relé de impedância. (a) Relé de Impedância sem unidade direcional. (b) Relé de impedância com unidade direcional	20
FIGURA 5 - Zonas de atuação do relé de impedância. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.....	21
FIGURA 6 - Relés de impedância para o esquema da figura 1. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.....	21
FIGURA 7 – Relé de Admitância ou Mho	22
FIGURA 8 - Ajuste do relé Mho	23
FIGURA 9 – Zonas de proteção de um relé Mho.....	24
FIGURA 10 - Relé de reatância	25
FIGURA 11 – Relé de reatância associado ao relé de admitância.	25
FIGURA 12 – Região de operação do relé quadrilateral.....	26
FIGURA 13 – Característica Autopolarizada.....	26
FIGURA 14 – Polarização Cruzada	27
FIGURA 15 – Polarização por memória de sequência positiva	27
FIGURA 16 - Circuito simplificado de um TC.....	29
FIGURA 17 - Curvas de excitação de um TC da classe C com diferentes relações de transformação.	30
FIGURA 18 – Formas de onda de corrente (I) Saturada e Não Saturada.	31
FIGURA 19 - Caso de Subalcance de Zona.	32
FIGURA 20 - Caso de Sobrealcance de Zona.....	32

FIGURA 21 - Sistema Teste simulado em EMTP-ATP.....	36
FIGURA 22 - Formas de onda Ideal e Real no secundário do TC com carga de 4 ohms.....	37
FIGURA 23 - Desempenho do relé frente uma falta monofásica (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).....	39
FIGURA 24 - Caso de sobrealcançe de zona para falta bifásica-terra (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho))	40
FIGURA 25-Atraso na operação para falta trifásica em 50% da LT e 80% de FR (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho))	42
FIGURA 26 - Desempenho do relé frente a uma falta monofásica e ângulo de ajuste de 60° (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).....	43
FIGURA 27 - Subalcançe indevido no limiar de operação do relé 21 (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho))	46
FIGURA 28 – Formas de onda Ideal e Real no secundário do TC	47
FIGURA 29 – Atraso na operação devido à saturação violenta do TC (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho))	49
FIGURA 30 – Saturação violenta no limiar de operação (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho))	51
FIGURA 31 - Atraso na operação devido a saturação (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).	52
FIGURA 32 – Problema de subalcançe de zona em falta trifásica (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).....	54
FIGURA 33 – Subalcançe da primeira zona de atuação do relé 21(sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).....	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos.....	38
TABELA 2 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos	39
TABELA 3 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra	40
TABELA 4 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos	41
TABELA 5 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos.....	42
TABELA 6 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos	44
TABELA 7 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra	44
TABELA 8 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos	46
TABELA 9 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos.....	48
TABELA 10 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos	49
TABELA 11 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra	50
TABELA 12 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos	52
TABELA 13 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos.....	53
TABELA 14 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos	55
TABELA 15 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra	55
TABELA 16 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos	56

LISTA DE ABREVIATURAS

LT – Linha de Transmissão

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

SEP – Sistema Elétrico de Potência

FR – Fluxo Remanescente

SUMÁRIO

Sumário

Agradecimentos	3
RESUMO	5
ABSTRACT	6
Lista de ilustrações	7
Lista de tabelas	9
Lista de abreviaturas	10
Sumário	11
Introdução	13
1 Relés de distância	16
1.1 <i>Considerações Gerais</i>	16
1.2 <i>Zonas de proteção, Subalcance e Sobrealcance</i>	16
1.3 <i>Impedância aparente e Diagrama R-X</i>	18
1.4 Tipos de relés de distância.....	19
1.4.1 Relé de impedância.....	19
1.4.2 Relé de Admitância ou Mho	22
1.4.3 Relé de Reatância	24
1.4.4 Relé Quadrilateral	25
1.5 <i>Principais tipos de polarização para o relé MHO</i>	26
1.5.1 Autopolarização	26
1.5.2 Polarização Cruzada	27
1.5.3 Polarização por memória de tensão de sequência positiva.....	27
1.6 <i>Considerações Finais</i>	28
2 Saturação de TCs	29
2.1 <i>Considerações Gerais</i>	29
2.2 <i>Características Construtivas e Saturação de TCs</i>	29
2.3 <i>Efeitos do Fluxo Remanescente</i>	31
2.4 <i>Impactos da Saturação na Proteção de distância</i>	31
2.5 <i>Considerações Finais</i>	34
3 Resultados e Discussões	35
3.1 <i>Considerações Gerais</i>	35
3.2 <i>Sistema Teste</i>	35

3.3 Casos Simulados.....	36
3.4 Resultados.....	37
3.4.1 Carga secundária de 4 ohms	37
3.4.2 Carga secundária de 20 ohms	47
3.5 Considerações Finais	57
4 Considerações finais	58
4.1 Sugestão para trabalhos futuros	59
Referências bibliográficas.....	60

INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são necessários para que a energia elétrica produzida possa ser consumida em locais distantes da sua origem. São sistemas robustos, que contêm equipamentos de custos elevados e, através destes, transportam-se grande quantidade de energia elétrica até os centros de consumo. Como a potência transmitida nestes sistemas é sempre grande, se faz necessário utilizar-se de altas tensões para diminuir as perdas elétricas que resultam de inúmeros fatores em todos os equipamentos.

Uma boa proteção é necessária para dar confiabilidade ao SEP, sendo então dever da mesma, isolar um ponto em falta, diminuindo, para o menor possível, 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, enviando um sinal para a abertura de um disjuntor, isolando o trecho defeituoso do resto do sistema.

Dessa forma, quando a proteção principal de algum equipamento do SEP não atua, a proteção de retaguarda deve isolar o defeito. Porém, é desejável que não ocorra a atuação da proteção de retaguarda, pois isto acaba por interromper o serviço para um número maior de consumidores, uma vez que um trecho maior do sistema será desligado.

Para evitar que a atuação da proteção em uma linha de transmissão desenergize porções consideráveis do SEP, esta deve ser bem ajustada e coordenada, de modo a garantir que os dispositivos de proteção mais próximos da falta isolem o defeito, propiciando assim a continuidade de serviço para os consumidores fora do trecho sob curto-circuito.

Como os níveis de tensão e corrente são elevados em um SEP, 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.

Com relação específica aos transformadores de corrente (TCs), afirma-se que esses equipamentos são fundamentais para o funcionamento adequado do sistema de proteção utilizado nos SEP, pois sua função é replicar as altas correntes primárias em menor escala no secundário, propiciando assim acesso aos sinais de corrente da rede.

Os relés de distância (relés 21) são basicamente utilizados para proteção de linhas de transmissão. Eles fazem uma estimativa da impedância da linha até o ponto da falta, uma vez

que a impedância por quilômetro é praticamente constante. Esta estimativa é feita através dos sinais de tensão e de corrente da LT, que são obtidos, respectivamente, a partir de TPs e TCs. Dependendo da aplicação, podem ser utilizados outros parâmetros para a estimativa do local da falta, como a Admitância e a Reatância.

Como em um curto-circuito a corrente de uma linha de transmissão se eleva muito rápido, os TCs podem ter seus núcleos saturados devido ao incremento de fluxo magnético no interior do mesmo. Uma vez saturado, a corrente no secundário do TC será distorcida, prejudicando o desempenho dos relés de distância, de modo que possíveis problemas de subalcance 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 estes não atuem indevidamente. Além disso, possíveis retardos na atuação dos relés, bem como problemas de sobrealcance, podem ocorrer em virtude dos efeitos causados pela saturação do TC.

Esse trabalho se propõe a analisar o desempenho de relés de distância sob o efeito da saturação dos transformadores de corrente, de modo a identificar possíveis problemas de sub ou sobrealcance, além de possíveis retardos na atuação da proteção.

Um sistema teste foi criado no software EMTP-ATP para realizar as simulações de curto-circuito. Utilizou-se um modelo de transformador de corrente com núcleo saturável, a fim de forçar a saturação. Foram considerados diferentes níveis de fluxo remanescente nos núcleos dos TCs (0%, 25%, 50% e 80%), diferentes tipos de curto-circuito (monofásicos, bifásicos, bifásicos à terra e trifásicos), pontos de falta (5%, 10%, 25%, 50%, 80%) e também duas diferentes cargas no secundário do TC, sendo 4 ohms em um primeiro momento, e posteriormente 20 ohms, ambas puramente resistivas.

Com os dados das simulações de curto-circuito, um banco de sinais foi criado com auxílio do software MATLAB[®]. A partir disso, um algoritmo que simula um relé de distância de fase, do tipo MHO autopolarizado foi implementado no mesmo software. Dois diferentes ângulos de ajuste do relé foram considerados (30° e 60°) para analisar o desempenho do mesmo frente a todos os tipos de falta que foram simuladas, o que totalizou um número de 384 análises diferentes.

Foram verificados diferentes problemas de subalcance e inúmeros atrasos na operação do relé de distância. Apenas um problema de sobrealcance foi identificado. Com a variação da carga no secundário do TC, pôde-se perceber um aumento significativo nos tempos de atraso

e nas ocorrências de problemas na atuação da proteção, pois a saturação se agrava, aumentando a distorção nos sinais de corrente secundária. Além disso, verificou-se que a mudança de ângulo de ajuste do relé MHO também modifica seu desempenho.

Por fim, após a verificação dos possíveis problemas, foram propostas sugestões para trabalhos futuros. Com a intenção de contornar o fenômeno da saturação na proteção de distância, sugere-se a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para detecção e correção dos efeitos provocados pela saturação dos TCs, além de técnicas de ajustes adaptativos para os relés de distância.

O capítulo 1 descreve alguns tipos de relés de distância, bem como suas características operacionais e sintetiza os problemas de sub e sobrealcance das zonas de atuação. O capítulo 2 expõe a saturação dos transformadores de corrente, dando ênfase nos problemas e nas possíveis soluções para contornar esse efeito. No capítulo 3 encontram-se os resultados obtidos através das análises realizadas sob as simulações de curto-circuito, demonstrando os efeitos causados pela saturação do TC sobre o relé de distância.

1 RELÉS DE DISTÂNCIA

1.1 Considerações Gerais

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 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.

1.2 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 1(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 1(b).

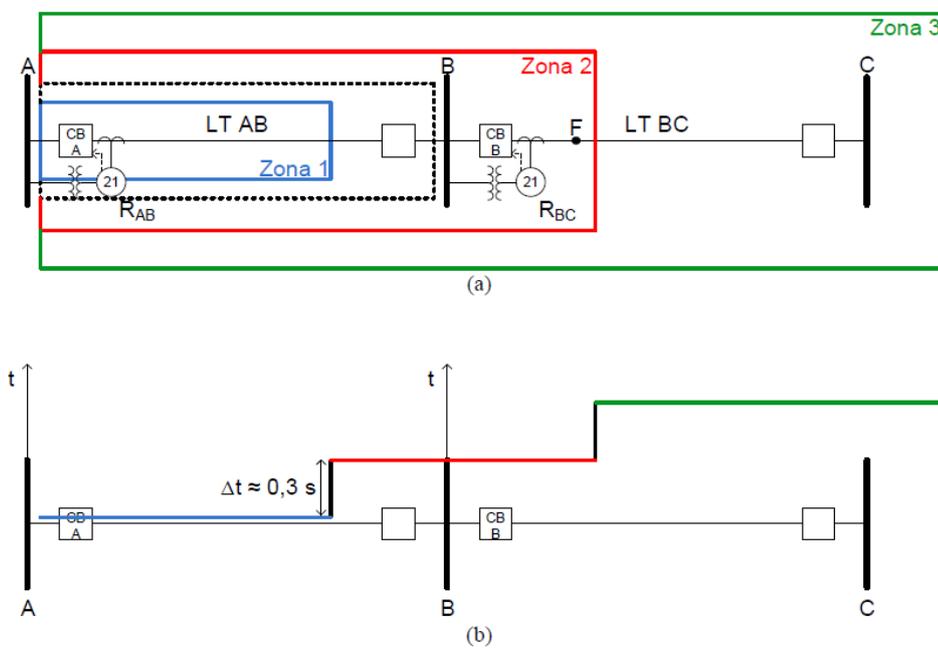


Figura 1 – Zonas de proteção e tempo de atuação do relé 21.

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.

1.3 Impedância aparente e Diagrama R-X

A impedância aparente primária é obtida através da equação (1) e é dada em ohms primários.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (1)$$

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 (2):

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

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, pois os conjugados 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 2 pode-se observar o Diagrama R-X, onde Z_{LT} é a impedância aparente da linha de transmissão.

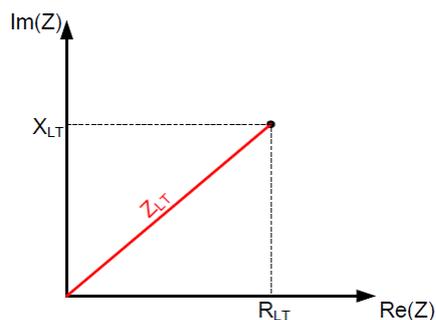


Figura 2 – Diagrama R-X e impedância aparente da LT.

1.4 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 3.

