UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

BRUNO LIMA ZATTONI

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO QUE ATENDEM CONSUMIDORES COM GERAÇÃO INTERNA

VITÓRIA
2019

BRUNO LIMA ZATTONI

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO QUE ATENDEM CONSUMIDORES COM GERAÇÃO INTERNA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Bruno Lima Zattoni**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista
Coorientador: MSc. Sergio Pazzini da Silva Matos

VITÓRIA
2019

Bruno Lima Zattoni

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO QUE ATENDEM CONSUMIDORES COM COGERAÇÃO

Parte manuscrita de Projeto de Graduação do aluno **Bruno Lima Zattoni**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 26 de novembro de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA:

DSc Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

DSc Augusto César Rueda Medina
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

MSc Murillo Cobe Vargas
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico este trabalho a:
Pedro Paulo
Tereza
Beatriz
Ingrid

A Deus, por tudo o que sou e por sempre olhar por mim.

A UFES, que, com seu ensino superior, gratuito e de qualidade, hoje me forma como Engenheiro Eletricista, além de todos os momentos e amigos que me deu para levar para a vida.

A Oureste e Sergio, por toda orientação nesse trabalho.

A Ingrid, pelos sorrisos, abraços e companheirismo em todos os momentos.

A Pedro Paulo, Tereza e Beatriz, por proverem toda a base necessária para chegar até aqui e todo o combustível que demando para seguir.

“Se nosso cérebro fosse tão simples ao ponto de entendê-lo, seríamos tão tolos que continuaríamos sem entendê-lo.”
(Jostein Gaarder, O Dia do Curinga)

RESUMO

Esse trabalho consiste em um estudo do desempenho função de proteção 21, o relé de distância, com ajuste baseado no critério de impedância, e no estudo da atuação dessa proteção em sistema industrial com geração interna. Essa proteção atua na separação do sistema elétrico industrial do Sistema Interligado Nacional (SIN), e os relés se localizam em duas linhas de transmissão de 138 kV, instalados na subestação do consumidor. Após estudos focados no funcionamento dessa proteção e em fatores que contribuem em um curto-circuito, foram realizadas simulações em *software* em um modelo baseado na indústria em questão. Tal modelo computacional foi desenvolvido no Simulink® e as simulações foram feitas em rotinas do MATLAB®. Em primeiro momento, os parâmetros variados foram o número de geradores em funcionamento no sistema elétrico da indústria e a resistência de falta. Assim foi possível analisar o impacto da variação desses parâmetros da confiabilidade da proteção. Após isso, foram simuladas faltas ao longo das linhas de transmissão para percepção da seletividade desse relé em sua atuação. No fim, foi possível observar os efeitos da variação da geração interna e da presença de uma resistência de falta na alteração da zona de proteção, podendo ocasionar em atuações indevidas do relé, ou em até na falta de atuação dele mesmo quando há curto-circuito dentro da zona de proteção para a qual ele foi inicialmente projetado.

Palavras-chave: Proteção. Sistemas de potência. Relé de distância.

ABSTRACT

This work consists on a performance study of the distance protection with its adjust based on a impedance criteria when applied to a industrial system with internal energy generation. This protection is responsible for the system separation from the National Energy System, and the relays are located in two 138 kV transmission lines, installed at the industry's substation. After studies focused on the operation of this protection and in further factors which contributes during a short circuit, it were performed simulations in a computational model. This model was developed in Simulink® and the simulaitons were performed using MATLAB® scripts. At first moment, the varied parameters were the number of operating generators and the fault resistance. Then, it were possible to evaluate the impact of this parameters on the system protection reliability. Afterwards, it were simulated several faults along the transmission lines to raise perception on how the protection selectiveness behaved. At the end, it was possible to observe the effects of varying generation and the presence of fault resistance alterating a protection zone, possibly causing undue tripping of the relay, or even lack of tripping when needed.

Keywords: Protection. Power systems. Distance relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos e procedimentos experimentais 14
Figura 2 – Transformação de componentes simétricos 16
Figura 3 – Ligação de um relé de distância 20
Figura 4 – Princípio de funcionamento de um relé de impedância 20
Figura 5 – Característica da operação de um relé de impedância (a) no gráfico V x I e (b) no gráfico R x X 21
Figura 6 – Diagrama unifilar de uma linha genérica 22
Figura 7 – Esquemático simplificado do SEP em estudo 24
Figura 8 – Modelo desenvolvido no *Simulink* 25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão e corrente na Barra 1 durante falta fase-terra a 90% da LT1 28
Gráfico 2 – Tensão e corrente na Barra 1 com diferentes valores de R_F 31
Gráfico 3 – Tensão e corrente na Barra 1 com variando o número de geradores em funcionamento 32
Gráfico 4 – Desempenho do critério de impedância aparente variando valores de R_F e geração interna na LT1 33
Gráfico 5 – Desempenho do critério de impedância aparente variando valores de R_F e geração interna na LT2 34
Gráfico 6 – Impedância aparente ao longo da LT1 considerando uma resistência de falta de 0 Ω 35
Gráfico 7 – Impedância aparente ao longo da LT1 considerando uma resistência de falta de 1 Ω 36
Gráfico 8 – Impedância aparente ao longo da LT2 considerando uma resistência de falta de 1 Ω 37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros das cargas para o modelo no *Simulink* 26
Quadro 2 – Dados de geração de energia elétrica nas Centrais Termelétricas (CTEs) 26
Quadro 3 – Dados de geração de energia elétrica nas Centrais Termelétricas (CTEs) 26
Quadro 4 – Dados de geração de energia elétrica nas Centrais Termelétricas (CTEs) 29
Quadro 5 – Cenários para análise da influência da resistência de falta e geração interna na impedância aparente 30
Quadro 6 – Avaliação dos efeitos da variação de geração na proteção contra curtos-circuitos ao longo das linhas de transmissão com resistência de falta de 1 Ω 37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **12**
1.1 Apresentação do objeto de pesquisa **12**
1.2 Objetivo geral e objetivos específicos **13**
1.3 Organização do trabalho **13**
2 EMBASAMENTO TEÓRICO **15**
2.1 Faltas em sistemas elétricos **15**
2.1.1 Componentes simétricas 16
2.2 Proteção de sistemas elétricos de potência **18**
2.3 Relé de distância **19**
2.3.1 Cálculo da impedância aparente 21
3 CASO EM ESTUDO **23**
3.1 Modelo computacional **24**
4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS **28**
4.1 Ajuste do relé de impedância **28**
4.2 Desempenho do critério de impedância **29**
4.2.1 Linha de transmissão 1 30
4.2.2 Linha de transmissão 2 33
4.3 Efeito na eficiência da proteção **34**
5 CONCLUSÃO **38**
5.1 Trabalhos futuros **39**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **40**
APÊNDICE A – ROTINAS DE MATLAB **41**
A.1 – Parametrização **41**
A.2 – Estudo da variação da impedância em relação à geração interna e resistência de falta **44**
A.3 – Estudo do efeito da variação da geração interna na eficiência da proteção **49**

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do objeto de pesquisa

Ao analisar dados de 2015 a 2017, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) registrou aproximadamente 3200 ocorrências por ano na rede básica brasileira. Dessas, cerca de 260 registros anuais constavam corte de carga. Além disso, 70% dessas ocorrências foram registradas em linhas de transmissão, o que é compreensível dada a exposição dessa parte do sistema elétrico (INDICADORES, 2018). Dentre os fatores riscos à boa operação das linhas de transmissão, estão: exposição ao ambiente (umidade, queimadas, descargas atmosféricas, árvores, entre outros), vandalismo, sabotagem, entre outros (KINDERMANN, 2010).

Surge, então, a necessidade de proteger o sistema elétrico para assegurar a sua operação contínua e segura. Os sistemas de proteção usados têm um custo da ordem de 2 a 5% dos equipamentos protegidos, o que os tornam economicamente viáveis. Eles devem obedecer a dois princípios gerais: assegurar o funcionamento pleno enquanto não há defeito e, quando houver, isolá-lo de forma rápida e segura (CAMINHA, 1977).

Dentre as funções de proteção mais conhecidas, como proteção contra sobrecorrente e direcionais, o elemento 21, proteção de distância, tem algumas vantagens em detrimento dos outros para aplicação em linhas de transmissão, tais quais: maior cobertura, melhor sensibilidade, facilidade de ajuste e coordenação, maior impedância de carga e zona de proteção fixa que requer pouca manutenção em caso de mudanças no sistema (ELMORE, 2003).

O elemento 21 calcula a relação de tensão e corrente em determinado ponto da linha, ou seja, enxergando a impedância da linha, e abre um disjuntor quando esse valor cai abaixo de um mínimo ajustado. O problema é que esse método de ajuste faz o relé perder sua característica direcional em faltas à terra (ROBERTS; GUZMAN; SCHWEITZER III, 1993). Além disso, a presença de uma resistência de falta e variações no fluxo de potência modificam a impedância aparente enxergada pelo relé (CALERO; GUZMÁN; BENMOUYAL, 2009).

Logo, se faz necessário métodos de ajustes de relés de distância com maior sofisticação que apenas avaliar a impedância enxergada por ele, maximizando o potencial de robustez e

versatilidade que essa proteção pode fornecer. Dessa forma, o objeto desse trabalho é o estudo da teoria desse relé e entender suas fragilidades numa aplicação real.

1.2 Objetivo geral e objetivos específicos

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho da proteção de distância quando o ajuste é baseado no critério de impedância. Para guiar esse estudo, é considerado o sistema de energia de uma siderúrgica e será avaliada a performance do relé em cenários que variam a geração interna e a resistência de falta.