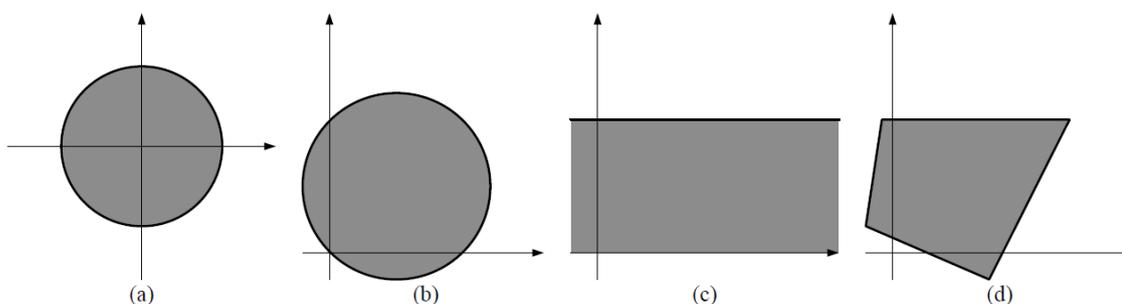


Figura 3 – Características dos tipos de relés mais comuns. (a) Relé de impedância. (b) Relé de admitância ou mho. (c) Relé de reatância. (d) Relé quadrilateral.

1.4.1 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 4(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 4 (b).

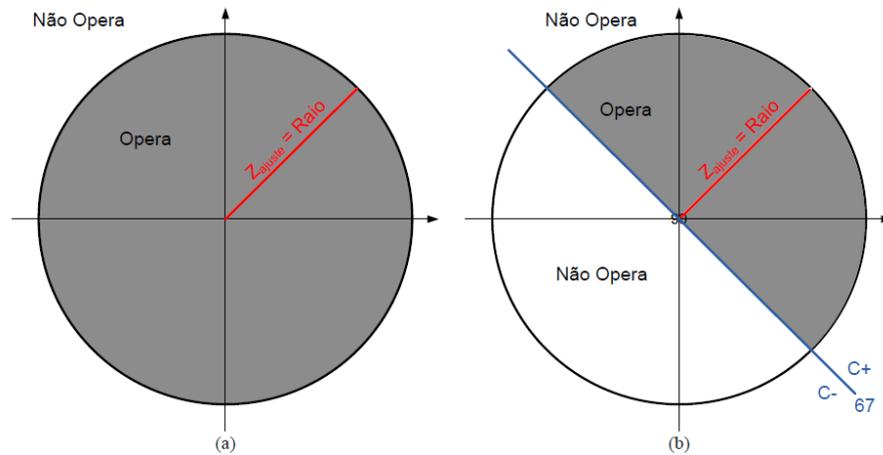


Figura 4 – Relé de impedância. (a) Relé de impedância sem unidade direcional. (b) Relé de impedância com unidade direcional.

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 5 ilustra as zonas de atuação do relé de impedância.

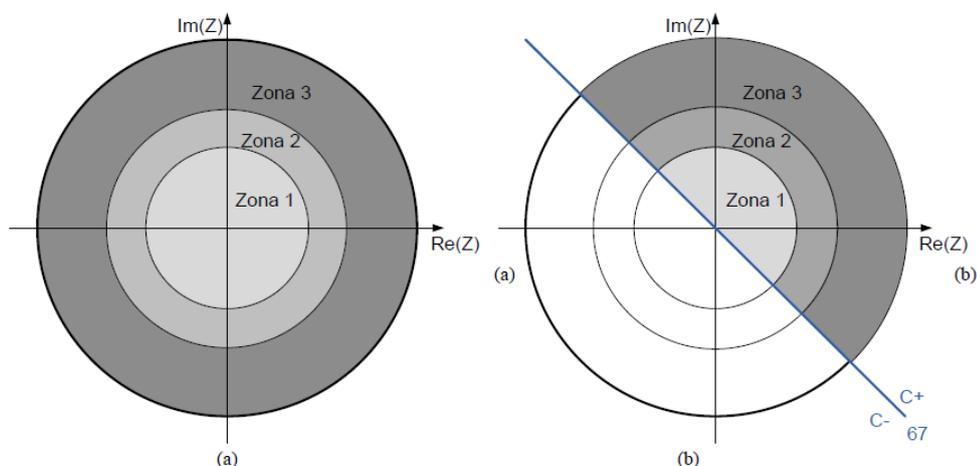


Figura 5 – Zonas de atuação do relé de impedância. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.

A Figura 6 demonstra o funcionamento de uma proteção em 2 linhas de transmissão (como o sistema da Figura 1) 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.

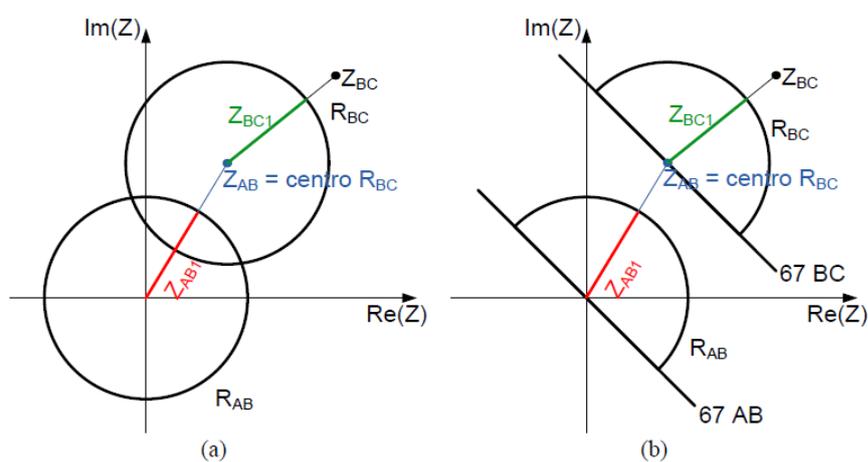


Figura 6 – Relés de impedância para o esquema da figura 1. (a) Sem unidade direcional. (b) Com unidade direcional.

1.4.2 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 (3).
- 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;

$$Z_{centro} = \frac{Z_{max}}{2} \quad (3)$$

A Figura 7 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.

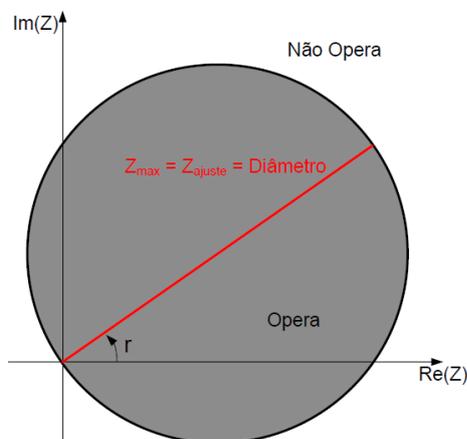


Figura 7 – Relé de Admitância ou Mho.

Ajuste e Temporização das Zonas

Para melhor entendimento, considera-se o sistema da Figura 8.

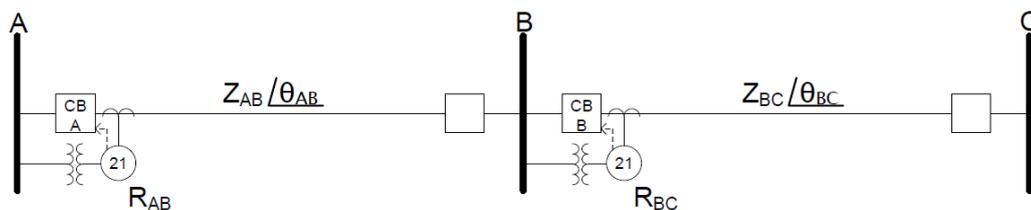


Figura 8 - Ajuste do relé Mho.

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 (4).

$$Z_{Ajuste1} = \frac{|Z_{80\%LT-AB}|}{\cos(\theta_{AB} - r)} \quad (4)$$

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 (5).

$$Z_{Ajuste2} = \frac{|Z_{protegido2}|}{\cos(\theta_2 - r)} \quad (5)$$

Onde $Z_{protegido2}$ e θ_2 , são definidos conforme a Equação (6).

$$Z_{protegido2} = Z_{AB} + Z_{50\%LT-BC} = |Z_{protegido2}| \angle \theta_2 \quad (6)$$

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 (7).

$$Z_{Ajuste3} = \frac{|Z_{protegido3}|}{\cos(\theta_3 - r)} \quad (7)$$

Onde $Z_{protegido3}$ e θ_3 são definidos através da equação (8).

$$Z_{protegido3} = Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{20\% LT seguinte} = |Z_{protegido3}| \angle \theta_3 \quad (8)$$

A temporização desta zona será:

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

A Figura 9 ilustra as zonas de atuação de um relé de admitância ou Mho.

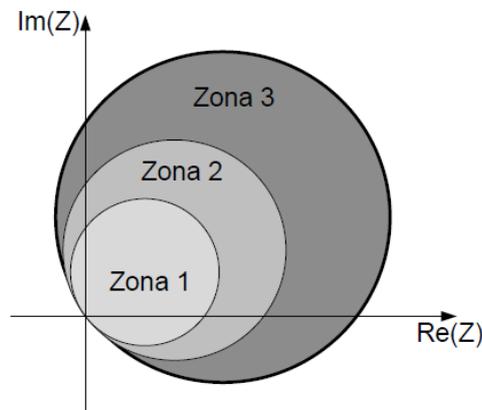


Figura 9 - Zonas de proteção de um relé Mho.

1.4.3 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 10);
- 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 11 ilustra esta situação.

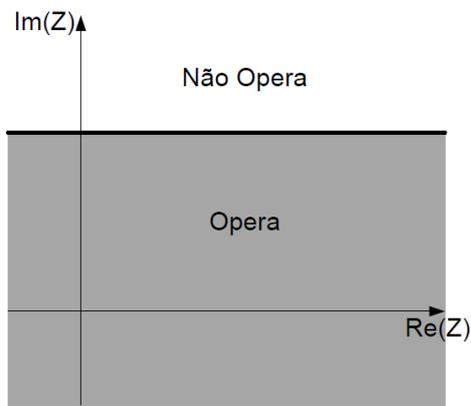


Figura 10 - Relé de reatância.

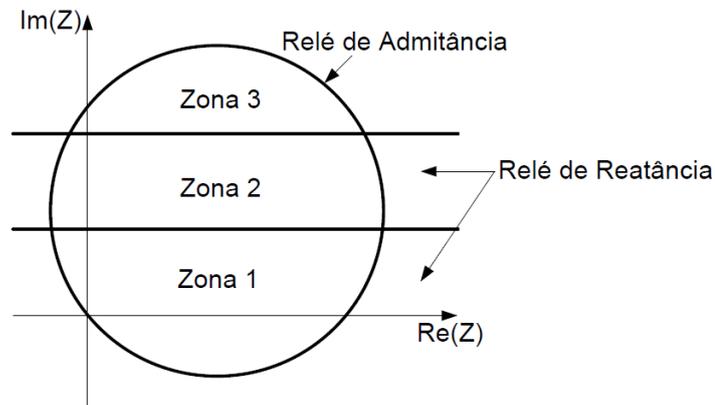


Figura 11 - Relé de reatância associado ao relé de admitância.

1.4.4 Relé Quadrilateral

- Sua região de operação é definida por quatro retas conforme mostra a Figura 12;
- 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.

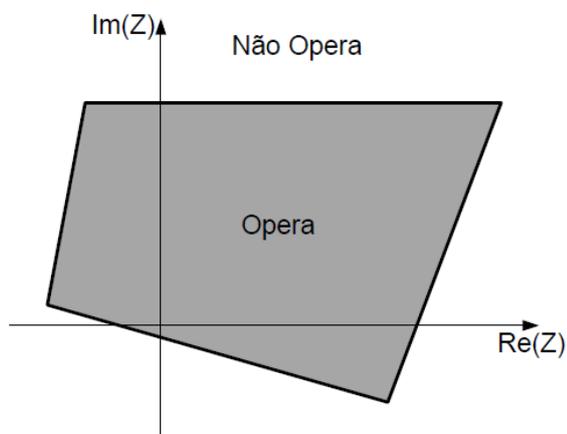


Figura 12 - Região de operação do relé quadrilateral.

1.5 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° e 90° (ROBERTS, 1993).

1.5.1 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.

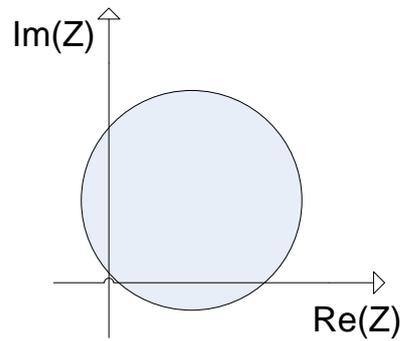


Figura 13 - Característica Autopolarizada

1.5.2 Polarização Cruzada

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

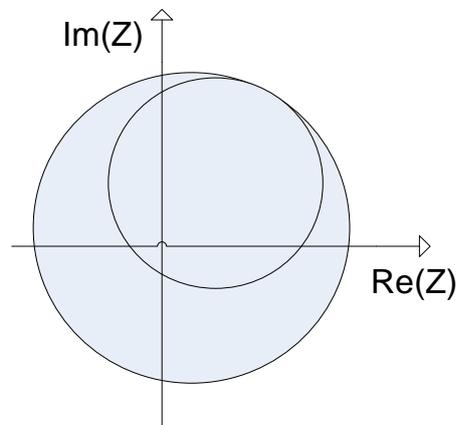


Figura 14 - Polarização Cruzada

1.5.3 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.