Os objetivos específicos são:

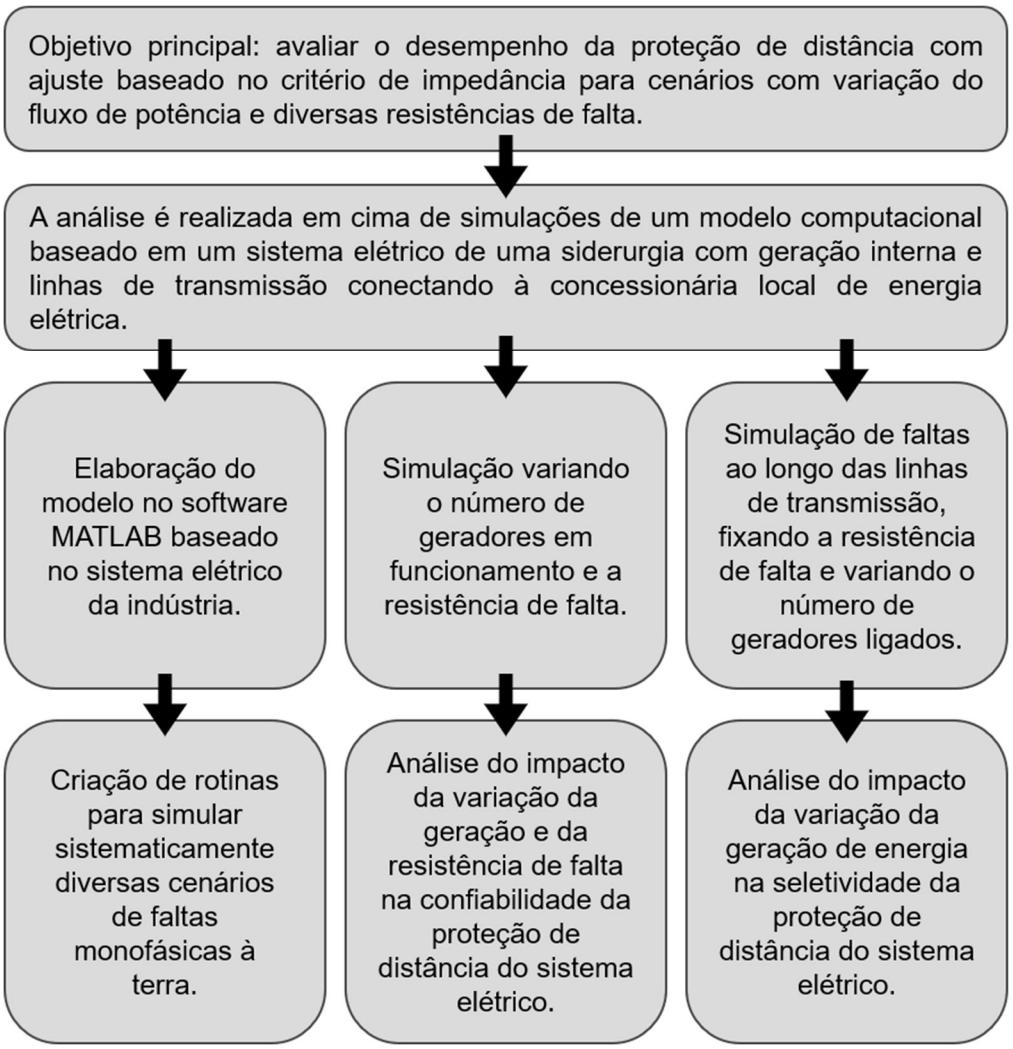
- Estudo de faltas no sistema elétrico e na proteção de linhas de transmissão;
- Estudo do relé de distância;
- Estudo do ajuste baseado no critério de impedância;
- Modelagem de um sistema com grande variação na geração interna;
- Simulação de faltas nesse sistema variando a geração interna e a resistência de falta;
- Simulação de faltas nesse sistema ao longo das linhas de transmissão;
- Análise do desempenho da proteção e atendimento a critérios de confiabilidade e seletividade.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro Capítulo trata da apresentação e motivação do objeto de pesquisa, assim como os objetivos no desenvolvimento. O Capítulo 2 mostra um resumo da teoria necessária para o desenvolvimento, assim como a apresentação do critério de ajuste cujo desempenho é o tema principal desse texto. O Capítulo 3 apresenta uma situação real que há considerável variação de geração interna e serve de base para a criação de um modelo computacional. O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento do trabalho, a metodologia usada, as simulações realizadas, seus resultados e discussão deles. As conclusões obtidas encontram-se no Capítulo 5. No Apêndice A estão as rotinas utilizadas para simular diversos cenários em sequência variando os parâmetros de interesse.

A Figura 1 resume como foi organizado o desenvolvimento desse trabalho a partir do objetivo geral e os métodos usados para se obter os resultados para a posterior análise.

Figura 1 – Objetivos e procedimentos experimentais



Fonte: Produção do próprio autor.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Faltas em sistemas elétricos

Em um Sistema Elétrico de Potência (SEP), falta é qualquer falha na rede que perturba o fluxo normal de corrente. Pode ter caráter temporário, quando por exemplo causada por descargas atmosféricas, ou permanente, quando há alguma avaria na rede que necessite de intervenção local (GRAIGNER; STEVENSON JR., 2003).

O componente do SEP que é mais vulnerável às faltas é a linha de transmissão. Nelas, ocorrem cerca de 80% das ocorrências da rede. Como esse setor do sistema de energia se estende por dezenas ou centenas de quilômetros a céu aberto, é exposto a diversas intempéries que contribuem para o acontecimento de faltas. Além disso, como seus elementos estão dispostos em série, a confiabilidade do sistema diminui (KINDERMANN, 2010).

Em linhas de transmissões, isolamento dos condutores é usualmente o realizado pelo ar ou um material de alta resistência elétrica que também serve de apoio mecânico. Mas esse isolamento é frequentemente rompido devido a diversas condições anormais, que podem variar desde fatores ambientais (presença de animais, fenômenos climáticos, queda de árvores, entre outros) ou outros fatores como presença de poeira e avarias que, aliados a uma sobrecorrente na rede ou descargas atmosféricas, podem fazer com que surja uma corrente entre as fases e/ou a terra. Essa corrente, se não for rapidamente interrompida, pode deteriorar condutores e equipamentos elétricos da rede (WARRINGTON, 2012).

Os curtos-circuitos são geralmente classificados a depender do número de fases envolvidas e se há ou não uma corrente de fuga à terra. Faltas trifásicas são as mais raras, com incidência de cerca de 5%. As mais frequentes são as monofásicas à terra, com incidência que varia de 70% a 80% (GRAIGNER; STEVENSON JR., 2003).

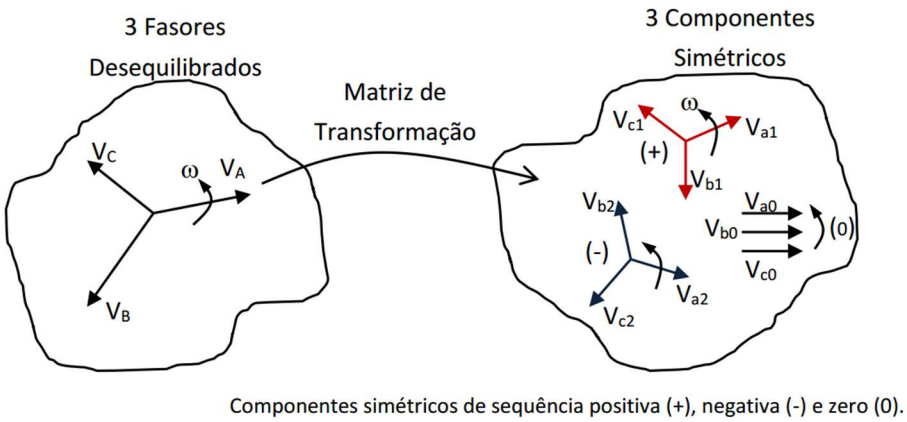
Para adequado dimensionamento da proteção, o sistema elétrico deve ser modelado, tornando possível os cálculos das correntes de curto-circuito. Quando a falta envolve fuga de correte à terra, as correntes são desequilibradas, ou seja, não correspondem a 3 fasores de igual

magnitude espaçados 120º um do outro (KINDERMANN, 2010). Assim, essas correntes (e também as tensões) são representadas com o método das componentes simétricas.

2.1.1 Componentes simétricas

O método das componentes simétricas garante que qualquer tensão ou corrente trifásica desequilibrada pode ser representada como a soma de três conjuntos de três fasores equilibrados: os de sequência positiva, os de sequência negativa e os de sequência zero (ARAGÃO FILHO, 2012). Essa noção do uso da transformação para componentes simétricas é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Transformação de componentes simétricos



Fonte: Aragão Filho (2012).

A sequência positiva consiste em um conjunto trifásico balanceado de correntes ou tensão (fase-terra ou de linha) fornecidos pela geração de um sistema. São fasores de igual magnitude e defasados por um ângulo de –120º, seguindo necessariamente a ordem a, b e c num referencial anti-horário (ou seja, simétricos). Para auxiliar a operação, é utilizado uma constante complexa de magnitude unitária com defasamento angular de 120º, conforme descrito na equação (1). Essa constante também é muito utilizada quando elevada ao quadrado, como descrito da equação (2).

$$a = 1\angle 120° \tag{1}$$

$$a^2 = 1\angle -120° \tag{2}$$

Assim é matematicamente definido a sequência positiva nas equações (3), (4) e (5).

$$I_{a1} = I_1 \tag{3}$$

$$I_{b1} = a^2 I_1 = I_1 \angle -120° \tag{4}$$

$$I_{c1} = aI_1 = I_1 \angle 120° \tag{5}$$

Já a sequência negativa corresponde a um conjunto trifásico, com fasores de mesma magnitude e defasamento de 120º. Segue-se a ordem das fases a, c e b num referencial anti-horário. Como na sequência positiva, é sempre referente a um conjunto de três fasores e a partir de um deles pode-se definir os demais, seguindo as equações (6), (7) e (8) (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

$$I_{a2} = I_2 \tag{6}$$

$$I_{b2} = aI_2 = I_2 \angle 120° \tag{7}$$

$$I_{c2} = a^2 I_2 = I_2 \angle -120° \tag{8}$$

Por fim, a sequência zero é um conjunto trifásico de fasores que são de igual magnitude e sempre estão em fase, descritos na equação (9).

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \tag{9}$$

Quaisquer valores de tensão ou corrente desbalanceados por fase podem ser obtidos pela pelas equações fundamentais, mostradas nas equações (10), (11) e (12).

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \tag{10}$$

$$I_b = a^2 I_1 + aI_2 + I_0 \tag{11}$$

$$I_c = aI_1 + a^2 I_2 + I_0 \tag{12}$$

De forma inversa, uma vez conhecidas as componentes desbalanceadas, pode-se definir matematicamente as sequências a partir das equações (13), (14) e (15).

$$I_0 = \frac{1}{3}\left(I_a + I_b + I_c\right) \tag{13}$$

$$I_1 = \frac{1}{3}\left(I_a + aI_b + a^2 I_c\right) \tag{14}$$

$$I_2 = \frac{1}{3}\left(I_a + a^2 I_b + aI_c\right) \tag{15}$$

O entendimento da teoria das componentes simétricas é fundamental para o posterior entendimento de como deve ser ajustado o relé de distância para a correta atuação em faltas monofase-terra. Mas antes, deve-se entender o que é um sistema de proteção e seus requisitos de projeto.

2.2 Proteção de sistemas elétricos de potência

Um conjunto coerente de proteção deve atuar de forma a assegurar ao máximo a continuidade do fornecimento de energia elétrica e intervir assertivamente visando a segurança de equipamentos, processos e pessoas (CAMINHA, 1977).

Os equipamentos de proteção são custosos e nem são vitais para a operação normal do sistema. Porém, fatores imprevisíveis e inevitáveis, como fenômenos naturais, queda de árvores, falhas de equipamento ou mesmo erro humano, ameaçam a integridade da rede o tempo todo, é mais barato proteger o sistema que lidar com possíveis danos (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

A adequada proteção leva em conta 5 principais características de projeto:

- Confiabilidade: garantia de que a proteção atuará, e somente atuará, quando necessário;
- Velocidade: prever a falta pra atuação instantânea é impossível, mas é importante prezar pela rapidez na correta detecção e isolamento da falta;
- Seletividade: distinção das zonas de proteção para atuação mais precisa e buscar afetar a menor área possível;

- Simplicidade: uso do menor número de equipamentos, assim como menor complexidade nos circuitos, para atingir os objetivos da proteção;
- Economia: atendimento às expectativas do projeto de proteção com o menor custo possível.

Relés são equipamentos instalados em sistemas elétricos de potência que tem o objetivo de detectar condições de risco dentro de uma área específica. Os relés que são voltados para a proteção do sistema geralmente estão conectados a um disjuntor, de forma a isolar o defeito e proteger a carga ou geração (ELMORE, 2003).

Em linhas de transmissão, a proteção é geralmente baseada em relés de sobrecorrente, relé de subtensão e relé de distância. A proteção mais confiável seria as que comparam a corrente entrando no circuito e a corrente que sai dele. Porém, para linhas de média e alta tensão, com grandes distâncias, essa estratégia se torna inviável. Assim a proteção de distância se torna relevante, capaz ainda de proteger barras e linhas vizinhas através das demais zonas de proteção (CAMINHA, 1977).

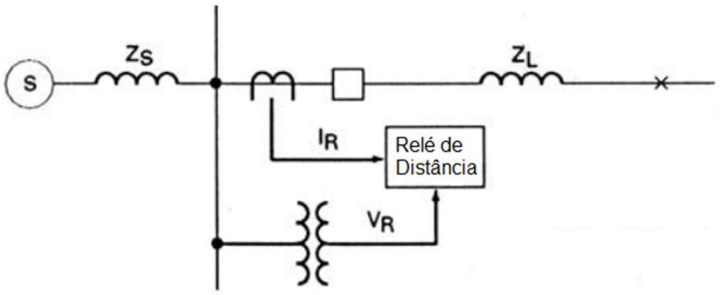
2.3 Relé de distância

A análise de um relé de distância é baseada numa razão entre valores de corrente e tensão, o que pode ser expresso em termos de impedância. Ganhou esse nome pois impedância é uma medida elétrica de distância em linhas de transmissão (MASON, 1956).

Geralmente é instalado próximo a uma barra, onde é conectado por um transformador de potencial e, assim, capta dados da tensão nesse ponto. Na saída para a linha de transmissão, é conectado por um transformador de corrente e, assim, também monitora essa variável. Esse esquema de ligação está ilustrado na Figura 3.

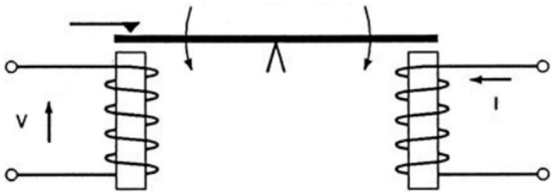
O princípio funcionamento do relé de impedância é um balanceamento entre o torque aplicado pela corrente contra o torque aplicado pela tensão, de forma posicionar uma viga que pode ou estar balanceada em condições normais ou fechar um contato que aciona o disjuntor em caso de falta. A Figura 4 ilustra esse conceito.

Figura 3 – Ligação de um relé de distância



Fonte: Elmore (2003).
Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 4 – Princípio de funcionamento de um relé de impedância



Fonte: Kindermann (2012).

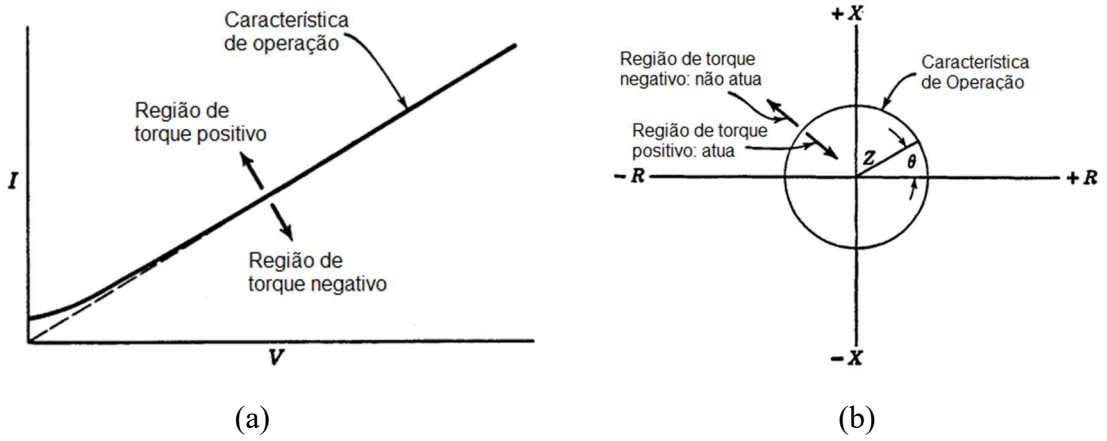
No esquema apresentado, a tensão é a grandeza de restrição, que produz um torque negativo, ou seja, contrário à ação de fechamento do relé. Isso porque, numa situação de curto-circuito, a tendência é que haja um afundamento da tensão. Logo, a indicação de uma maior tensão é uma evidência contrária à presença de uma falta na linha. Já a corrente é uma grandeza de operação, que produz um torque positivo, favorável a ação de fechamento do contato do relé. Como, numa falta, a tendência da corrente é de aumentar, o relé deve interpretar uma sobrecorrente como um fator importante para sua atuação (KINDERMANN, 2012).

A Figura 5a mostra um gráfico com a relação entre tensão, corrente e a característica de operação do relé. Maiores valores de corrente associados a menores valores de tensão caracterizam a região de torque positivo, que fica acima da linha do limiar de operação do relé. Abaixo dessa linha, na região de torque negativo, não há operação da proteção (MASON, 1956).

A visualização mais comum da característica de operação de um relé de impedância é apresentada na Figura 5b. Nesse diagrama fasorial R + jX, o limiar de operação é representado por uma circunferência centrada na origem (que indica o ponto onde o transformador de

potencial está instalado), e a região de operação (quando o torque no relé é positivo) é demarcada por todo o círculo contido na circunferência. Em suma, na ocorrência de um curto-circuito, a tensão diminuirá e haverá uma sobrecorrente. Pela relação Z = V/I, a impedância enxergada pelo relé diminuirá, entrando na região de operação do relé.

Figura 5 – Característica da operação de um relé de impedância (a) no gráfico V x I e (b) no gráfico R x X



Fonte: Mason (2012).
Nota: Adaptado pelo autor.

2.3.1 Cálculo da impedância aparente

O trabalho de Roberts, Guzman e Schweitzer III (1993) mostra que o cálculo da impedância aparente, para uma falta fase-terra, deve ser realizado seguindo as equações (16), (17) e (18). O diagrama do modelo genérico que ilustra os parâmetros usados nas equações está na Figura 6.

$$Z = \frac{V_A}{I_A + k_0 I_R} \tag{16}$$

$$V_A = mZ_{1L}\left(I_A + k_0 I_R\right) + I_F R_F \tag{17}$$

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \tag{18}$$

onde:

V_A é a tensão da fase A medida na Barra S;

m é a distância em p.u. da falta até a Barra S;

Z_{1L} é a impedância de sequência positiva da linha;

Z_{0L} é a impedância de sequência zero da linha;

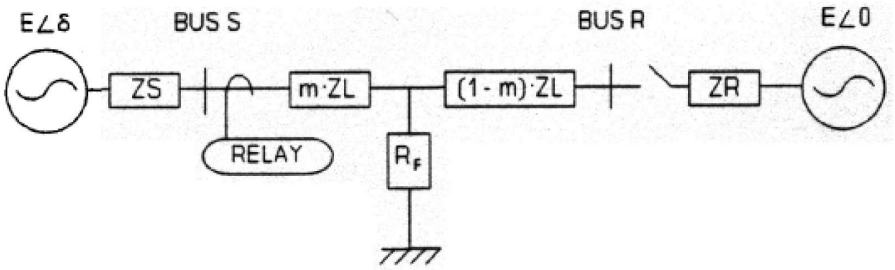
I_A é a corrente da fase A medida na Barra S;

I_R é a corrente residual na Barra S, sendo que $I_R = 3I_0$;

R_F é a resistência de falta;

I_F é a corrente que flui em R_F.

Figura 6 – Diagrama unifilar de uma linha genérica



Fonte: Roberts, Guzman e Schweitzer III (1993).

Esse método de ajuste será usado nas simulações deste trabalho e seu desempenho será avaliado perante cenários que envolvem variação do fluxo de potência nas linhas de transmissão (que muda bastante em reflexo ao número de geradores operantes dentro do consumidor) e da resistência de falta. Para esse estudo, será considerado um caso real de uma indústria do ramo siderúrgico, que será apresentada no próximo capítulo.

3 CASO EM ESTUDO

Para a realização desse trabalho, será tomado como base o sistema elétrico de potência de uma multinacional do ramo siderúrgico localizada no município de Serra, Espírito Santo. Possui uma carga instalada de 280 MW e, para atender tal demanda, dispõe de 6 centrais termoelétricas (CTE), que usam do calor ou dos gases oriundos do processo produtivo do aço para gerar energia elétrica. A capacidade de geração é de 420 MW, porém a potência gerada pode variar bastante a depender de diversos fatores, como: disponibilidade dos gases, paradas programadas e não programadas das CTEs, baixa qualidade dos gases, entre outros. Assim, muitas vezes há um número menor de geradores em funcionamento.

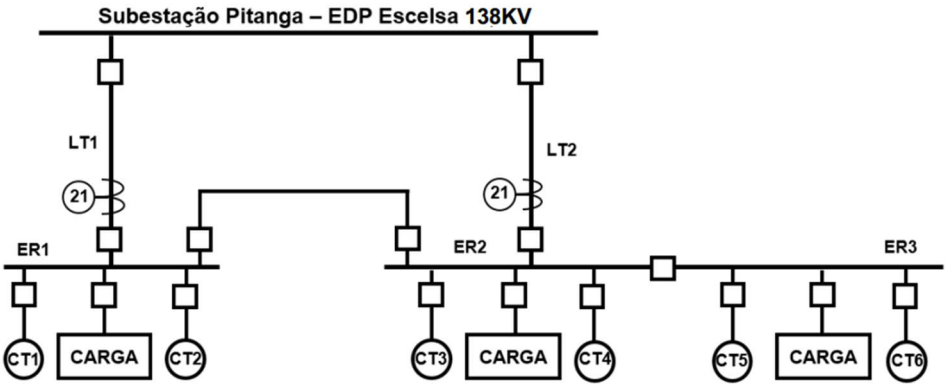
A planta é conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através de duas linhas de transmissão de 138 kV, que ligam o sistema elétrico da empresa a uma subestação da concessionária local de energia. Dada a capacidade de geração consideravelmente maior que a carga instalada, a empresa frequentemente se encontra numa situação de exportação de energia elétrica para o SIN. Mas, em outros momentos, pode estar recebendo energia da rede externa. Logo, percebe-se que o fluxo de potência nessas linhas de transmissão possui uma grande variabilidade.