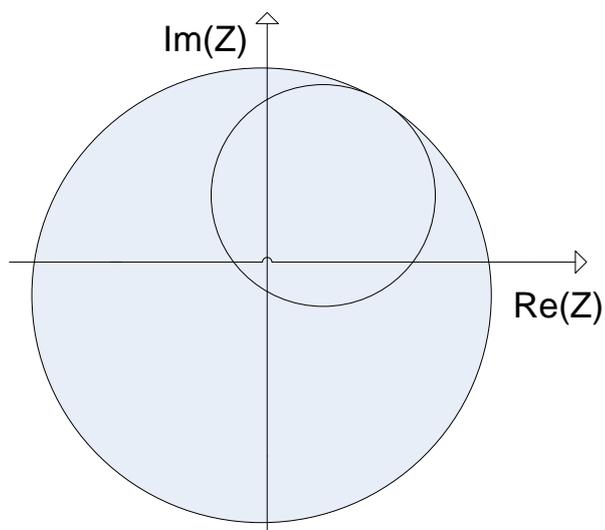


Figura 15 - Polarização por memória de tensão de sequência positiva

1.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os princípios básicos dos relés de distância, bem como as formas de ajuste das zonas de operação e os conceitos de proteção de subalcance e sobrealcance. Tendo em vista os assuntos tratados no presente Capítulo, 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 67.

2 SATURAÇÃO DE TCS

2.1 Considerações Gerais

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.

2.2 Características Construtivas e Saturação de TCs

Na Figura 16 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, conectada à carga R . I_2 é dado através da equação (9). X_m representa a reatância, R_m a resistência e Z_m a impedância do ramo de magnetização.

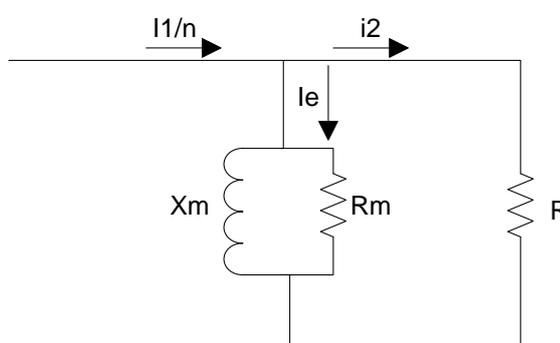
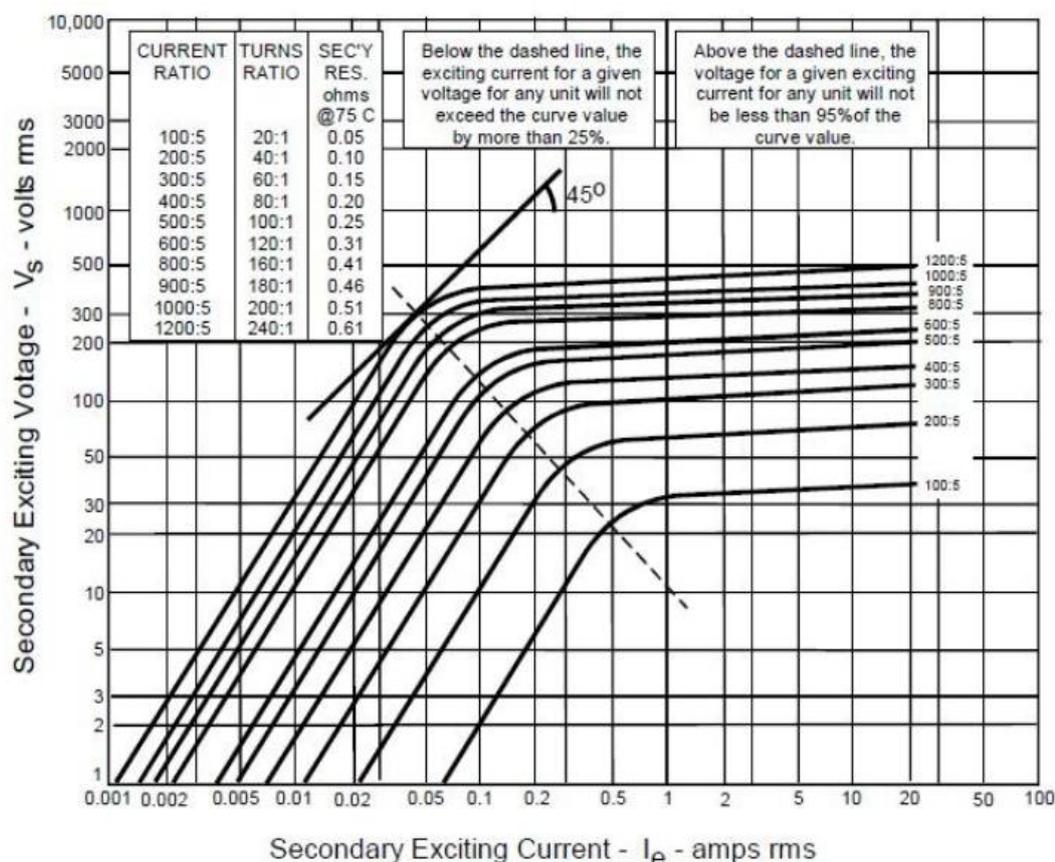


Figura 16 - Circuito simplificado de um TC.

$$i_2 = \frac{i_1}{n} - i_e \quad (9)$$

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

Na Figura 17, 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, são dadas em escala logarítmica e obtidas a partir de testes de laboratórios e cálculos feitos durante a fabricação do equipamento.



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

Figura 17 – Curvas de excitação de um TC da classe C com diferentes relações de transformação.

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 18.

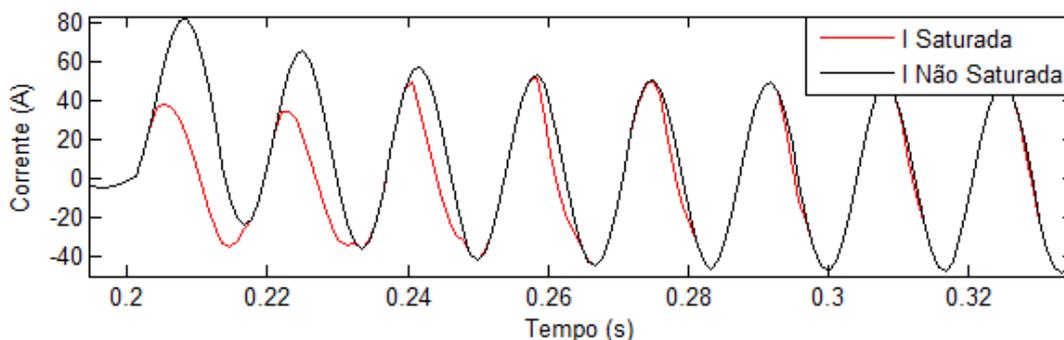


Figura 18 – Formas de onda de corrente (I) Saturada e Não Saturada.

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 $3,0\Omega$ começam a saturar a corrente durante cerca de 4 ciclos. A partir de 10Ω , 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.

2.3 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 ní-

veis 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.

2.4 Impactos da Saturação na Proteção de distância

A saturação do TC pode causar subalcance e sobrealcance das zonas de operação, bem como atrasos na atuação de um relé de distância. Na Figura 19, pode-se observar um caso de subalcance na primeira zona de atuação (Zona instantânea). Já na Figura 20, 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).

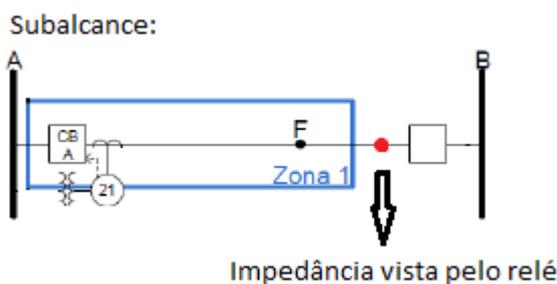


Figura 19 – Caso de Subalcance de zona.

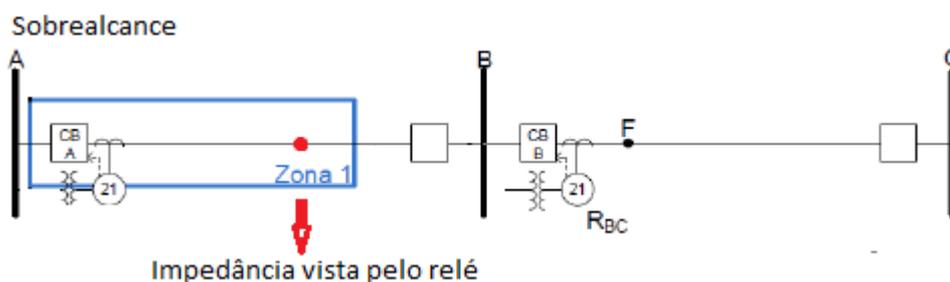


Figura 20 – Caso de sobrealcance de Zona.

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 subbalcance 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 TC e casá-la 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 feitas 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 feitos 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.

Nesse contexto, o capítulo seguinte mostra os resultados obtidos para um estudo detalhado sobre o comportamento de um relé de distância do tipo MHO, autopolarizado, sob condição de saturação dos TCs. Para tal, foi utilizado um sistema teste, no qual foram simulados diversos tipos de curto-circuito, para diferentes posições de falta e condições de saturação dos TCs. A partir dessas simulações, foram obtidos os sinais de tensão e corrente a serem processados pela lógica de operação do referido relé. Nos testes, foram verificados problemas de sub e sobrealcançe, além de atrasos na atuação do relé em questão.

2.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foram discutidos os possíveis impactos que a saturação do núcleo do TC pode provocar no desempenho dos relés de distância, bem como as possíveis causas desse fenômeno. Com base nos conceitos abordados no presente Capítulo, fez-se o estudo apresentado no Capítulo 3, o qual demonstra o real desempenho do relé de distância frente à condição de saturação dos transformadores de corrente e os problemas para o sistema de proteção de correntes deste fenômeno.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Considerações Gerais

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de simulações no software EMTP-ATP para diferentes casos de curto-circuito, que foram posteriormente analisados em um algoritmo que simula um relé de distância no software MATLAB[®]. A análise de desempenho foi feita para um relé de admitância (característica Mho) de fase com polarização direta, considerando diferentes ângulos de ajuste e o efeito causado pela saturação dos transformadores de corrente.

3.2 Sistema Teste

O sistema teste utilizado para as simulações de curto-circuito no software EMTP-ATP 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° 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.

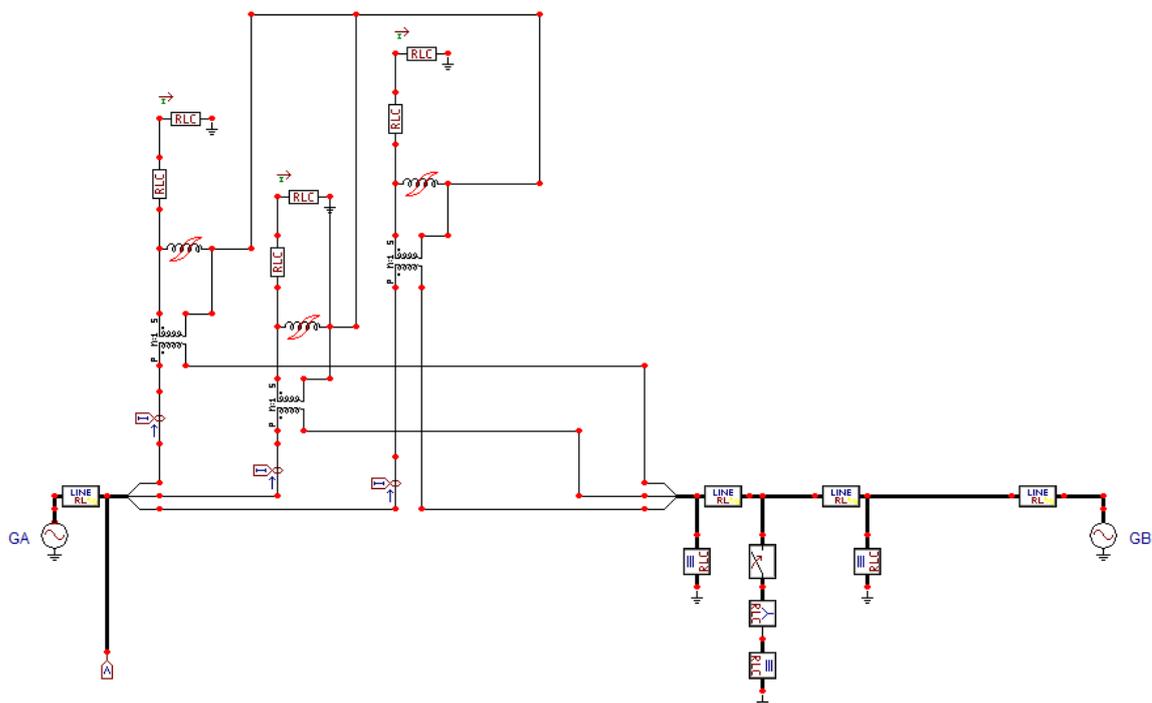


Figura 21 – Sistema Teste simulado em EMTP-ATP.