Uma siderúrgica possui áreas e máquinas muito sensíveis à qualidade do fornecimento de energia elétrica, e, para assegurar uma operação confiável e contínua, garantindo a segurança humana e dos equipamentos, há a necessidade de um robusto sistema de proteção. Qualquer distúrbio que acontece no SIN deve ser detectado e, fugindo das parametrizações que garantem a segurança da produção, a proteção deve atuar no sentido de separar a usina do SIN até que o fornecimento volte aos padrões normais. Os tipos de proteção que geralmente atuam nessa separação são as de subtensão (proteção 27), subfrequência (proteção 81) e distância (proteção 21) (MATOS; ENCARNAÇÃO, 2015).

A Figura 7 mostra uma representação simplificada da composição do sistema elétrico de 138 kV dessa indústria, que é distribuído em 3 subestações, onde são conectadas cargas e 2 geradores em cada. Cada gerador possui um transformador exclusivo. A Estação Recebedora 1 (ER1) e a Estação Recebedora 2 (ER2) são conectadas a uma subestação da concessionária local de energia por meio da Linha de Transmissão 1 (LT1) e da Linha de Transmissão 2 (LT2),

respectivamente. Em cada uma dessas linhas, posicionados próximos às subestações da siderúrgica, há relés de distância para monitoramento da tensão e corrente.

Figura 7 – Esquemático simplificado do SEP em estudo



Fonte: Matos e Encarnação (2015).

Esse trabalho será focado no desempenho a proteção de distância na correta detecção de faltas e na precisa atuação, respeitando os princípios de confiabilidade e seletividade que devem ser prezados num bom sistema de proteção de sistema elétrico.

A proteção de distância é frequentemente parametrizada pela análise de impedância aparente, e será verificada a eficiência deste método no sistema anteriormente descrito. Como tensão e corrente nas LTs possuem grande variabilidade devido diferentes cenários de geração interna, somado a possíveis resistências de falta, espera-se identificar as tendências de cada cenário de geração e observar o desempenho da proteção nessas diferentes condições.

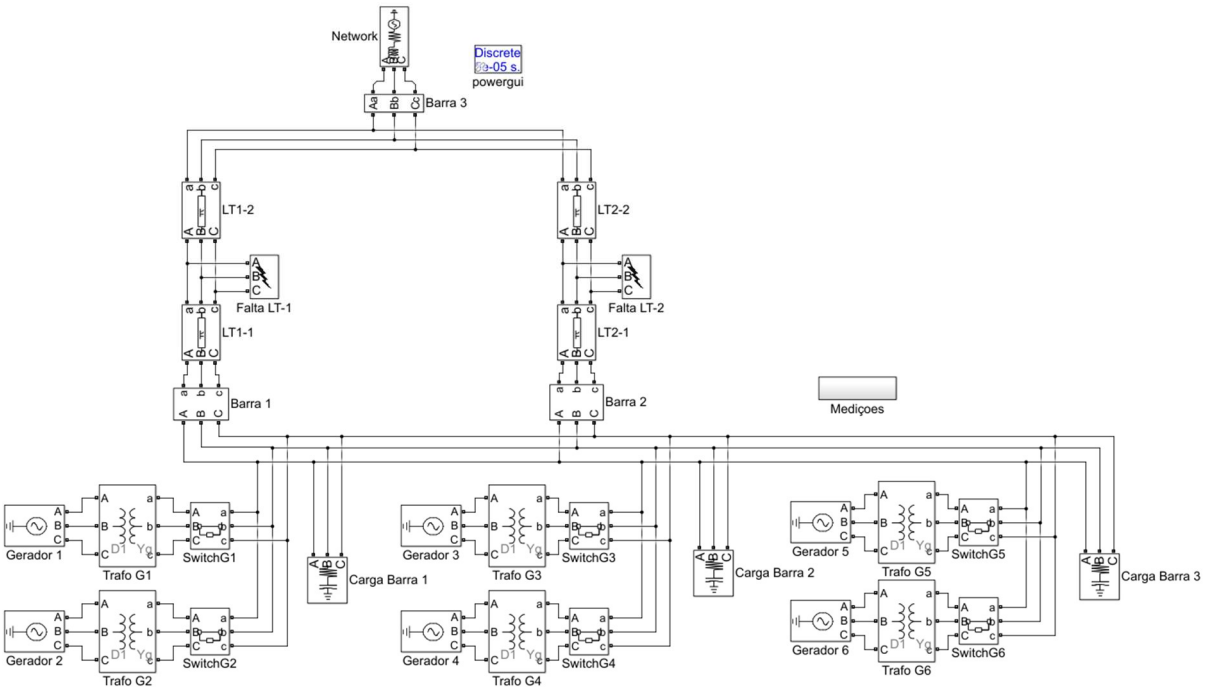
3.1 Modelo computacional

O ponto de partida foi um modelo completo do sistema elétrico dessa indústria no software *PowerTools for Windows*® (PTW), utilizado no trabalho de Matos e Encarnação (2015), para observar o impacto da geração distribuída nessa mesma proteção de distância. Nesse trabalho há um maior número de parâmetros a variar e, assim, um maior número de cenários a serem simulados, além de haver a intenção de investigar faltas fase-terra. Foi, então, optado por replicar esse modelo computacional no *software* MATLAB®.

O *Simscape Power Systems* possibilita criar um modelo com uma completa biblioteca de componentes de um sistema elétrico de potência, e permite a simulação de faltas, fluxo de potência e outras análises. Além de possuir uma interface com o MATLAB®, onde pode-se criar rotinas e parametrizações para as simulações, além de permitir uma melhor análise dos resultados (SIMSCAPE, 2019).

Primeiramente, foram extraídos dados do modelo do PTW para criar um modelo no *Simulink* topologicamente semelhante ao mostrado na Figura 7, o que resultou no modelo mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Modelo desenvolvido no *Simulink*



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a construção do sistema a ser simulado no Simulink, foi necessário extrair do modelo do PTW informações dos componentes como: parâmetros das LTs, características dos geradores, equivalente do SIN na subestação de conexão, entre outras. Mas, para representação de toda a carga da usina em três blocos de parâmetros concentrados, foi simulado no PTW o fluxo de potência das barras das três Estações Recebedoras da empresa sem a presença dos geradores. O resultado obtido é expresso no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros das cargas para o modelo no *Simulink*

Subestação	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa Capacitiva (-Mvar)
ER1	131,44	82,11
ER2	152,75	69,26
ER3	91,79	64,47

Fonte: Produção do próprio autor.

Foram também obtidos parâmetros das seis centrais termelétricas da usina. Elas geram no nível de tensão de 12,5 ou 13,8 kV e são conectadas por transformadores de potência nas Subestações Recebedoras, que operam em 138 kV. Seus dados de geração estão expressos no Quadro 2.

Quadro 2 – Dados de geração de energia elétrica nas Centrais Termelétricas (CTEs)

Parâmetro	CTE 1	CTE 2	CTE 3	CTE 4	CTE 5	CTE 6
Tensão (kV)	12,50	12,50	13,80	12,50	12,50	12,50
Ângulo (°)	40,20	16,36	0,00	0,00	0,00	0,00
Potência Ativa (MW)	26,20	68,10	73,00	35,20	65,00	74,80
Potência Reativa (Mvar)	31,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Produção do próprio autor.

As duas linhas de transmissão são de 138 kV, e avançam em torres de transmissão por cima de cinco bairros residenciais, regiões de indústria e preservação ambiental até chegar na subestação da concessionária de energia, num percurso de cerca de 12 km. Foram extraídos do modelo os parâmetros distribuídos das linhas, expressos em componentes simétricas, de sequência positiva e zero. Seus valores são mostrados no Quadro 3.

Quadro 3 – Dados de geração de energia elétrica nas Centrais Termelétricas (CTEs)

Parâmetro	LT1		LT2	
Comprimento (km)	11,7		12,5	
	Seq. Pos.	Seq. Zero	Seq. Pos.	Seq. Zero
Resistência (Ω/km)	0,0984	0,1969	0,0988	0,1977
Indutância (H/km)	0,4532	0,9064	0,4532	0,9064

Fonte: Produção do próprio autor.

Nos cálculos, foram considerados transformadores de potencial e de corrente de relação de transformação RTC = 240 e RTP = 1200 para que os valores encontrados de impedância

enxergada no relé fossem referidos ao secundário, ou seja, aos valores que efetivamente serão lidos pela proteção de distância.

No próximo capítulo, esse modelo computacional será usado em diversos cenários de simulação para análise do desempenho da proteção de distância ajustada pela impedância sob variação de fluxo de potência e em diversos valores de resistência de falta.

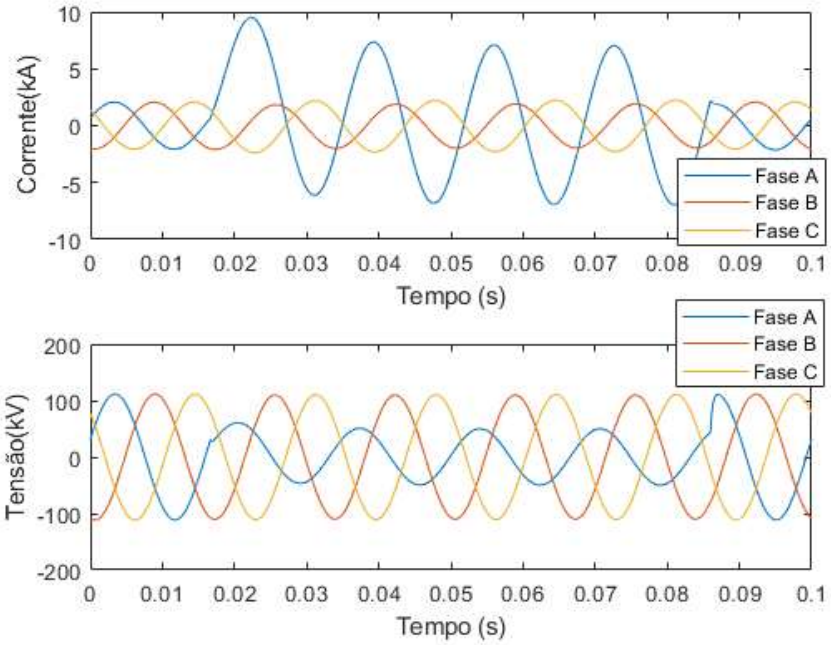
4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Uma vez conhecido o SEP estudado, grande parte do desenvolvimento deste trabalho consiste em executar diversas simulações de um modelo computacional do sistema em um *software* que permita observar os valores de tensão e corrente enxergados pelo relé e, ao mesmo tempo, a corrente de falta. Além disso, é necessário poder simular diversos cenários variando os seguintes parâmetros: número de geradores em funcionamento, resistência de falta e o ponto na linha de transmissão onde ocorre o curto-circuito.

4.1 Ajuste do relé de impedância

Suponha-se um curto circuito fase-terra a 90% da LT1 (ou seja, a 10,53 km da Barra 1) com resistência de falta desprezível, sendo a fase atingida a A. Neste cenário inicial, todos os geradores estão em funcionamento. Na Figura 9 é mostrado o comportamento da tensão e corrente no momento de ocorrência vistos na Barra 1 (localizada no início da LT1, no lado da indústria). O comportamento é o esperado, com um afundamento da tensão que chega ao valor mínimo de 49,51 kV e um pico de corrente que chega ao valor máximo de 9,50 kA.

Gráfico 1 – Tensão e corrente na Barra 1 durante falta fase-terra a 90% da LT1



Fonte: Produção do próprio autor.

O cálculo da impedância aparente é feito com base no artigo de Roberts, Guzman e Schweitzer III (1993), utilizando a equação (16). Nessa simulação, foram observados os valores descritos no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados de geração de energia elétrica nas Centrais Termelétricas (CTEs)

Parâmetro	Valor	Unidade
Corrente na fase A medida na Barra 1	$8.275,9\angle -8,50°$	A
Corrente residual medida na Barra 1	$6.616,3\angle 0,57°$	A
Corrente de falta	$30.804,0\angle -79,22°$	A
Distância da falta até a Barra 1	0,90	p.u.
Resistência de falta	0	Ω

Fonte: Produção do próprio autor.

Para todas as simulações, os valores calculados de impedância são referidos ao secundário dos transformadores de corrente e potencial. Para isso, foram consideradas as relações de transformação 1200-5 A (RTC = 240) e 138000-115 V (RTP = 1200). Para esse cenário de simulação, aplicando os valores das Quadros 3 e 4 nas equações (16), (17) e (18), tem-se que |Z| = 0,9767 pu. Logo, para a LT1, esse é o ajuste a ser adotado na zona 1 do relé de distância localizado na Barra 1.

Seguindo os mesmos critérios de simulação e procedimentos de cálculos, o ajuste a ser adotado para a zona 1 da LT2 é a impedância |Z| = 1,0436 p.u.

4.2 Desempenho do critério de impedância

Para verificar a eficiência do critério de impedância aparente em diferentes condições de fluxo de potência e resistências de falta, foram simulados 20 cenários, descritos no Quadro 5. Desta forma, espera-se avaliar os sub e sobrealcances do critério para diferentes valores de resistência de falta e condições de fluxo de potência.

Para cada cenário simulado, foi observado o comportamento da tensão e corrente medidos na Barra 1 e, em seguida, calculado a impedância aparente nesse ponto. Tal processo foi aplicado para faltas fase-terra na fase A, simulando um curto-circuito a 90% de cada linha. Foram medidos para os cálculos a corrente de falta e as correntes que passam pelas barras pertencentes

ao sistema elétrico da indústria. O curto-circuito acontece imediatamente um ciclo após o início da simulação, e é extinguido após mais 4 ciclos. A análise foi feita para cada uma das linhas de transmissão, e os resultados são apresentados nas seções seguintes.

Quadro 5 – Cenários para análise da influência da resistência de falta e geração interna na impedância aparente

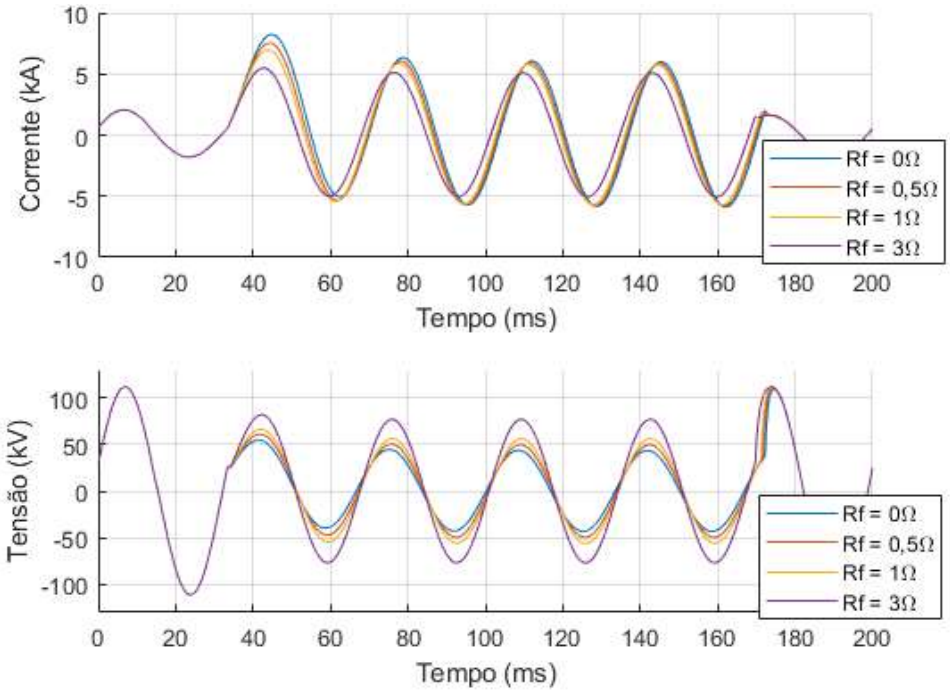
Cenário	Nº de Geradores Ligados	Resistência de Falta (Ω)
1	6	0
2	5	0
3	4	0
4	3	0
5	2	0
6	6	0,5
7	5	0,5
8	4	0,5
9	3	0,5
10	2	0,5
11	6	1
12	5	1
13	4	1
14	3	1
15	2	1
16	6	3
17	5	3
18	4	3
19	3	3
20	2	3

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.1 Linha de transmissão 1

A LT1 tem 11,7 quilômetros de extensão. Assim, as simulações aplicaram uma falta fase-terra na fase A a 10,53 quilômetros da Barra 1, onde está localizado os medidores atrelados à proteção de distância. Considerando 5 geradores em funcionamento, foram simuladas 4 faltas variando a resistência de falta entre os valores de 0, 0,5, 1 e 3 Ω vistos pelos secundários dos transformadores de potencial e corrente, o que equivale a 0, 2,5, 5 e 15 Ω no primário. Esses cenários equivalem aos números 2, 7, 12 e 17 da Quadro 5. As curvas de corrente e tensão na fase A podem ser observadas no Gráfico 10.

Gráfico 2 – Tensão e corrente na Barra 1 com diferentes valores de R_F



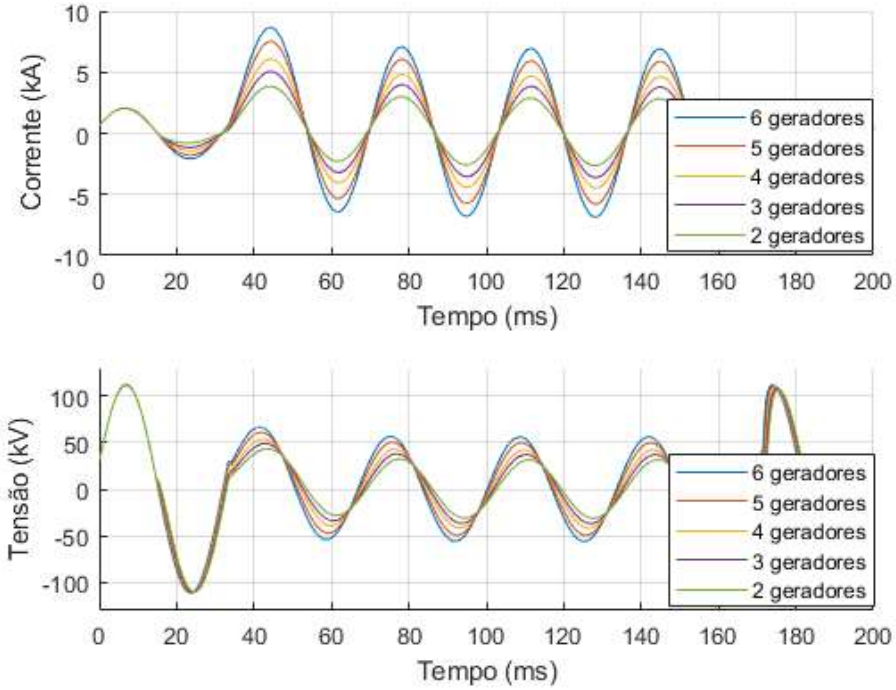
Fonte: Produção do próprio autor.

Pôde ser observado que uma maior resistência de falta causa um menor afundamento na tensão medida na Barra 1, assim como uma menor sobrecorrente. É um resultado dentro da expectativa, visto que a presença de um alto valor de resistência na falta implica em uma menor corrente de falta, o que causa menos impactos em relação à operação normal.

Também foi simulado diferentes números de geradores ligados para verificar o impacto da variação da geração nos valores de tensão e corrente medidos na barra 1 em momentos de curto-circuito considerando uma resistência de falta de 0,5 Ω no secundário dos transformadores. Essas situações simuladas correspondem aos cenários de número 6, 7, 8, 9 e 10 no Quadro 5. As curvas de tensão e corrente referente a esses cenários simulados são exibidos no Gráfico 3.

Observa-se que o a variação da geração interna impacta mais nos registros de subtensão e sobrecorrente que a variação da resistência de falta. É possível constatar que uma menor geração interna implica em um menor afundamento da tensão e em menor registro de sobrecorrente.

Gráfico 3 – Tensão e corrente na Barra 1 com variando o número de geradores em funcionamento



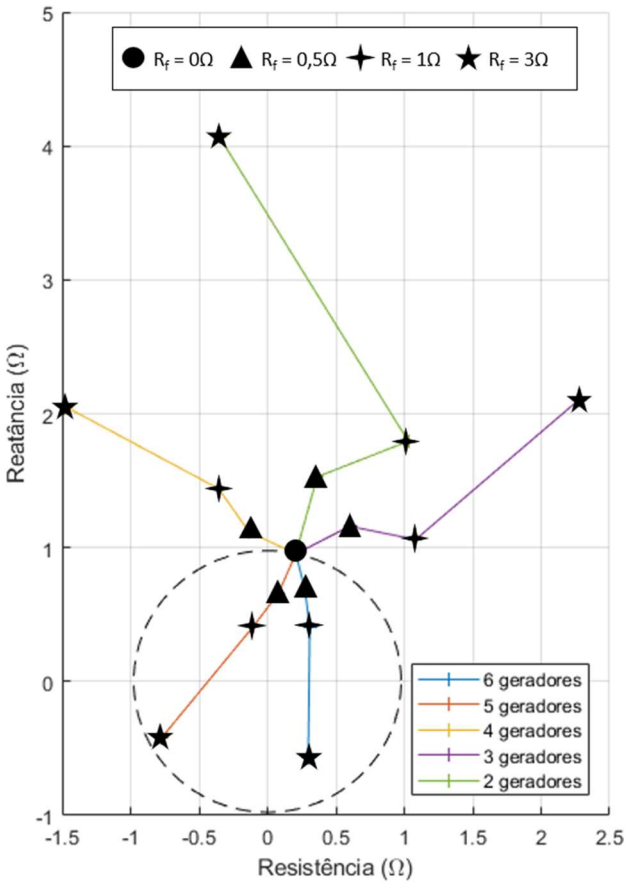
Fonte: Produção do próprio autor.