3.3 Casos Simulados

Foram simulados diversos casos de curto-circuito em EMTP- ATP, variando o local da falta, o tipo de curto-circuito, o nível de fluxo remanescente e a carga no secundário do TC. Primeiramente foram simulados casos para uma carga de 4 ohms puramente resistiva no secundário do transformador de corrente, envolvendo curtos-circuitos monofásico, bifásico, bifásico-terra, e trifásico. Os pontos de faltas foram tomados a partir de 5% da LT, passando por 10%, 25%, 50%, 75% 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. Todos esses casos foram repetidos para uma carga puramente resistiva de 20 ohms no secundário do TC.

Um filtro de Fourier de ciclo completo implementado no software MATLAB[®] foi utilizado para determinar os valores RMS instantâneos dos sinais de tensão e de corrente obtidos nas simulações de curto-circuito, uma vez que o relé em questão tem sua operação determinada pelo processamento desses valores.

Tal relé teve sua característica simulada a partir de um algoritmo estruturado no software MATLAB[®], o qual simula o funcionamento de um relé de distância do tipo MHO autopolarizado, para ângulos de ajuste de 30° e 60°.

Como base para 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.

3.4 Resultados

3.4.1 Carga secundária de 4 ohms

Em um primeiro momento considerou-se uma carga de 4 ohms puramente resistiva no secundário do transformador de corrente. Dessa forma foram gerados 96 casos diferentes de curto circuito, sendo cada um deles analisado pelo algoritmo que simula o relé de distância.

Na Figura 22 é possível observar correntes de curto-circuito com forma de onda ideal e distorcida pela saturação do TC, envolvendo a referida carga.

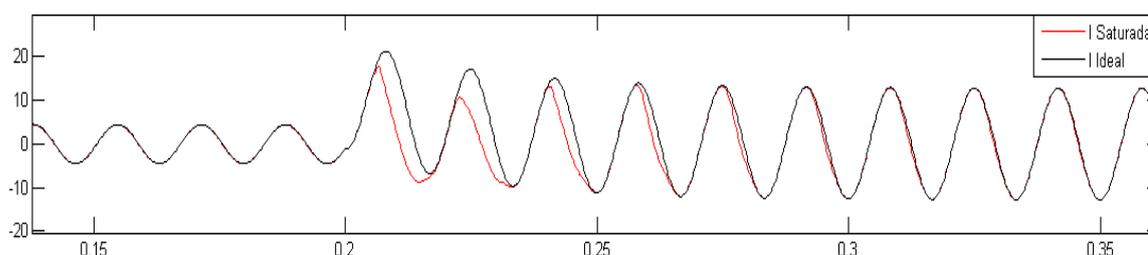


Figura 22 – Formas de onda Ideal e Real no secundário do TC com carga de 4 ohms

Com esta carga no secundário, a saturação causa grandes distorções na forma de onda de corrente, por um período de cerca de 6 ciclos após a ocorrência da falta. Os efeitos destas distorções serão expostos nas Seções seguintes.

3.4.1.1 Carga secundária de 4 ohms com ângulo de ajuste de 30°

Considerando um ângulo de ajuste de 30° no relé distância, foram analisados os casos de curto-circuito citados anteriormente.

Nas tabelas a seguir encontram-se os resultados obtidos para esses casos, onde foram computados os tempos de atraso na operação do relé, e verificados os problemas de sub ou sobrealcance da primeira zona de operação do relé. As tabelas 1, 2, 3 e 4, expõem os resultados obtidos para os curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos, respectivamente.

Para os casos de curtos-circuitos monofásicos, cujos resultados são mostrados na Tabela 1, pode-se notar que a saturação não causa efeitos perigosos para a proteção nas faltas que ocorreram nos trechos até 25% da LT. Já nos trechos a partir de 50%, ocorreram problemas de subalcance em todas as simulações, exceto para uma falta em 80% da LT, onde se encontra o limiar de operação do relé de distância e, neste, o mesmo não deve atuar, configurando assim uma operação coerente da proteção.

Particularmente nesses casos, o que levou a não atuação do relé foi o ângulo de ajuste de 30° como se pode verificar na Figura 23, pois apesar de a saturação distorcer o sinal secundário, o sinal ideal também ficou fora da primeira zona de atuação do relé 21. Isto é uma particularidade de curtos-circuitos monofásicos, tendo em vista que a magnitude da corrente de curto-circuito não é tão elevada quando comparada a outros tipos de falta.

TABELA 1- Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos

Curto 1F	Atraso/Efeito	Curto 1F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	Subalcance
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	Subalcance
5%LT_50%FR	0	50%LT_50%FR	Subalcance
5%LT_80%FR	0,35 ms	50%LT_80%FR	Subalcance
10%LT_0%FR	0,17 ms	75%LT_0%FR	Subalcance
10%LT_25%FR	0,17 ms	75%LT_25%FR	Subalcance
10%LT_50%FR	0,17 ms	75%LT_50%FR	Subalcance
10%LT_80%FR	0,52 ms	75%LT_80%FR	Subalcance
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	3,7 ms	80%LT_80%FR	Não atua

A Figura 23 apresenta um caso de falta monofásica, em 50% da linha de transmissão, com fluxo remanescente de 50% e com carga secundária de 4 ohms puramente resistiva. Nota-se que o ângulo de ajuste do relé está muito baixo, o que ocasiona a não atuação do mesmo para essa ocorrência.

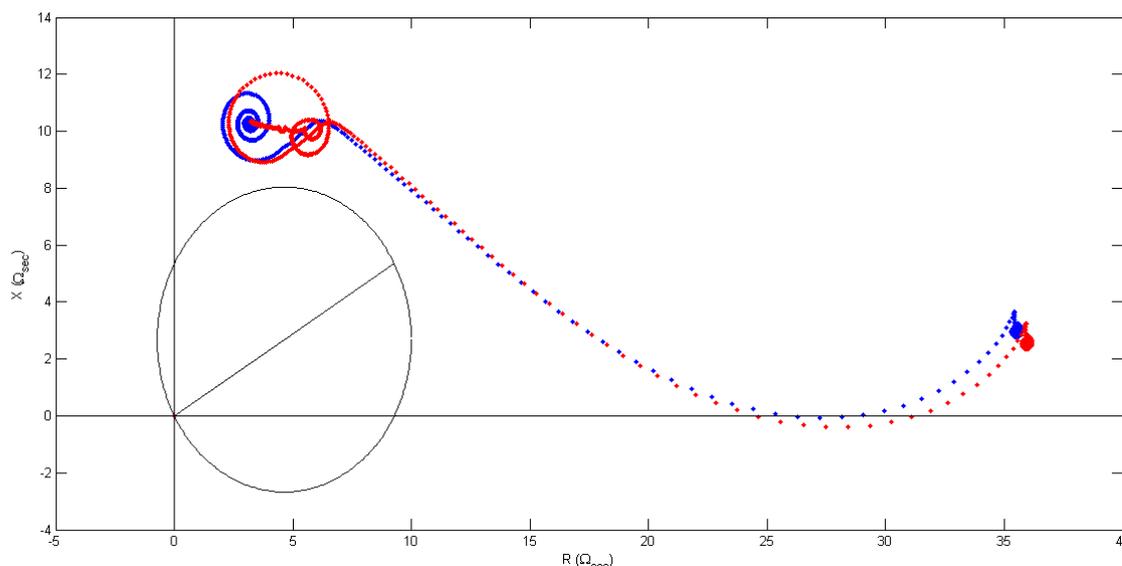


Figura 23 – Desempenho do relé frente uma falta monofásica (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Inicialmente, a impedância vista pelo relé está situada no lugar geométrico das cargas (ao lado direito da Figura 23) e após a ocorrência do curto-circuito, ela deveria se deslocar para dentro da zona de operação do relé de distância (lado esquerdo). Nesse caso isto não ocorreu, causando a não atuação indevida do relé 21.

Para as faltas bifásicas, não ocorreram problemas graves na atuação da proteção. Apesar de ocorrerem alguns atrasos na operação do relé, estes são insuficientes para prejudicar a operação do sistema. Os resultados obtidos para faltas bifásicas podem ser vistos na Tabela 2.

TABELA 2 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos

Curto 2F	Atraso/Efeito	Curto 2F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	0,17 ms
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	0,17 ms
5%LT_50%FR	0,17 ms	50%LT_50%FR	0,17 ms
5%LT_80%FR	1 ms	50%LT_80%FR	6,6 ms
10%LT_0%FR	0	75%LT_0%FR	0,17 ms
10%LT_25%FR	0	75%LT_25%FR	0,17 ms
10%LT_50%FR	0,17 ms	75%LT_50%FR	0,17 ms
10%LT_80%FR	1 ms	75%LT_80%FR	3 ms
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	6,1 ms	80%LT_80%FR	Não atua

A Tabela 3 apresenta a atuação do relé para curtos-circuitos bifásicos-terra, para os quais foram constatados problemas de subalcançe em todos os casos de falta em 75% da linha de transmissão. Uma particularidade neste tipo de falta foi o problema de sobrealcançe verificado para uma falta em 80% da linha com 80% de fluxo remanescente no núcleo do transformador de corrente. Isto pode ser observado na Figura 24.

TABELA 3 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra

Curto 2FT	Atraso/Efeito	Curto 2FT	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	0,17 ms
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	0,17 ms
5%LT_50%FR	0	50%LT_50%FR	0,17 ms
5%LT_80%FR	0,52 ms	50%LT_80%FR	5,4 ms
10%LT_0%FR	0	75%LT_0%FR	Subalcançe
10%LT_25%FR	0	75%LT_25%FR	Subalcançe
10%LT_50%FR	0	75%LT_50%FR	Subalcançe
10%LT_80%FR	0,52 ms	75%LT_80%FR	Subalcançe
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	0,87 ms	80%LT_80%FR	Sobrealcançe

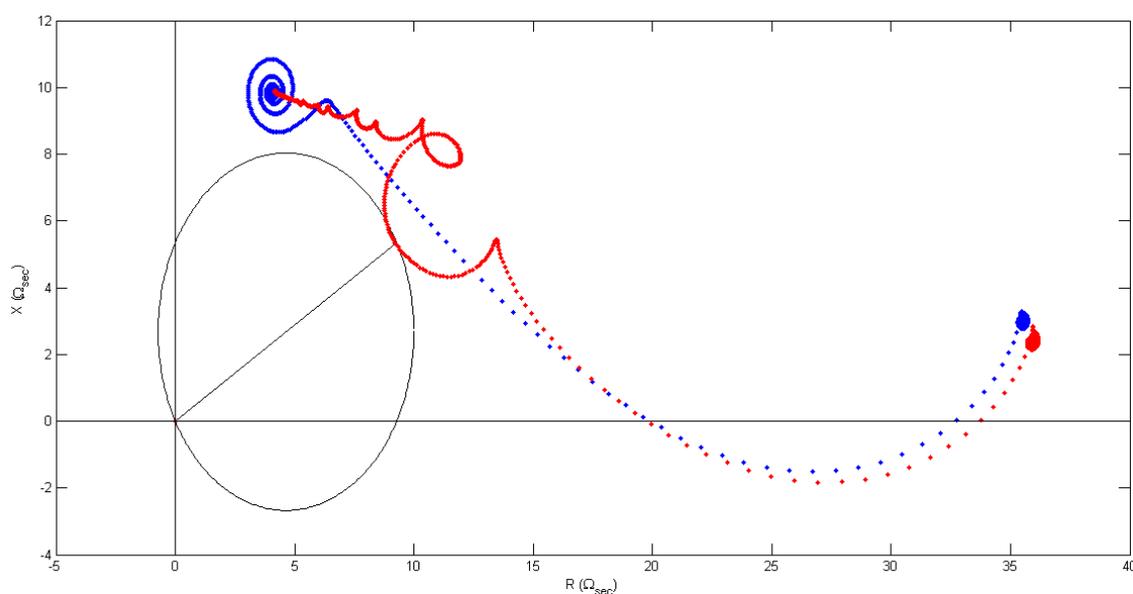


Figura 24 – Caso de sobrealcançe de zona para falta bifásica-terra (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Neste caso, o relé não deveria operar, pois a falta ocorre em 80% da linha de transmissão, ou seja, no limiar de operação do equipamento. A operação correta seria a atuação da segunda zona 0,3 segundos após a impedância entrar na região de operação da referida zona. Devido ao efeito da saturação, a forma de onda distorcida faz com que a impedância vista pelo relé seja menor do que a de ajuste da primeira zona, causando a atuação instantânea da proteção de distância, o que caracteriza uma atuação indevida da proteção.