Até esse momento, foi analisado o impacto da variação da resistência de falta mantendo constante a geração interna e vice-versa, observando os efeitos dessas variações na tensão e corrente medidos na barra 1. Será agora analisada as simulações de todos os 20 cenários mostrados no Quadro 5 e calculada a impedância da linha enxergada na Barra 1 para cada um deles. A distribuição dos valores calculados de resistência aparente no plano é mostrada na Gráfico 4, junto com o círculo da impedância baseados no ajuste encontrado na Seção 4.1.

Percebe-se que os efeitos aparecem a partir do momento em que há uma resistência de falta envolvida, visto que para $R_F = 0\ \Omega$ a impedância observada é constante, independente do cenário de geração de energia dentro da usina. Quando os valores de resistência de falta são incrementados, observa-se um afastamento quase radial em relação ao ponto de $R_F = 0\ \Omega$, e a direção desse afastamento é relacionada ao número de geradores em funcionamento.

Para 5 ou 6 CTEs operantes, há uma diminuição dos valores de impedância à medida que a resistência de falta aumenta. Para os cenários simulados, as impedâncias se situam dentro da zona de ajuste do relé, logo, a atuação do relé se dará nessas situações.

Gráfico 4 – Desempenho do critério de impedância aparente variando valores de R_F e geração interna na LT1



Fonte: Produção do próprio autor.

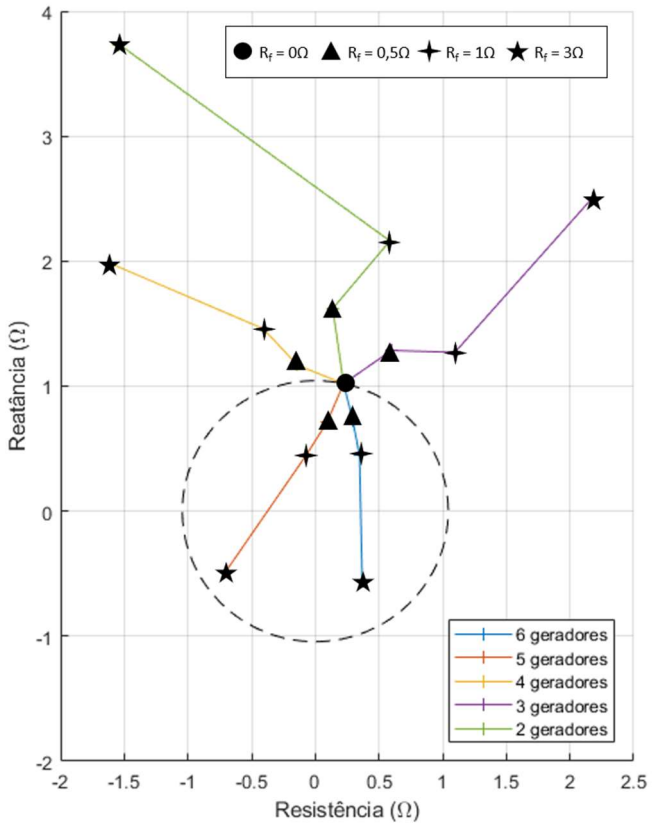
Já para 4 ou menos CTEs em funcionamento, há um aumento dos valores de impedância quando os valores de resistência aumentam. Esses valores se afastam do círculo que descreve a zona de atuação do relé, o que indica que, nesses cenários, a proteção de distância não atuaria.

4.2.2 Linha de transmissão 2

A LT2 é levemente maior que a estudada anteriormente: possui 12,5 quilômetros de extensão. Conecta a ER2 a uma subestação da concessionária local de energia. Diretamente ligada na ER2, está a ER3, e cada uma dessas duas subestações tem 2 geradores e várias cargas ligadas.

Os efeitos observados nessa linha de transmissão são bem parecidos com os relatados para a LT1, portanto, será apenas mostrado o gráfico de distribuição dos valores de impedância aparente dos 20 cenários simulados, que é apresentado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Desempenho do critério de impedância aparente variando valores de R_F e geração interna na LT2



Fonte: Produção do próprio autor.

Assim como na LT1, quando há 5 ou 6 CTEs em funcionamento, maiores valores de resistência de falta implicam em menores valores de impedância, garantindo a atuação da proteção nesses cenários. Já para uma menor geração dentro da indústria, os valores de impedância se afastam a zona de atuação, de maneira pouco menos intensa em relação ao observado na LT1.

4.3 Efeito na eficiência da proteção

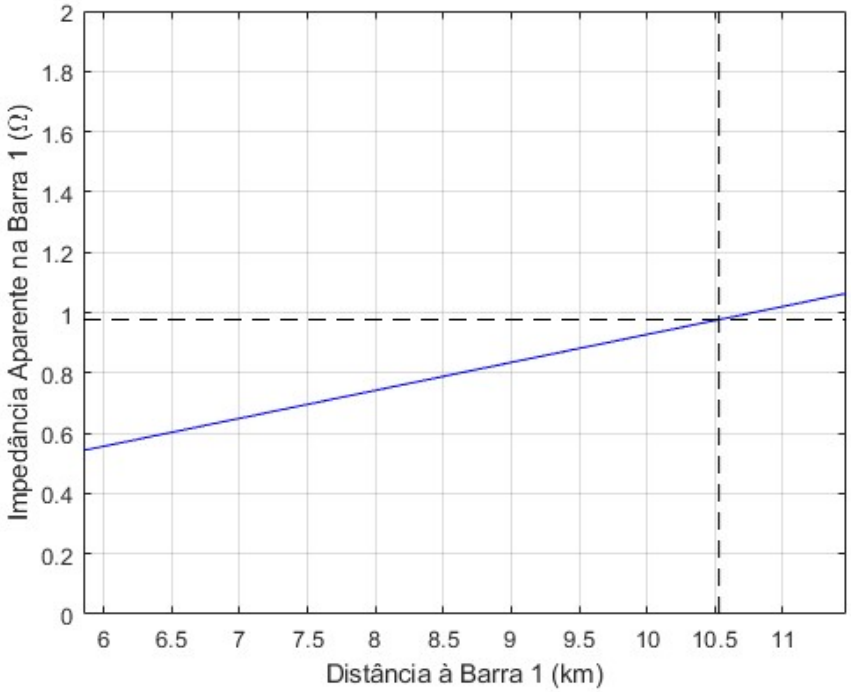
Na seção anterior foi verificado que caso a falta ocorra a 90% das linhas de transmissão, ou seja, na zona 1 de proteção, há uma garantia de atuação para $R_F = 0\ \Omega$. Contudo, para valores maiores de resistência de falta, nem sempre esse relé atua.

Nesse sentido, as preocupações mais pertinentes no projeto da proteção de sistemas elétricos são seletividade e confiabilidade do sistema de proteção. Isto é, garantir que a proteção atue somente quando realmente deva atuar, e, em hipótese nenhuma, atuar quando não devia.

Para a LT1, foi definido o ajuste para a zona 1 de 0,9767 Ω para a zona 1 (90%). Nesse ajuste, é esperada a atuação do sistema de proteção para qualquer falta que ocorrer nos primeiros 10,53 quilômetros dessa linha de transmissão. É esperado também que a proteção da zona 1 não atue para faltas que ocorram em distâncias superiores a esse limite de 10,53 quilômetros.

Essa condição normal de operação é ilustrada no Gráfico 6. Nela é apresentada a situação para $R_F = 0\ \Omega$, assim, representa o comportamento para qualquer cenário de geração. Em distâncias superiores a 10,53 quilômetros, a impedância é maior que o ajuste de 0,9767, portanto, não há a atuação da proteção. Já para distâncias menores que o limite de 90% da LT1, a impedância atinge valores menores que o ajuste e, assim, a proteção atua.

Gráfico 6 – Impedância aparente ao longo da LT1 considerando uma resistência de falta de 0 Ω

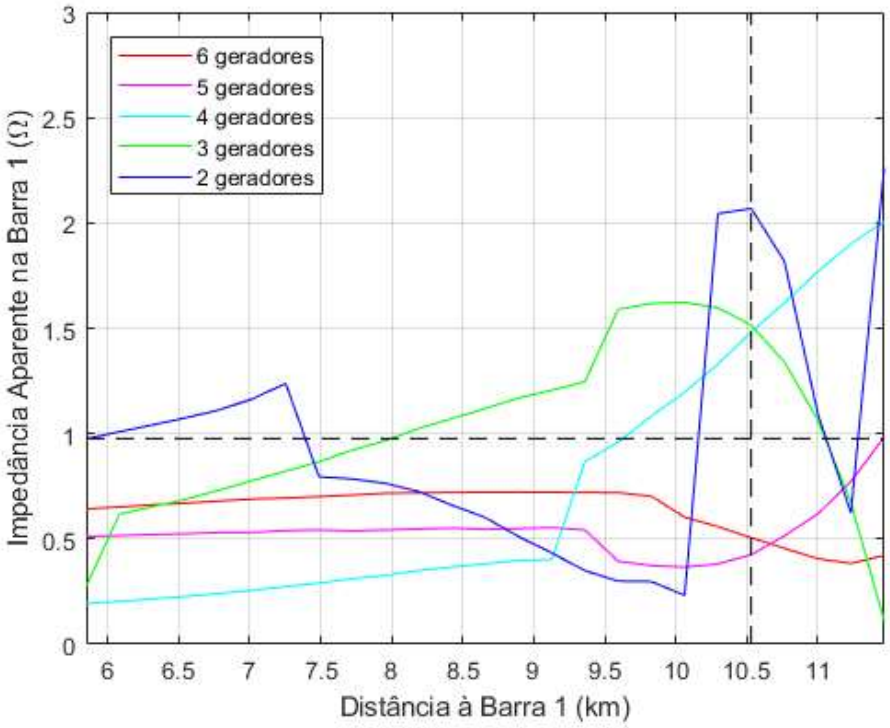


Fonte: Produção do próprio autor.

Para análises posteriores, definiu-se a resistência de falta igual a 1 Ω, foram simulados curtos-circuitos entre 50% e 100% de cada linha de transmissão, a cada 2%. Dessa forma, é possível enxergar o impacto que a variação da geração interna da indústria tem na Zona 1 de proteção, indicando os pontos da linha que, caso ocorra uma falta nela, pode acarretar na atuação da proteção.

O Gráfico 7 mostra, para a LT1, o valor calculado da impedância aparente na barra 1 para faltas nesses diversos pontos. O gráfico indicou que nos cenários com 5 ou 6 geradores em funcionamento, a proteção atuaria para faltas em qualquer ponto das linhas. Já para 4 geradores, há uma redução de 8% da zona de proteção, ou seja, o sistema só atua em faltas que ocorrerem nos primeiros 9,6 quilômetros da linha. Os demais cenários de geração são bastante irregulares, entrando e saindo mais de uma vez na zona de atuação.

Gráfico 7 – Impedância aparente ao longo da LT1 considerando uma resistência de falta de 1 Ω

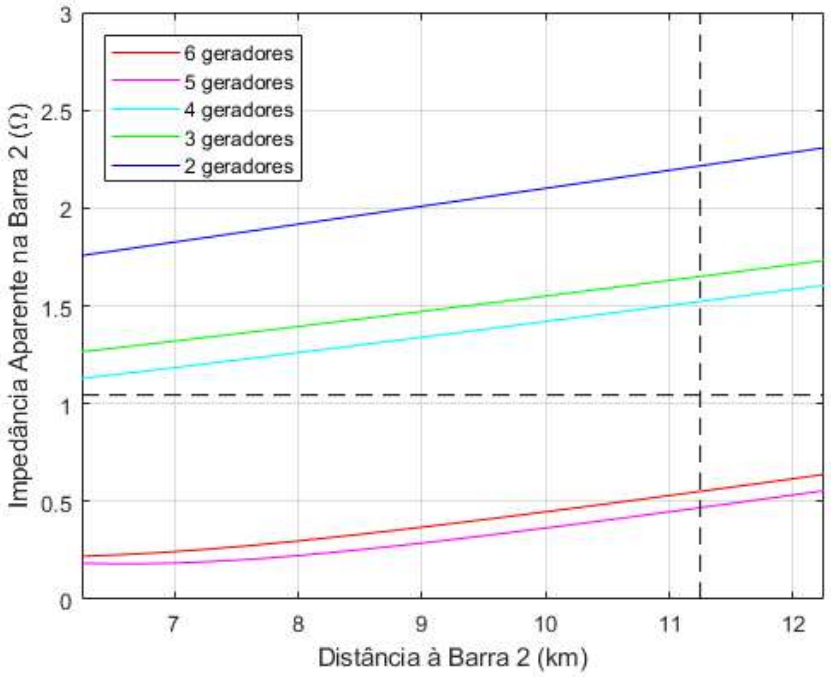


Fonte: Produção do próprio autor.

O Gráfico 8 apresenta resultados mais lineares para a LT2, com o formato próximo ao do apresentado como o comportamento esperado no Gráfico 6. Porém, com 5 ou 6 CTEs em funcionamento, é indicada a atuação da proteção para faltas em quaisquer pontos da linha. Nos demais cenários de geração interna, não é apontada atuação do sistema de proteção para falta na linha. Na prática, a linha estaria desprotegida.

Por fim, foi listado na Tabela 1 os efeitos da variação do número de geradores ligados na proteção das linhas de transmissão da indústria, indicando a porcentagem da linha que está protegida (lembrando que, para a zona 1, apenas 90% da linha deveria estar na zona de atuação).

Gráfico 8 – Impedância aparente ao longo da LT2 considerando uma resistência de falta de 1 Ω



Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 6 – Avaliação dos efeitos da variação de geração na proteção contra curtos-circuitos ao longo das linhas de transmissão com resistência de falta de 1 Ω

LT	Nº de CTEs	% da Linha Protegida	Comentários
1	6	100%	Proteção atua para falta em qualquer ponto da linha.
1	5	100%	Proteção atua para falta em qualquer ponto da linha.
1	4	82%	Redução de 8% da zona de proteção.
1	3	68%	Redução de 12% da zona de proteção.
			Atua além dos 90%.
1	2	23%	Redução de 57% da zona de proteção.
			Atua além dos 90%.
2	6	100%	Proteção atua para falta em qualquer ponto da linha.
2	5	100%	Proteção atua para falta em qualquer ponto da linha.
2	4	0%	Proteção não atua.
2	3	0%	Proteção não atua.
2	2	0%	Proteção não atua.

Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Apesar de o relé de distância apresentar boa confiabilidade e excelente versatilidade para a proteção de linhas de transmissão, nesse trabalho foi apresentado que o ajuste pelo critério de impedância pode não atingir o desempenho ideal quando consideramos a presença de resistência de falta e variação do fluxo de potência.

Todo SEP está sujeito a variação do fluxo de potência, visto que dificilmente será composto somente de cargas estáticas e que a geração de energia será sempre constante. Claro que, em muitas linhas de transmissão, a variabilidade não é tão grande quanto no caso estudado. A indústria em questão possui uma considerável carga instalada e uma expressiva geração interna que varia bastante, então é realmente mais suscetível para perceber tal variação.

E no que se refere a faltas à terra, dificilmente o evento não tem uma resistência de falta envolvida. Seja pelo arco elétrico formado entre o condutor e a estrutura metálica da torre de transmissão ou por um fio que caiu na superfície, geralmente há uma resistência inerente aos materiais pelos quais a corrente de falta passa. É, então, um fator presente, recorrente e imprevisível que deve ser considerado no projeto da proteção de um sistema de energia.

Nos 20 cenários simulados, que foram escolhidos pela maior chance de ocorrência, houve a atuação em apenas 55% deles, nas situações em que houve menor resistência de falta ou maior número de geradores simulados, para ambas as linhas de transmissão.

Além disso, a LT1 apresentou uma maior irregularidade quando foram simuladas diversas faltas ao longo da extensão da linha. Cabe um estudo futuro para melhor entendimento desse comportamento. Já os resultados do simulado na LT2 sugerem que ajustes adaptativos que variam de acordo com o número de geradores ligados seria suficiente para garantir a proteção dessa linha. Tal solução já é disponível no mercado, mas a instalação dela na indústria encontra algumas barreiras ligadas ao estado físico das instalações, já que nem todos os geradores estão fisicamente perto um dos outros e há distâncias consideráveis entre as subestações, que estão inseridas no meio de um ambiente industrial.

É necessário prezar pela confiabilidade e seletividade do sistema. Quando não é buscado métodos mais robustos para lidar com esses fatores, os efeitos ferem os principais critérios para o projeto da proteção. Não é possível afirmar que o relé atuará em todos os casos que ele deve e nem que respeitará as zonas de proteção, podendo atuar de forma instantânea em situações que fogem da competência da zona primária.

5.1 Trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem, além de acrescentar uma melhor análise do comportamento da LT1, indicar e simular métodos para tornar a proteção dessas linhas de transmissão mais confiável e seletiva. O mercado já possui soluções modernas para o problema, como a implementação de unidades medidoras de fase (PMU, do inglês *Phasor Measurement Unit*), que são equipamento para medir com maior precisão magnitude e fase de tensão e corrente em vários pontos do sistema elétrico. Também podem ser avaliados ajustes mais dinâmicos da proteção, mas deve-se levar em conta que o sistema já está instalado e em funcionamento, que qualquer modificação dele pode impactar na operação da indústria e que o arranjo físico do sistema dificulta as modernizações, visto que as CTEs não são conectadas diretamente nas LTs e a telemetria de todo o sistema pode ser prejudicada por estar inserido no meio de um processo siderúrgico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÃO FILHO, W. C. P. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Vitória: Edição do autor, 2014. v.1.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective relaying: principles and applications.** Boca Raton: CRC press, 2006.

CALERO, F.; GUZMÁN, A.; BENMOUYAL, G. **Adaptive phase and ground quadrilateral distance elements**. 4. ed. Pullman: Schweitzer Engineering Laboratories Inc., 2017.

CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos.** São Paulo: Editora Blücher, 1977. v. 1.

ELMORE, W. A. **Protective relaying: theory and applications.** New York: CRC press, 2003. v. 1.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON JR., W. D. **Power system analysis.** New Jersey: McGraw-Hill, 2003.

INDICADORES de Desempenho do SIN - Número de Perturbações Ocorridas na Rede Básica. **ONS**, 2018. Disponível em: http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento-paineis.aspx. Acesso em: 14 maio 2018.

KINDERMANN, G. **Curto Circuito.** 5. ed. Florianópolis: EEL/UFSC, 2010.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Florianópolis: EEL/UFSC, 2012.

MASON, C. R. **The art and science of protective relaying.** New York: Wiley, 1956.

MATOS, S. P. S.; ENCARNAÇÃO, L. F. Influence of distributed generation in transmission lines protection. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 9, p. 2941–2948, dez. 2015.

ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; SCHWEITZER III, E. O. **Z = V/I does not make a distance relay**. Pullman: Schweitzer Engineering Laboratories Inc., 1993.

SIMSCAPE Power Systems - MATLAB & Simulink**. Mathworks,** 2019. Disponível em: https://www.mathworks.com/products/simpower.html. Acesso em: 27 out. 2019.

WARRINGTON, A. C. **Protective Relays: Their Theory and Practice.** Norwich: Springer Science & Business Media, 2012. v. 1.

APÊNDICE A – ROTINAS DE MATLAB

É apresentado neste apêndice as rotinas usadas no MATLAB para parametrizar e realizar uma série de simulações, tendo como produto os gráficos usados nesse trabalho e demais dados para análise dos resultados.

A.1 – Parametrização

```
% Universidade Federal do Espírito Santo
% Centro Tecnológico
% Departamento de Engenharia Elétrica

% Aluno: Bruno Lima Zattoni
% Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista
% Coorientador: Msc. Sergio Pazzini da Silva Matos
% Estudo do Elemento 21: fragilidades no ajuste tradicional baseado na impedância
% Novembro – 2019

% Parametrização

%Powergui
Ts = 5e-5;

% Network
vutility = 138e03; %Phase-to-phase voltage (Vrms)
angleutility = 0; %Phase angle of phase A (degrees)
vautility = 3806.8e6; %3-phase short-circuit level at base voltage(VA
xrutility = 1/0.111; %X/R ratio

% Geradores
vg1 = 12.5e03; %tensão
angleg1 = 40.2; %ângulo 40.2
ativog1 = 26.2e6; %potência ativa 26.2
```

```
reativog1 = 31; %potência reativa 31

vg2 = 12.5e03; %tensão
angleg2 = 16.36; %ângulo 16.36
ativog2 = 68.1e6; %potência ativa 68,1
reativog2 = 20; %potência reativa 20

vg3 = 13.8e03; %tensão
angleg3 = 0; %ângulo
ativog3 = 73e6; %potência ativa 73
reativog3 = 0e6; %potência reativa

vg4 = 12.5e03; %tensão
angleg4 = 0; %ângulo
ativog4 = 35.2e6; %potência ativa antes 35.2
reativog4 = 0e6; %potência reativa

vg5 = 12.5e03; %tensão
angleg5 = 0; %ângulo
ativog5 = 65e6; %potência ativa 65
reativog5 = 0e6; %potência reativa

vg6 = 12.5e03; %tensão
angleg6 = 0; %ângulo
ativog6 = 74.8e6; %potência ativa 74,8
reativog6 = 0e6; %potência reativa

% Transformadores
pott1 = 60e6; %Pn(VA)Yg/Yg
pott2 = 60e6; %Pn(VA)D/Yg
pott3 = 65e6; %Pn(VA) D/Yg
pott4 = 65e6; %Pn(VA) D/Yg
pott5 = 115e6; %Pn(VA)
```

```
pott6 = 115e6; %Pn(VA)

% Cargas
pcarga1 = 110740650;
qlcarga1 = 0;
qccarga1 = 100304240;

pcarga2 = 152746440;
qlcarga2 = 0;
qccarga2 = 69255690;

pcarga3 = 91787580;
qlcarga3 = 0;
qccarga3 = 64466700;

% Linhas de Transmissão
rlt1 = [0.0984 0.1969]; %Resistance per unit length (Ohms/km)
llt1 = [0.4532 0.9064]/(2*3.1415*60); %Inductance per unit length (H/km)
clt1 = [12.74e-9 7.751e-9]; %Capacitance per unit length (F/km)
complt11 = 0.9*11.7; %Comprimento LT1 parte 1
complt12 = 0.1*11.7; %Comprimento LT1 parte 2

rlt2 = [0.0988 0.1977]; %Resistance per unit length (Ohms/km)
llt2 = [0.4532 0.9064]/(2*3.1415*60); %Inductance per unit length (H/km)
clt2 = [12.74e-9 7.751e-9]; %Capacitance per unit length (F/km)
complt21 = 0.9*12.5; %Comprimento LT2 parte 1
complt22 = 0.1*12.5; %Comprimento LT2 parte 2

% Sistema de Proteção
RTP = 1200; %1200
RTC = 240; %240

% Simulação Inicial
```

```
resfalta = 0.001;
swg1 = 1;
swg2 = 1;
swg3 = 1;
swg4 = 1;
swg5 = 1;
swg6 = 1;
```