Já para as faltas trifásicas, os resultados são mostrados na Tabela 4. Verifica-se a ocorrência de problemas de subbalcance para todos os casos simulados para curto-circuito em 75% da LT. Para as faltas em 50% da LT o relé teve desempenho ótimo, já que não apresenta nenhum atraso em sua operação. Apenas para a falta trifásica em 50% da LT com fluxo remanescente de 80%, a atuação do relé apresentou atraso, sendo este considerado pequeno.

TABELA 4 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos

Curto 3F	Atraso/Efeito	Curto 3F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	0
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	0
5%LT_50%FR	0	50%LT_50%FR	0
5%LT_80%FR	0,35 ms	50%LT_80%FR	4,7 ms
10%LT_0%FR	0,17 ms	75%LT_0%FR	Subbalcance
10%LT_25%FR	0,17 ms	75%LT_25%FR	Subbalcance
10%LT_50%FR	0,17 ms	75%LT_50%FR	Subbalcance
10%LT_80%FR	0,35 ms	75%LT_80%FR	Subbalcance
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	0,52 ms	80%LT_80%FR	Não atua

A Figura 25 demonstra que a distorção existe, mas neste caso específico, não provoca grandes problemas para a proteção, uma vez esta é mais forte dentro da zona de operação do relé, o que não compromete a atuação do mesmo. Porém essa ocorrência é uma particularidade deste caso, o que não garante o mesmo desempenho se alguma variável for alterada, como por exemplo, o ângulo de ajuste do relé.

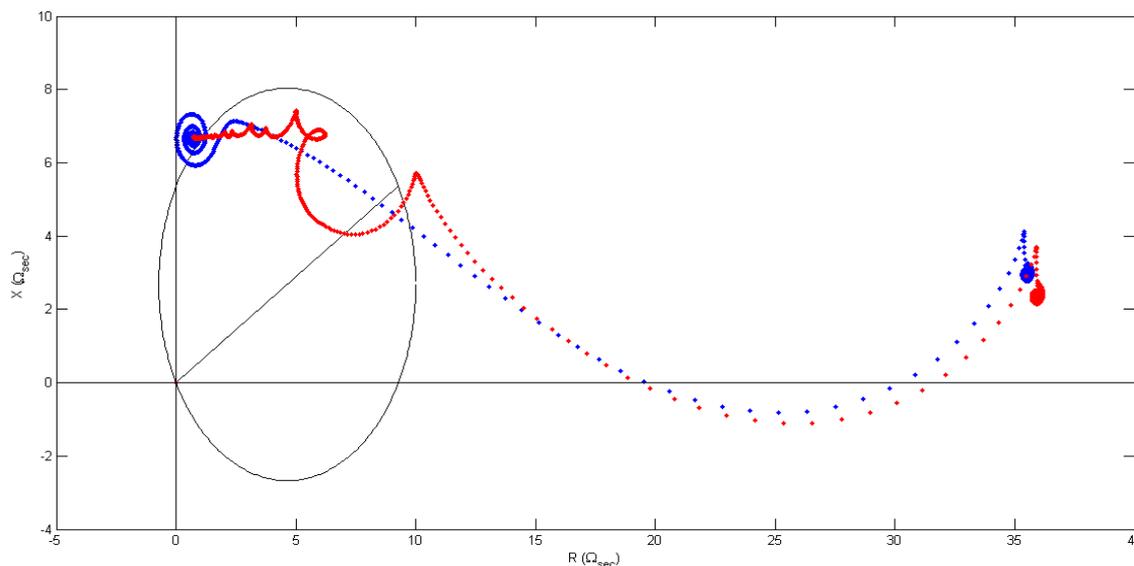


Figura 25 – Atraso na operação para falta trifásica em 50% da LT e 80% de FR (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

3.4.1.2 Carga secundária de 4 ohms com ângulo de ajuste de 60°

Utilizando as mesmas simulações de curto-circuito da análise anterior, variou-se o ângulo de ajuste do relé para 60° e foram repetidas todas as análises para verificação de atrasos e problemas na atuação da proteção de distância. As Tabelas 5, 6, 7 e 8 expõem, respectivamente, os resultados para as faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas.

TABELA 5 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos

Curto 1F	Atraso/Efeito	Curto 1F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	0,17 ms
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	0,17 ms
5%LT_50%FR	0	50%LT_50%FR	0
5%LT_80%FR	0,7 ms	50%LT_80%FR	Subalcance
10%LT_0%FR	0	75%LT_0%FR	Subalcance
10%LT_25%FR	0	75%LT_25%FR	Subalcance
10%LT_50%FR	0	75%LT_50%FR	Subalcance
10%LT_80%FR	1,4 ms	75%LT_80%FR	Subalcance
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	5,6 ms	80%LT_80%FR	Não atua

Conforme a Tabela 5, pode-se notar uma melhora no desempenho do relé em relação à sua atuação para faltas monofásicas, quando ajustado com ângulo de 30°. Com o novo ângulo

de ajuste, os tempos de atraso diminuíram consideravelmente e os casos de subalcançe, que antes foram constatados em todos os casos a partir das faltas em 50% da LT, agora foram apenas verificados para faltas em 75% da LT, com exceção da falta em 50% da linha de transmissão, com o fluxo remanescente de 80%, para a qual foi constatado um problema de subalcançe.

A Figura 26 expõe a impedância vista pelo relé ajustado em 60° para o caso em que a falta ocorre no trecho 50% da LT e o fluxo remanescente é de 50%.

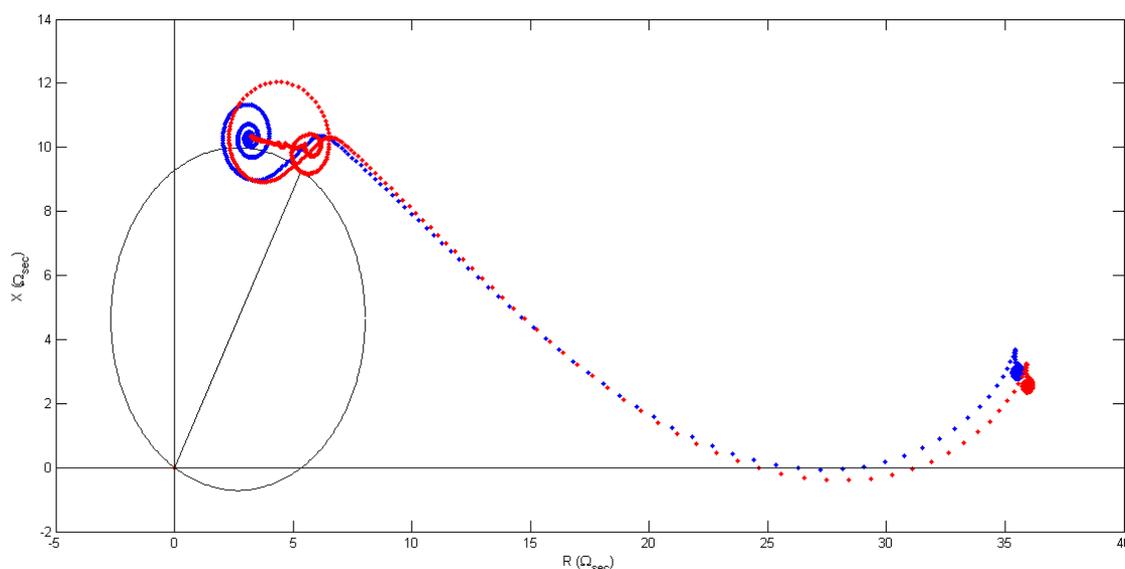


Figura 26 – Desempenho do relé frente a uma falta monofásica e ângulo de ajuste de 60° (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Comparando o resultado obtido anteriormente com o ajuste de 30° (onde havia sido verificado um caso de subalcançe da primeira zona de atuação), com o obtido para um ajuste de 60° , pode-se dizer que a mudança de ângulo causou uma melhora significativa, pois a proteção apresentou desempenho coerente.

Na Figura 26 é possível observar, ainda, que a impedância entrou na primeira zona de operação do relé de distância, diferente do caso da Figura 23, fazendo com que a proteção atuasse instantaneamente, o que caracteriza a operação correta da mesma. Neste caso, o atraso na operação foi zero, ou seja, as impedâncias vistas pelo relé processando a forma de onda ideal e a forma de onda distorcida, entraram no mesmo instante dentro da zona ajustada. O efeito da saturação só teve influência após a atuação do relé 21.

Para as faltas bifásicas, a mudança do ângulo de ajuste teve impactos negativos no desempenho da proteção de distância, conforme pode ser visto na Tabela 6. Apesar de não ocor-

rer nenhum caso de sub ou sobrealcançe da primeira zona de operação, alguns atrasos tiveram aumentos significativos se comparados com os tempos de atrasos obtidos para as mesmas faltas, adotando o ângulo ajustado em 30°.

TABELA 6 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos

Curto 2F	Atraso/Efeito	Curto 2F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	0,17 ms
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	0,17 ms
5%LT_50%FR	32,2 ms	50%LT_50%FR	0,52 ms
5%LT_80%FR	32,4 ms	50%LT_80%FR	32,2 ms
10%LT_0%FR	0	75%LT_0%FR	0,17 ms
10%LT_25%FR	0	75%LT_25%FR	0,17 ms
10%LT_50%FR	1,2 ms	75%LT_50%FR	0,17 ms
10%LT_80%FR	25,4 ms	75%LT_80%FR	66,5 ms
25%LT_0%FR	0,17 ms	80%LT_0%FR	Atua indev.
25%LT_25%FR	0,17 ms	80%LT_25%FR	Atua indev.
25%LT_50%FR	0,7 ms	80%LT_50%FR	Atua indev.
25%LT_80%FR	11 ms	80%LT_80%FR	Sub indev.

Nas faltas em 5% da linha de transmissão com fluxo remanescente de 50%, e 10% da LT com 80% de FR, verificou-se um grande aumento no atraso da operação do relé. Os tempos anteriores eram da ordem de 1 ms em ambos os casos. Com a mudança do ângulo de ajuste para 60°, os atrasos passaram a ser de, respectivamente, 32,2 ms e 25,4 ms.

Isso se assemelha ao caso exposto na Figura 25, pois a saturação para essas faltas fez com que a impedância vista pelo relé variasse somente após a operação da proteção, o que mudou devido à troca do ângulo de ajuste.

Nesse caso, o aumento do ângulo fez com que a impedância vista a partir do sinal ideal de corrente tivesse uma demora maior para entrar na primeira de atuação zona do relé. Além disso, o efeito da saturação, que ocorria após a impedância estar dentro da região de operação do relé, passou a ocorrer quando a mesma está fora dela, aumentando o atraso conforme visto citado anteriormente.

Já para as faltas bifásicas-terra, os resultados são apresentados na Tabela 7. Verifica-se uma excelente melhora com a mudança do ângulo de ajuste. Os problemas de subalcançe encontrados em todas as faltas do trecho 75% com o ângulo de ajuste de 30° passaram a ser apenas atrasos na operação do relé.

TABELA 7 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra

Curto 2FT	Atraso/Efeito	Curto 2FT	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0	50%LT_0%FR	0
5%LT_25%FR	0	50%LT_25%FR	0
5%LT_50%FR	0,17 ms	50%LT_50%FR	0,17 ms
5%LT_80%FR	1 ms	50%LT_80%FR	7 ms
10%LT_0%FR	0	75%LT_0%FR	0,17 ms
10%LT_25%FR	0	75%LT_25%FR	0,17 ms
10%LT_50%FR	0,17 ms	75%LT_50%FR	0
10%LT_80%FR	1,4 ms	75%LT_80%FR	50,3 ms
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Atua indev.
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Atua indev.
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Atua indev.
25%LT_80%FR	6,3 ms	80%LT_80%FR	Sub. Indev.

A mudança de ângulo fez com que a impedância vista pelo relé estivesse dentro da zona de operação, o que garante a operação do equipamento, mesmo que com atrasos significativos em alguns casos.

Anteriormente, uma proteção de retaguarda deveria atuar para isolar o defeito, podendo causar desligamentos desnecessários de outras linhas de transmissão, deixando um maior número de consumidores sem abastecimento de energia elétrica. Porém, ocorreram atuações indevidas do relé de distância no trecho 80% da LT. Deve-se salientar que nesse trecho encontra-se o limiar de operação do relé 21, onde a segunda zona de ajuste deveria ser acionada, e não a primeira, fazendo com que a proteção não tenha atuação imediata, diferentemente do ocorrido.

As atuações indevidas se deram pelo fato de que as faltas bifásicas-terra possuem a magnitude da corrente de curto-circuito bastante elevadas, o que acaba fazendo com que o relé de distância “enxergue” a falta dentro da primeira zona de atuação de forma indevida.

A Figura 27 apresenta uma falta em 80% da LT e com nível de fluxo remanescente de 80% no núcleo do TC. Observa-se ainda que a impedância vista pelo relé a partir do sinal ideal de corrente encontra-se dentro na zona de operação do relé indevidamente. Entretanto, o efeito da saturação fez com que a impedância vista pelo equipamento se encontrasse fora desta zona, o que caracterizou um caso de sublance, como deveria acontecer mesmo para o processamento do sinal ideal. Neste caso, pode-se dizer que a saturação provocou a atuação correta da proteção.