A.2 – Estudo da variação da impedância em relação à geração interna e resistência de falta

```
% Universidade Federal do Espírito Santo
% Centro Tecnológico
% Departamento de Engenharia Elétrica

% Aluno: Bruno Lima Zattoni
% Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista
% Coorientador: Msc. Sergio Pazzini da Silva Matos
% Estudo do Elemento 21: fragilidades no ajuste tradicional baseado na
impedância
% Agosto – 2019

% Simulação variando resistência de falta e número de geradores ligados
clear
clc
parametros_rev02

% Switch Faltas - Simularemos falta na LT1 ou LT2?
switchfalta = 2; %10- LT1 2-LT2

switch(switchfalta)
        case 10
```

```
            tfaltalt1 = [1/60 5/60];
            tfaltalt2 = [1 5];
            complinha = 11.7;
            rpos = rlt1(1);
            rzero = rlt1(2);
            lpos = llt1(1)*(2*3.1415*60);
            lzero = llt1(2)*(2*3.1415*60);
        case 2
            tfaltalt1 = [1 5];
            tfaltalt2 = [1/60 5/60];
            complinha = 12.5;
            rpos = rlt2(1);
            rzero = rlt2(2);
            lpos = llt2(1)*(2*3.1415*60);
            lzero = llt2(2)*(2*3.1415*60);
        end

zlinhapos = (rpos + 1i*lpos)*(complinha);
zlinhazero = (rzero + 1i*lzero)*(complinha);

kzero = (zlinhazero - zlinhapos)/(3*zlinhapos);

% Filtragem das tensões exatamente no momento da falta
k=1;
mascara(4001,1)=0;
for k=1:4001
        if k<345
            mascara(k) = 0;
        end
        if ((k>344)&&(k<1601))
            mascara(k) = 1;
        end
        if ((k>1600)&&(k<4002))
```

```
                mascara(k) = 0;
        end
end

% Cenários de Simulação
resf1 = 1e-6;
resf2 = 0.5;
resf3 = 1;
resf4 = 3;
cenariosim = [resf1 1 1 1 1 1 1;
                resf1 1 1 1 1 1 0;
                resf1 1 1 1 1 0 0;
                resf1 1 1 1 0 0 0;
                resf1 1 1 0 0 0 0;
                resf2 1 1 1 1 1 1;
                resf2 1 1 1 1 1 0;
                resf2 1 1 1 1 0 0;
                resf2 1 1 1 0 0 0;
                resf2 1 1 0 0 0 0;
                resf3 1 1 1 1 1 1;
                resf3 1 1 1 1 1 0;
                resf3 1 1 1 1 0 0;
                resf3 1 1 1 0 0 0;
                resf3 1 1 0 0 0 0;
                resf4 1 1 1 1 1 1;
                resf4 1 1 1 1 1 0;
                resf4 1 1 1 1 0 0;
                resf4 1 1 1 0 0 0;
                resf4 1 1 0 0 0 0;];

%Simulações
s = 0;
impedanciaaparente = zeros(1,20);
```

```
residual = zeros(1,20);
for s = 1:20
        resfalta = cenariosim(s,1);
        swg1 = cenariosim(s,2);
        swg2 = cenariosim(s,3);
        swg3 = cenariosim(s,4);
        swg4 = cenariosim(s,5);
        swg5 = cenariosim(s,6);
        swg6 = cenariosim(s,7);
        sim AMTSimplificado_rev02;
        correntefaltaB1 = I_pos_B1.signals.values + I_neg_B1.signals.values +
        I_zero_B1.signals.values;
        [~, tempopico] = max(abs(correntefaltaB1));
        correnteA = correntefaltaB1(tempopico,1);
        correnteresidual = 3*I_zero_B1.signals.values(tempopico,1);
        corrente = correnteA + (kzero*correnteresidual);
        picoIfalta = I_pos_falta.signals.values + I_neg_falta.signals.values +
        I_zero_falta.signals.values;
        picoIfalta = picoIfalta(tempopico,1);
        impedanciaaparente(s) = (0.9*zlinhapos +
        (resfalta*(picoIfalta/corrente)))*(RTC/RTP);
        residual(s) = correnteresidual;

        disp(sprintf('%s','Total Decorrido:',num2str((s*100/20),'%2.1f'),'%'))
end

impreal = real(impedanciaaparente);
impimag = imag(impedanciaaparente);

posicao = 0;
linha = 0;
coluna = 1;
matrizsim = zeros(10,4);
```

```
for posicao=1:4
        for linha=1:5
                matrizsim(((linha*2)-1),posicao) = impreal(coluna);
                coluna = coluna + 1;
        end
end

coluna = 1;
for posicao=1:4
        for linha=1:5
                matrizsim((linha*2),posicao) = impimag(coluna);
                coluna = coluna + 1;
        end
end

angulos = 0.5:0.5:360;
angx = abs(impedanciaaparente(1,1))*cosd(angulos);
angy = abs(impedanciaaparente(1,1))*sind(angulos);

figure;
hold on
plot(matrizsim(1,:),matrizsim(2,:),'-+');
plot(matrizsim(3,:),matrizsim(4,:),'-+');
plot(matrizsim(5,:),matrizsim(6,:),'-+');
plot(matrizsim(7,:),matrizsim(8,:),'-+');
plot(matrizsim(9,:),matrizsim(10,:),'-+');
plot(angx,angy,'--k');
grid on
legend('6 geradores','5 geradores','4 geradores','3 geradores',
'2 geradores','Location','SouthEast');
xlabel("Resistência (\Omega)");
ylabel("Reatância (\Omega)");
```

A.3 – Estudo do efeito da variação da geração interna na eficiência da proteção

```
% Universidade Federal do Espírito Santo
% Centro Tecnológico
% Departamento de Engenharia Elétrica

% Aluno: Bruno Lima Zattoni
% Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista
% Coorientador: Msc. Sergio Pazzini da Silva Matos
% Estudo do Elemento 21: fragilidades no ajuste tradicional baseado na
impedância
% Agosto – 2019

% Simulação fixando o valor de resistência de falta de 1 ohm, estudaremos a
% redução da proteção da LT1 variando o número de geradores ligados

clc
clear all

parametros_rev02

m = 0.5:0.02:0.99;
% Switch Faltas - Simularemos falta na LT1 ou LT2?
switchfalta = 2; %10- LT1 2-LT2

switch(switchfalta)
        case 10
                tfaltalt1 = [1/60 5/60];
                tfaltalt2 = [1 5];
                complinha = 11.7;
                rpos = rlt1(1);
                rzero = rlt1(2);
                lpos = llt1(1)*(2*3.1415*60);
```

```
            lzero = llt1(2)*(2*3.1415*60);
        case 2
            tfaltalt1 = [1 5];
            tfaltalt2 = [1/60 5/60];
            complinha = 12.5;
            rpos = rlt2(1);
            rzero = rlt2(2);
            lpos = llt2(1)*(2*3.1415*60);
            lzero = llt2(2)*(2*3.1415*60);
end

zlinhapos = (rpos + 1i*lpos)*(complinha);
zlinhazero = (rzero + 1i*lzero)*(complinha);

kzero = (zlinhazero - zlinhapos)/(3*zlinhapos);

resfalta = 1e-6; %fixamos aqui o valor de resistência de falta

geracao = [1 1 1 1 1 1;
           1 1 1 1 1 0;
           1 1 1 1 0 0;
           1 1 1 0 0 0;
           1 1 0 0 0 0];
c = 0;
d = 0;
impedanciaaparente = zeros(6,length(m));

for c = 1:length(m)
        complt11 = m(c)*complinha;
        complt12 = (1 - m(c))*complinha;
        for d = 1:5
            swg1 = geracao(d,1);
            swg2 = geracao(d,2);
```

```
            swg3 = geracao(d,3);
            swg4 = geracao(d,4);
            swg5 = geracao(d,5);
            swg6 = geracao(d,6);

            sim AMTSimplificado_rev02;

            correntefaltaB1 = I_pos_B1.signals.values + I_neg_B1.signals.values
            + I_zero_B1.signals.values;
            [~, tempopico] = max(abs(correntefaltaB1));
            correnteA = correntefaltaB1(tempopico,1);

            correnteresidual = 3*I_zero_B1.signals.values(tempopico,1);

            corrente = correnteA + (kzero*correnteresidual);

            picoIfalta = I_pos_falta.signals.values + I_neg_falta.signals.values
            + I_zero_falta.signals.values;
            picoIfalta = picoIfalta(tempopico,1);

            impedanciaaparente(d,c) = (m(c)*zlinhapos
            + (resfalta*(picoIfalta/corrente)))*(RTC/RTP);
            disp(sprintf('%s', 'Total Decorrido: ',num2str((((c-1)*5 + d )
            *100/(length(m)*5)),'%2.1f'), '%'))
        end
end

%figure;
hold on
vetordist = m*complinha;
matrizabs = abs(impedanciaaparente);
hold on
grid on
```

```
plot(vetordist,matrizabs(2,:),'-m');
plot(vetordist,matrizabs(3,:),'-c');
plot(vetordist,matrizabs(4,:),'-g');
plot(vetordist,matrizabs(5,:),'-b');

plot([vetordist(1) vetordist(length(m))], [1.0436 1.0436],'--k');
plot([vetordist(21) vetordist(21)],[0 5],'--k')
axis([vetordist(1) vetordist(25) 0 3])
legend('6 geradores','5 geradores','4 geradores','3 geradores',
'2 geradores','Location','NorthWest');
xlabel("Distância à Barra 2 (km)");
ylabel("Impedância Aparente na Barra 2 (\Omega)");
```