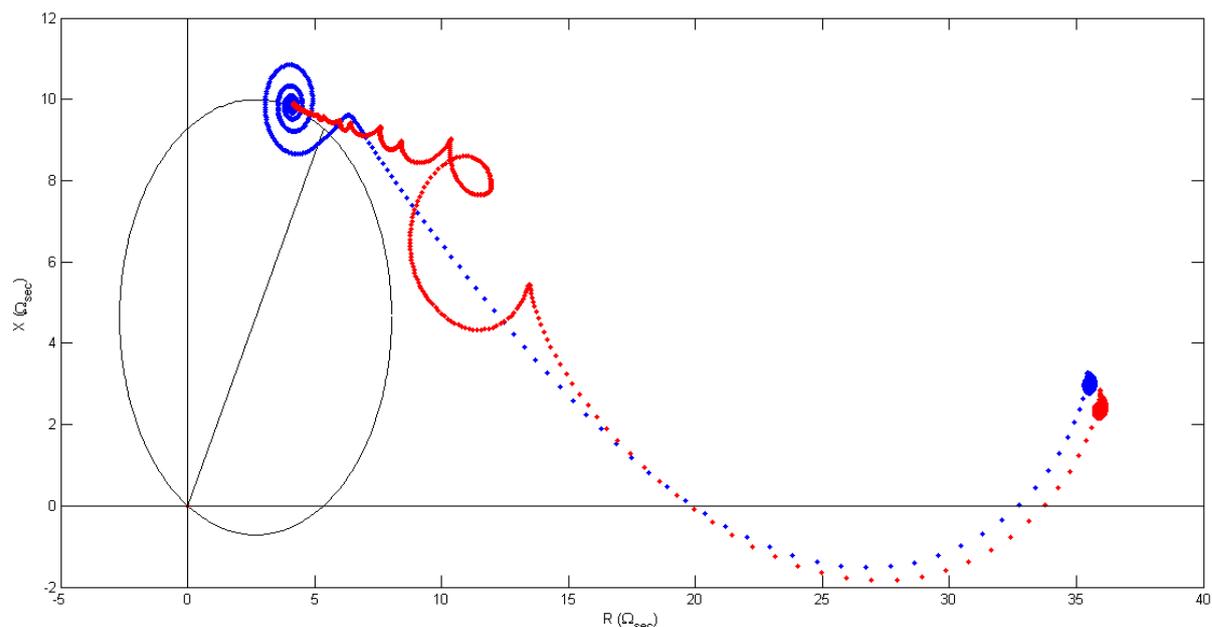


Figura 27 – Sublance indevido no limiar de operação do relé 21 (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

A Tabela 8 expõe os resultados para as faltas trifásicas com a mudança do ângulo de ajuste para 60° . Constataram-se melhoras significativas para alguns casos, porém da mesma forma que para as faltas bifásicas-terra, ocorreram problemas de atuação indevida da proteção no limiar de operação do relé.

TABELA 8 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos

Curto 3F	Atraso/Efeito	Curto 3F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	0,17 ms	50%LT_0%FR	0
5%LT_25%FR	0,17 ms	50%LT_25%FR	0
5%LT_50%FR	0,17 ms	50%LT_50%FR	0
5%LT_80%FR	0,7 ms	50%LT_80%FR	5,7 ms
10%LT_0%FR	0	75%LT_0%FR	0,17 ms
10%LT_25%FR	0	75%LT_25%FR	0
10%LT_50%FR	0	75%LT_50%FR	0,7 ms
10%LT_80%FR	0,7 ms	75%LT_80%FR	1,6 ms
25%LT_0%FR	0	80%LT_0%FR	Atua indev.
25%LT_25%FR	0	80%LT_25%FR	Atua indev.
25%LT_50%FR	0	80%LT_50%FR	Atua indev.
25%LT_80%FR	1,6 ms	80%LT_80%FR	Sub Indev.

Comparando todos os resultados para os dois ângulos diferentes, observa-se que os problemas de subalcance existentes com o ângulo de ajuste de 30° , para faltas em 75% da LT, não ocorreram para o novo ajuste. Por outro lado, com o ângulo ajustado em 60° , ocorrem operações indevidas do relé de distância para as faltas em 80% da LT, sobre o limiar de operação do equipamento.

Da mesma forma que nos curtos-circuitos bifásicos-terra, a magnitude da corrente de falta trifásica é bastante elevada se comparada com outros tipos de falta, sendo esse efeito responsável pela atuação indevida do relé para os defeitos mencionados.

Também, verifica-se a ocorrência de um caso de subalcance de zona indevido para a falta em 80% da LT, com 80% de fluxo remanescente no núcleo do TC. Nesse caso, a impedância, vista com o sinal ideal de corrente, encontrou-se dentro da primeira zona de operação e a saturação fez com que a impedância fosse verificada fora da respectiva zona de proteção, da mesma forma que o verificado para a falta bifásica-terra.

3.4.2 Carga secundária de 20 ohms

Como visto no Capítulo 2, a saturação torna-se mais severa com o acréscimo de carga no secundário do TC. Levando isso em consideração, aumentou-se a carga inicial de 4 ohms para 20 ohms puramente resistivos no secundário do TC. A partir disto foram simulados todos os casos novamente, totalizando 96 casos nessa nova configuração.

A Figura 28 ilustra a comparação da forma de onda de corrente ideal no secundário do TC e a forma de onda saturada, já com a carga de 20 ohms no equipamento. Nota-se que a saturação é muito severa com esta carga secundária e permanece durante toda a simulação, ou seja, a saturação se faz presente em todos os ciclos na forma de onda do sinal.

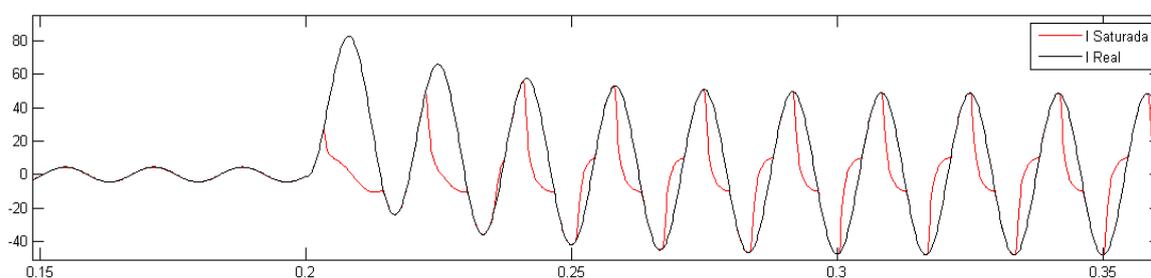


Figura 28 – Formas de onda Ideal e Real no secundário do TC com carga de 20 ohms

As análises do impacto da saturação no desempenho da proteção de distância, para os casos com esta carga, serão expostos a seguir.

3.4.2.1 Carga secundária de 20 ohms com ângulo de ajuste de 30°

Com o ângulo de ajuste do relé regulado em 30°, foram analisados os novos casos de curto-circuito obtidos com a carga de 20 ohms no secundário do TC.

As Tabelas 9, 10, 11 e 12 expõem os resultados obtidos para as faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, respectivamente.

Os resultados expostos na Tabela 9 demonstram que, o aumento da carga para 20 ohms no secundário do TC, causou efeitos mais graves no desempenho da proteção de distância, uma vez que à distorção na forma de onda do sinal de corrente aparece de forma severa em todos os ciclos do sinal.

TABELA 9 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos

Curto 1F	Atraso/Efeito	Curto 1F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	6,4 ms	50%LT_0%FR	Subalcance
5%LT_25%FR	7,8 ms	50%LT_25%FR	Subalcance
5%LT_50%FR	8,2 ms	50%LT_50%FR	Subalcance
5%LT_80%FR	8,2 ms	50%LT_80%FR	Subalcance
10%LT_0%FR	6,8 ms	75%LT_0%FR	Subalcance
10%LT_25%FR	8 ms	75%LT_25%FR	Subalcance
10%LT_50%FR	8,5 ms	75%LT_50%FR	Subalcance
10%LT_80%FR	8,5 ms	75%LT_80%FR	Subalcance
25%LT_0%FR	7,7 ms	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	9,9 ms	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	16 ms	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	16 ms	80%LT_80%FR	Não atua

Para todos os casos de curto-circuito monofásico foram constatados atrasos na operação do relé 21. A maioria desses atrasos tiveram um aumento significativo quando comparados aos mesmos casos com carga de 4 ohms no TC. O maior atraso para a carga anterior nesta configuração era de 3,7 ms. Com a carga de 20Ω, o menor atraso passou a ser 6,8 ms e o maior de 16 ms.

Os casos de subalcance que ficaram constatados anteriormente com a carga de 4 ohms e mesmo ângulo de ajuste permaneceram com esta nova configuração. O motivo de estes ocorrerem a partir do trecho 50% da LT é o mesmo dos casos anteriores, pois a corrente de falta monofásica tem amplitude inferior à das outras faltas.

A Tabela 10 demonstra que os atrasos para os curtos-circuitos bifásicos aumentaram em grande proporção. Com a configuração de carga anterior, alguns casos não apresentaram nenhum atraso na operação do relé e o máximo valor apresentado foi de 6,6 ms, muito abaixo do que é apresentado com a nova carga, onde os tempos mínimos e máximos de atraso foram de, respectivamente, 13,1 ms e 65,8 ms. Esse valor máximo corresponde à cerca de quatro ciclos de atraso na atuação da proteção.

TABELA 10 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos

Curto 2F	Atraso/Efeito	Curto 2F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	14,4 ms	50%LT_0%FR	32,7 ms
5%LT_25%FR	15,5 ms	50%LT_25%FR	32,7 ms
5%LT_50%FR	15,5 ms	50%LT_50%FR	32,7 ms
5%LT_80%FR	15,5 ms	50%LT_80%FR	32,7 ms
10%LT_0%FR	13,1 ms	75%LT_0%FR	65,8 ms
10%LT_25%FR	13,7 ms	75%LT_25%FR	65,8 ms
10%LT_50%FR	14,8 ms	75%LT_50%FR	65,8 ms
10%LT_80%FR	14,8 ms	75%LT_80%FR	65,8 ms
25%LT_0%FR	15,8 ms	80%LT_0%FR	Subalcance
25%LT_25%FR	16 ms	80%LT_25%FR	Subalcance
25%LT_50%FR	16 ms	80%LT_50%FR	Subalcance
25%LT_80%FR	16 ms	80%LT_80%FR	Subalcance

Apesar de não haver nenhum problema de sub ou sobrealcance da primeira zona de operação do relé 21, estes atrasos podem causar danos aos equipamentos da subestação e da linha de transmissão. Tendo em vista que a corrente de falta primária tem amplitude muito superior à corrente nominal do sistema, esta deve ser interrompida no menor espaço de tempo possível, a fim de evitar possíveis danos aos componentes do sistema.

A Figura 29 demonstra o atraso na operação do relé, causado pela severa distorção do sinal de corrente devido à saturação do TC, para a falta bifásica em 75% da LT com 0% de fluxo remanescente no núcleo. Nota-se que a impedância vista a partir do sinal ideal de corrente entra diretamente na primeira zona de operação do relé após a ocorrência da falta. Entretanto, para o sinal distorcido, tem-se um atraso considerável até a atuação do relé. Isso ocorre devido à distorção do sinal de corrente fazer com que a impedância vista pelo relé se disperse por alguns ciclos ao longo diagrama R-X, ocasionando um atraso de 65,8 ms.

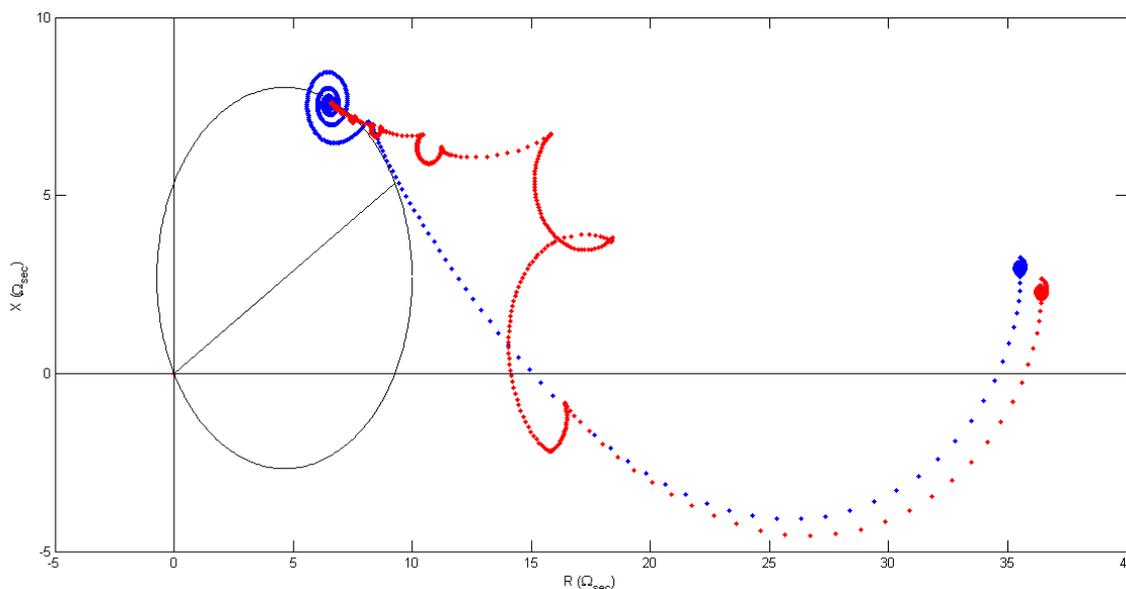


Figura 29 – Atraso na operação devido à saturação violenta do TC (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Pode-se perceber na Tabela 11, que os atrasos para as faltas bifásicas-terra também tiveram incrementos significativos com o aumento da carga. Alguns atrasos que antes eram nulos, agora passaram a ser cerca de 9 ms, chegando até a 33,1 ms como nos casos de falta em 50% da linha de transmissão.

TABELA 11 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra

Curto 2FT	Atraso/Efeito	Curto 2FT	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	8,7 ms	50%LT_0%FR	33,1 ms
5%LT_25%FR	9 ms	50%LT_25%FR	33,1 ms
5%LT_50%FR	9 ms	50%LT_50%FR	33,1 ms
5%LT_80%FR	9 ms	50%LT_80%FR	33,1 ms
10%LT_0%FR	8,4 ms	75%LT_0%FR	Subalcance
10%LT_25%FR	8,9 ms	75%LT_25%FR	Subalcance
10%LT_50%FR	9 ms	75%LT_50%FR	Subalcance
10%LT_80%FR	9 ms	75%LT_80%FR	Subalcance
25%LT_0%FR	8,9 ms	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	9,9 ms	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	10,6 ms	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	10,6 ms	80%LT_80%FR	Não atua

Os casos de subalcançe em 75% da LT se repetiram para a nova configuração de carga, porém, o caso de sobrealcançe que havia sido constatado em 80% da LT com 80% de FR, não ocorreu novamente.

A não ocorrência do problema de sobrealcançe com o aumento da carga se deve pelo fato de a saturação ser mais severa nesta configuração, como se observa na Figura 30.

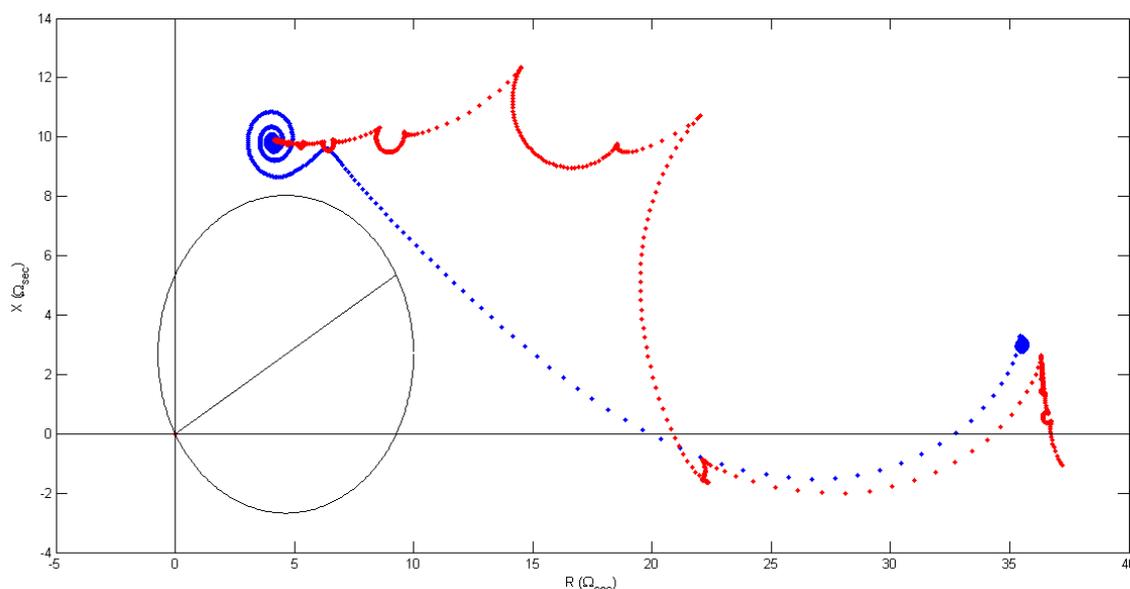


Figura 30 – Saturação violenta no limiar de operação (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Para a carga anterior de 4 ohms, a saturação fez com que a impedância real, vista pelo relé, entrasse dentro da primeira da zona de atuação indevidamente (configurando sobrealcançe conforme visto na Figura 24). A partir da mudança da carga, devido à distorção ser mais severa, a impedância vista tendeu a subir no diagrama R-X, passando mais longe da zona de atuação do relé 21, o que não configurou a atuação indevida da proteção.

Na Tabela 12, são mostrados os resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos. Percebe-se que as mesmas situações, ocorridas para as faltas anteriores devido ao acréscimo de carga, ocorreram também para as faltas trifásicas. Atrasos na operação que antes eram pequenos ou não existiam, passaram a ser atrasos de dezenas de milissegundos em alguns casos.

TABELA 12 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos

Curto 3F	Atraso/Efeito	Curto 3F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	1,9 ms	50%LT_0%FR	34,3 ms
5%LT_25%FR	7,1 ms	50%LT_25%FR	34,3 ms
5%LT_50%FR	7,7 ms	50%LT_50%FR	34,3 ms
5%LT_80%FR	7,7 ms	50%LT_80%FR	34,3 ms
10%LT_0%FR	6,4 ms	75%LT_0%FR	Subalcance
10%LT_25%FR	7,7 ms	75%LT_25%FR	Subalcance
10%LT_50%FR	8,2 ms	75%LT_50%FR	Subalcance
10%LT_80%FR	8,2 ms	75%LT_80%FR	Subalcance
25%LT_0%FR	7,8 ms	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	9 ms	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	9,9 ms	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	9,9 ms	80%LT_80%FR	Não atua

Na configuração anterior, as faltas trifásicas ocorridas em 50% da LT apresentaram atrasos nulos ou pequenos na atuação da proteção, devido ao efeito da saturação causar distorções somente após o relé já ter atuado. Com a mudança da carga, esses atrasos passaram a ser de 34,3 ms.

A Figura 31 demonstra exatamente esse efeito, onde a impedância vista pelo relé movimenta-se aleatoriamente antes de entrar na zona de operação no caso da falta trifásica em 50% da LT e com fluxo remanescente de 0%.

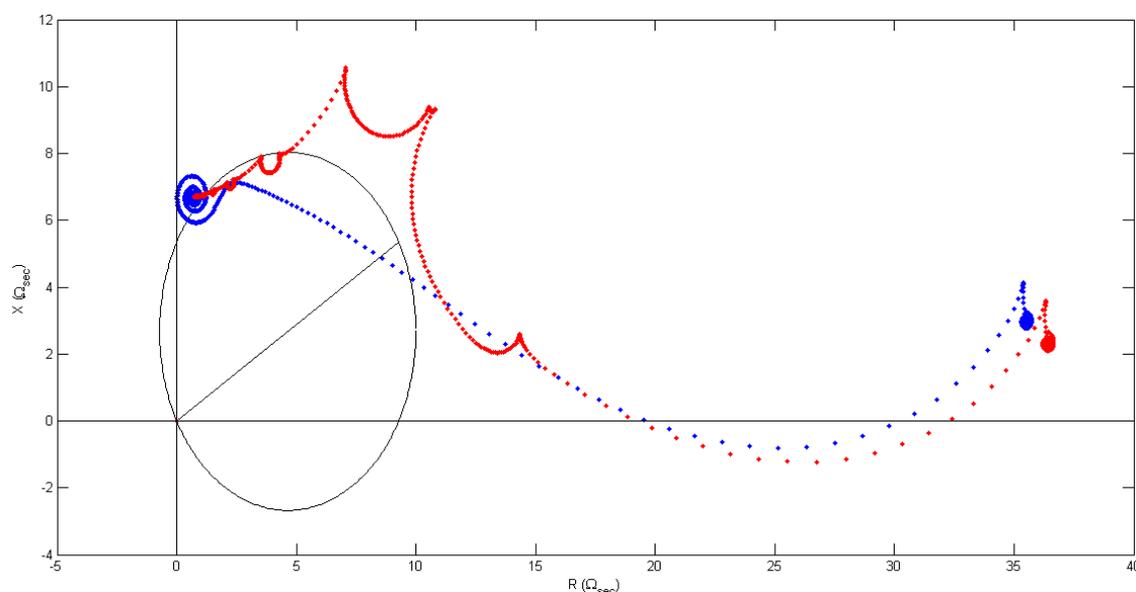


Figura 31- Atraso na operação devido a saturação (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Já os casos de subbalcance verificados para faltas em 75% da LT não se deram apenas pelo efeito da saturação, pois a impedância vista com o sinal ideal também se encontrou fora da zona de ajuste. Isto ocorreu devido ao ângulo de ajuste de 30° fazer com que esta zona fique na parte inferior do diagrama R-X e, neste caso, a impedância permaneceu na parte superior, causando a não operação indevida do relé de distância. Este caso é semelhante à falta monofásica mostrada na Figura 23.

3.4.2.2 Carga secundária de 20 ohms com ângulo de ajuste de 60°

Com um novo ângulo de ajuste para o relé de distância de 60°, repetiram-se todas as análises anteriores.

As Tabelas 13, 14, 15 e 16 apresentam os resultados computados para as faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, respectivamente, com a carga secundária de 20 ohms puramente resistivos e ângulo de ajuste de 60°.

TABELA 13 - Resultados obtidos para curtos-circuitos monofásicos

Curto 1F	Atraso/Efeito	Curto 1F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	8,4 ms	50%LT_0%FR	Subbalcance
5%LT_25%FR	8,5 ms	50%LT_25%FR	Subbalcance
5%LT_50%FR	8,7 ms	50%LT_50%FR	Subbalcance
5%LT_80%FR	8,7 ms	50%LT_80%FR	Subbalcance
10%LT_0%FR	8,4 ms	75%LT_0%FR	Subbalcance
10%LT_25%FR	8,7 ms	75%LT_25%FR	Subbalcance
10%LT_50%FR	9 ms	75%LT_50%FR	Subbalcance
10%LT_80%FR	9 ms	75%LT_80%FR	Subbalcance
25%LT_0%FR	10,1 ms	80%LT_0%FR	Não atua
25%LT_25%FR	16,2 ms	80%LT_25%FR	Não atua
25%LT_50%FR	16,2 ms	80%LT_50%FR	Não atua
25%LT_80%FR	16,2 ms	80%LT_80%FR	Não atua

Os resultados da Tabela 13 demonstram que a mudança de ângulo provocou aumento nos tempos de atraso na operação do relé de distância, em todos os casos simulados. Porém, a mudança que chama a atenção ocorre nos casos de subbalcance para faltas em 50% da LT. Estes agora não são causados devido ao ajuste do ângulo ser baixo, e sim, porque o efeito da saturação do TC faz com que a impedância real vista pelo relé seja diferente da ideal, configurando a não atuação indevida do relé de distância.

Nos casos de subbalcance em 75% da LT, o motivo é o mesmo que para as faltas monofásicas anteriores. A magnitude da corrente de curto-circuito monofásico é inferior a dos outros tipos de falta, não alcançando a zona de ajuste durante a ocorrência do defeito.

A Figura 32 apresenta o caso de curto-circuito trifásico em 50% da LT, com fluxo remanescente de 80%. Pode-se observar que a impedância ideal entra na zona de operação do relé 21, mas a saturação faz com que a impedância real vista pelo equipamento seja maior do que a de ajuste da zona, configurando um problema de subbalcance.

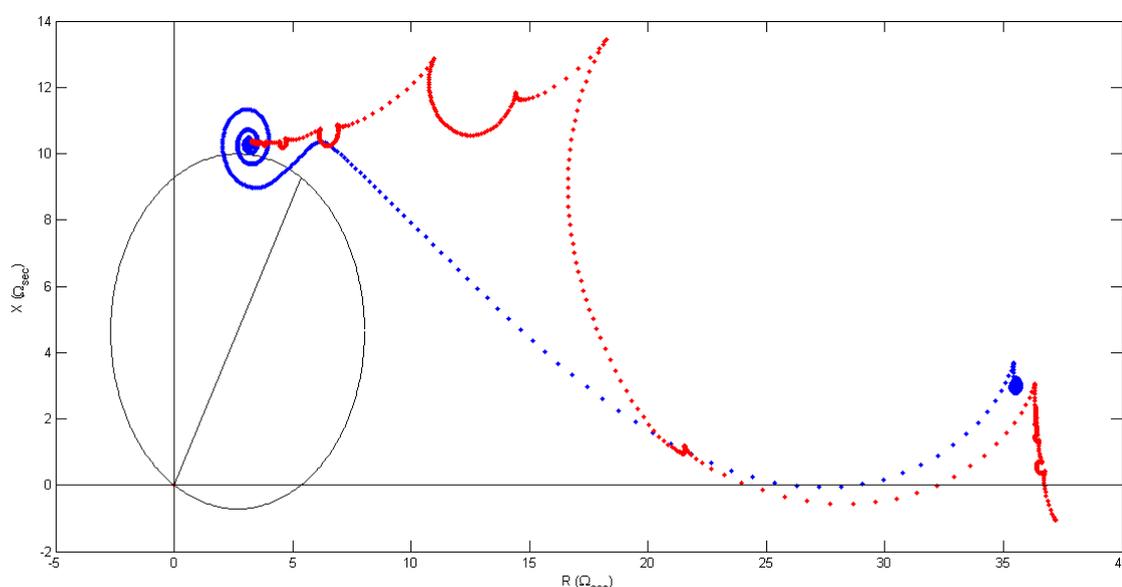


Figura 32 – Problema de subbalcance de zona em falta trifásica (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

Os resultados para as faltas bifásicas são expostos na Tabela 14. Estes demonstram aumento nos tempos de atraso para todos os casos, se comparados com os obtidos para ângulo de ajuste de 30° . Isto ocorre devido à impedância se encontrar em uma área mais abaixo no diagrama R-X. Com o aumento do ângulo, a área de ajuste do relé se inclina neste plano, fazendo com que a impedância vista pelo relé tivesse uma demora maior para entrar nesta zona.

TABELA 14 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos

Curto 2F	Atraso/Efeito	Curto 2F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	33,2 ms	50%LT_0%FR	40,4 ms
5%LT_25%FR	33,2 ms	50%LT_25%FR	40,4 ms
5%LT_50%FR	33,2 ms	50%LT_50%FR	40,4 ms
5%LT_80%FR	33,2 ms	50%LT_80%FR	40,4 ms
10%LT_0%FR	28,9 ms	75%LT_0%FR	69,3 ms
10%LT_25%FR	28,9 ms	75%LT_25%FR	69,3 ms
10%LT_50%FR	28,9 ms	75%LT_50%FR	69,3 ms
10%LT_80%FR	28,9 ms	75%LT_80%FR	69,3 ms
25%LT_0%FR	31,8 ms	80%LT_0%FR	Sub indev.
25%LT_25%FR	31,8 ms	80%LT_25%FR	Sub indev.
25%LT_50%FR	31,8 ms	80%LT_50%FR	Sub indev.
25%LT_80%FR	31,8 ms	80%LT_80%FR	Sub indev.

Para as faltas em 80% da LT foram verificados problemas de subbalcance indevidamente. Como as faltas ocorreram no limiar de operação, a impedância vista pelo relé não deveria entrar na zona de operação. Apesar de a impedância ideal se encontrar dentro desta zona, a saturação fez com que a impedância real não entrasse nela, fazendo com que a proteção não atuasse. Esse caso é semelhante a alguns citados anteriormente, como as faltas trifásicas expostas na Tabela 8.

O mesmo ocorrido para as faltas bifásicas aconteceu para os curtos-circuitos bifásicos-terra expostos na Tabela 15. Os tempos de atraso aumentaram se comparados com o ângulo de ajuste anterior. Além disso, nas faltas em 80% da LT ocorrem casos de subbalcance indevidamente, da mesma forma do ocorrido na análise anterior.

TABELA 15 - Resultados obtidos para curtos-circuitos bifásicos-terra

Curto 2FT	Atraso/Efeito	Curto 2FT	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	9,2 ms	50%LT_0%FR	32 ms
5%LT_25%FR	9,2 ms	50%LT_25%FR	32 ms
5%LT_50%FR	9,2 ms	50%LT_50%FR	32 ms
5%LT_80%FR	9,2 ms	50%LT_80%FR	32 ms
10%LT_0%FR	9,4 ms	75%LT_0%FR	61,8 ms
10%LT_25%FR	9,6 ms	75%LT_25%FR	61,8 ms
10%LT_50%FR	9,6 ms	75%LT_50%FR	61,8 ms
10%LT_80%FR	9,6 ms	75%LT_80%FR	61,8 ms
25%LT_0%FR	12,4 ms	80%LT_0%FR	Sub indev.
25%LT_25%FR	14,8 ms	80%LT_25%FR	Sub indev.
25%LT_50%FR	14,8 ms	80%LT_50%FR	Sub indev.
25%LT_80%FR	14,8 ms	80%LT_80%FR	Sub indev.

Na Tabela 16, encontram-se os resultados das análises para as faltas trifásicas, onde verifica-se a diminuição nos atrasos da atuação do relé em relação aos verificados para o ângulo

de ajuste anterior. Além disso, os casos de subalcançe verificados para faltas em 75% da LT foram causados exclusivamente pela saturação do TC.

TABELA 16 - Resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos

Curto 3F	Atraso /Efeito	Curto 3F	Atraso/Efeito
5%LT_0%FR	9 ms	50%LT_0%FR	32,4 ms
5%LT_25%FR	9 ms	50%LT_25%FR	32,4 ms
5%LT_50%FR	9 ms	50%LT_50%FR	32,4 ms
5%LT_80%FR	9 ms	50%LT_80%FR	32,4 ms
10%LT_0%FR	8,7 ms	75%LT_0%FR	Subalcançe
10%LT_25%FR	9 ms	75%LT_25%FR	Subalcançe
10%LT_50%FR	9,2 ms	75%LT_50%FR	Subalcançe
10%LT_80%FR	9,2 ms	75%LT_80%FR	Subalcançe
25%LT_0%FR	9,7 ms	80%LT_0%FR	Sub Indev.
25%LT_25%FR	11 ms	80%LT_25%FR	Sub Indev.
25%LT_50%FR	14,8 ms	80%LT_50%FR	Sub Indev.
25%LT_80%FR	14,8 ms	80%LT_80%FR	Sub Indev.

A Figura 33 apresenta o curto-circuito trifásico em 75% da LT com 0% de fluxo remanescente no núcleo do TC. Pode-se observar o caso de subalcançe referido anteriormente, causado exclusivamente pelo efeito da saturação no núcleo do transformador de corrente.

Por fim, ressalta-se que, nas faltas em 80% da LT, foram verificados casos de subalcançe ocorridos indevidamente, idênticos aos citados para as faltas bifásicas e bifásicas-terra, neste mesmo ponto da linha de transmissão.

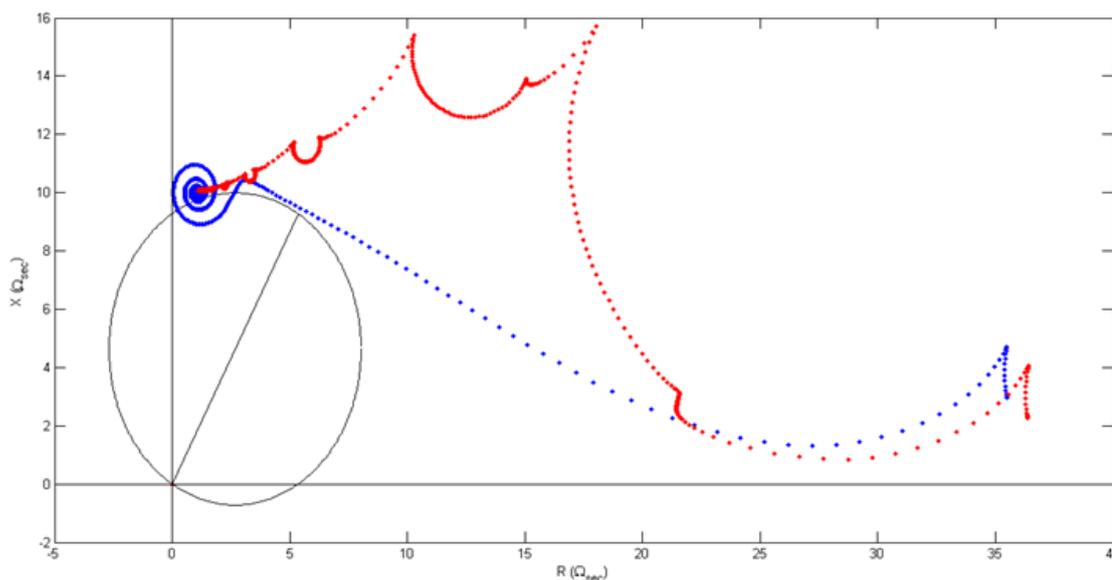


Figura 33 – Subalcançe da primeira zona de atuação do relé 21 (sinal ideal de corrente processado (azul) e sinal distorcido por saturação (vermelho)).

3.5 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentados os resultados obtidos através das análises feitas sobre os diferentes casos de curto-circuito simulados, com relação ao desempenho do relé MHO autopolarizado, frente à condição de saturação do transformador de corrente.

Vários casos foram apresentados, onde o nível de saturação foi variado, em função dos diferentes carregamentos do TC, dos diferentes níveis de fluxo remanescente no núcleo do TC e da distância até falta. Dois diferentes ângulos de ajuste do relé de distância foram ajustados para as análises.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a saturação causa sérios problemas na atuação da proteção, como grandes atrasos na operação do relé 21, ou, até mesmo, situações de sub ou sobrealcance da primeira zona de atuação deste equipamento. Tais problemas podem provocar desligamentos desnecessários de outras linhas de transmissão, o que caracteriza não atuação seletiva da proteção, além de prejudicar a operação do sistema elétrico de potência e reduzir sua confiabilidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos através de técnicas computacionais para a análise do desempenho do relé de distância, frente a diferentes condições de saturação dos transformadores de corrente.

Foram considerados inúmeros casos de curto-circuito, onde ficaram constatados diversos problemas na atuação da proteção de distância, como sub e sobrealcance, além de grandes atrasos na operação.

A variação da carga no secundário do TC influencia diretamente na severidade da saturação do núcleo. Quando a carga é incrementada, a distorção na forma de onda vista pelo relé de distância perdura por vários ciclos do sinal de corrente, fazendo que com os atrasos na operação do relé 21 aumentem consideravelmente. Além disso, problemas de subalcance e até de sobrealcance são provocados pela saturação dos TCs, violando a filosofia de proteção que prega seletividade, de modo a garantir que o menor trecho do sistema seja desligado em uma situação de contingência.

As análises de desempenho do relé de distância foram feitas para dois diferentes ângulos de ajuste, sendo eles 30 e 60°. Quando comparados, ficou clara a mudança no desempenho do equipamento. Para alguns casos verificaram-se melhorias e, para outros, os atrasos ou problemas de atuação foram constatados com maior frequência.

De forma geral, verificou-se que a saturação do TC é prejudicial ao desempenho do relé de distância simulado, o que torna necessário a aplicação de metodologias para lidar com o problema da saturação, em esquemas de proteção de distância. Tais métodos devem ser aplicados de modo que as atuações indevidas da proteção de distância sejam evitadas em situações de saturação dos TCs.

Nesse contexto, pode-se garantir a confiabilidade do sistema elétrico de potência e a seletividade dos esquemas de proteção, certificando-se da robustez da proteção de distância e situações extremas causadas pela saturação dos TCs. Diversas técnicas podem ser adotadas para contornar esse fenômeno. Algumas podem ser simples, como diminuir a carga no secundário do TC, instalando o relé de distância o mais próximo possível. Também, pode-se aumentar o diâmetro dos condutores que interligam relés e transformadores de corrente. Outras podem ser mais complexas, como por exemplo, a correção da forma de onda saturada através de técnicas computacionais como as que utilizam redes neurais, método da terceira derivada, transformada wavelet, entre outras.

Por fim, tendo em vista os resultados obtidos utilizando dois ajustes de ângulo do relé Mho, propõe-se o desenvolvimento de uma técnica de ajuste adaptável do relé de distância, em situações onde ocorra a saturação do TC a ele conectado. Tal técnica deve ser capaz de detectar a saturação e modificar o ajuste do relé, tanto no parâmetro de impedância ajustada como no ângulo de máximo torque ajustado. Isso é perfeitamente viável, uma vez que, com o advento dos relés numéricos, é possível criar algoritmos capazes de realizar as funções citadas e inseri-las nos esquemas de proteção.

4.1 Sugestão para trabalhos futuros

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

- Criação de uma técnica de ajuste adaptável para o relé de distância;
- Correção da forma de onda de corrente saturada através de técnicas computacionais de processamento de sinais;
- Desenvolvimento de metodologias para detecção e correção dos sinais distorcidos por saturação, aplicáveis à proteção de distância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SANTOS, Eduardo Machado. **Efeitos da Carga e da Impedância de Falta no Desempenho do Relé de Distância de Terra**. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- SANTOS, Eduardo Machado. **Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causadas pela Saturação de Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção**. Universidade Federal de Santa Maria, 2011.
- SAWKO P., **Impact of Secondary Burden and X/R ratio on CT Saturation**. Wroclaw University of Technology, 2008.
- MOONEY, J. and P. E., **Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 2008.
- CAMARENA, J. A. A., **Modelado y Simulación de Transformadores de Corriente con el Programa EMTP/ATP**. Un IEEE Latin America Transactions, vol. 2, 2004.
- 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.
- POWELL, L. J., **Current Transformer Burden and Saturation**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15,1979.
- KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, Edição do autor, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- 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.
- ROBERTS, J; SCHWEITZER, E. O., **Distance Relay Element Design**, Texas A&M University College Station, Texas, 1993.