



IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM RELÉ DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA COM CARACTERÍSTICA MHO PARA ENSINO NA ENGENHARIA

Leonardo Pereira Camargo – leonardocamargoeng@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Alberto Carazzai, 1640
86300-000 – Cornélio Procopio – Paraná

Murilo da Silva – murilosilva@utfpr.edu.br

Resumo: *O presente artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento computacional de um relé de distância com característica mho, muito utilizado na proteção de linhas de transmissão para isolamento de defeitos (curtos-circuitos), caso estes ocorram. No decorrer do trabalho são apresentadas as equações que definem a característica do elemento, as malhas de impedância utilizadas nos testes de detecção da falta, as impedâncias aparentes medidas pelo relé e a definição dos limites das zonas de proteção. Utilizou-se a plataforma Simulink/Matlab para a simulação do sistema elétrico e implementação da lógica de funcionamento e atuação do relé. Aplicou-se duas faltas bifásicas em diferentes pontos da linha de transmissão para a verificação do funcionamento do relé na detecção das mesmas para as diferentes zonas de proteção. Por meio dos resultados obtidos pode-se verificar a eficácia do modelo implementado na identificação de faltas aplicadas à frente e em diferentes zonas, onde este se mostrou preciso o suficiente para ser empregado em pesquisas na área de proteção de linhas de transmissão, assim como, no ensino de proteção de sistemas em nível de graduação e pós-graduação. Destaca-se que a simulação de filosofias de proteção promove a inovação do ensino acadêmico, bem como, podem ser alternativas de ensino atrativas devido às dificuldades técnicas e econômicas para modernização e atualizações constantes de laboratórios.*

Palavras-chave: *Proteção de sistemas elétricos de potência, Proteção de distância, Simulação de sistemas elétricos.*

1 INTRODUÇÃO

A proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é matéria de estudo de muitos pesquisadores e profissionais desta área, visto que o mesmo é constituído por equipamentos altamente dispendiosos, como geradores, transformadores e linhas de transmissão, e também são os responsáveis por transmitir enormes quantidades de energia até seus consumidores. Para que curtos-circuitos, descargas elétricas ou quaisquer outros distúrbios ocorridos no sistema elétrico não venham a prejudicar o funcionamento de tais equipamentos, torna-se necessário o emprego de elementos de proteção que sejam rápidos e seletivos na identificação



e isolamento do trecho com defeito, de modo que a continuidade da energia elétrica não seja interrompida.

A linha de transmissão (LT) é o elemento dos SEP mais susceptível a faltas, devido à sua abrangência e presença em locais de difícil acesso, suas dimensões físicas e à variabilidade de climas aos quais as mesmas se encontram expostas (CARRAMASCHI, 2006). Os relés são os principais dispositivos utilizados na proteção deste elemento, sendo o relé de distância o mais empregado, visto que sua atuação não é prejudicada pelo comprimento das linhas.

Os relés de distância atuam na identificação e isolamento de componentes com defeitos, no caso de curtos-circuitos ou aberturas de fase (MARCHER, 2010). Uma vez que a impedância de uma LT é proporcional ao seu comprimento, o relé é capaz de determinar o local de ocorrência de uma falta por meio do cálculo da impedância aparente, verificando se esta encontra-se dentro dos limites da zona de proteção definida para o dispositivo.

A característica de distância mho está entre as filosofias mais empregadas na detecção de faltas em linha longas, destacando-se na verificação de curtos-circuitos entre fases. Seu princípio de atuação baseia-se em um círculo que passa pela origem do plano de impedâncias R-X, onde também são plotadas as impedâncias aparentes calculadas pelo relé.

Tendo em vista o elevado custo de equipamentos para a composição de laboratórios de proteção, e a importância do estudo de suas características e aplicações, torna-se necessário a busca por soluções alternativas que auxiliem os estudantes e pesquisadores da área. Sendo assim, uma opção para esta situação, é o estudo por meio softwares que possibilitem as simulações dos sistemas elétricos, bem como, dos equipamentos empregados na segurança dos mesmos.

A plataforma Matlab/Simulink, possui bibliotecas que possibilitam a modelagem e simulação de diversos tipos de sistemas, inclusive os Sistemas Elétricos de Potência. Entretanto, estas bibliotecas não apresentam modelos específicos de relés que permitam estudos aprofundados dos mesmos, sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo a implementação de um relé de distância com característica mho, com o propósito de utilização do mesmo como uma ferramenta de ensino e pesquisa de proteção de sistemas.

2 RELÉ DE DISTÂNCIA TIPO MHO

2.1 Definição da característica do elemento tipo mho auto-polarizado

Uma das maneiras de se obter uma característica do tipo mho, é empregando um comparador de fase do tipo cosseno, entre os sinais de operação (S_{op}), vide Equação (1), e de polarização (S_{pol}), vide Equação (2), a fim de se obter o ângulo de fase Θ , para $-90^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$ (ROBERTS *et al.*, 1993).

$$S_{op} = r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R \quad (1)$$

$$S_{pol} = V_{pol} \quad (2)$$

Sendo r o alcance do elemento mho em por unidade, Z_{1L} a impedância de sequência positiva da linha, V_R a tensão de linha correspondente ao loop de falta, I_R a corrente de linha correspondente ao loop de falta e V_{pol} a tensão de polarização.

A Equação (3) descreve a expressão do torque (P) para este comparador de fase tipo cosseno. Sendo Re a parte real de um número complexo e “*” o seu conjugado.



$$P = \text{Re}(S_{op} \cdot S_{pol}^*) = \text{Re}[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R) \cdot V_{pol}^*] \quad (3)$$

Os pontos onde $P > 0$, representam a área dentro do círculo de alcance $r \cdot |Z_{1L}|$, e $P < 0$ representa a área fora do círculo de alcance $r \cdot |Z_{1L}|$. $P = 0$ define o limite do círculo de alcance $r \cdot |Z_{1L}|$ (ROBERTS *et al.*, 1993).

Substituindo V_{pol} por V_R , e fazendo $P=0$ na Equação (3), obtém-se a seguinte equação:

$$0 = \text{Re}[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R) \cdot V_R^*] = \text{Re}(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R \cdot V_R^*) - |V_R|^2 \quad (4)$$

Fazendo $r \cdot Z_{1L} = |r \cdot Z_{1L}| \angle \theta_L$:

$$|r \cdot Z_{1L}| = \frac{|V_R|^2}{\text{Re}(1 \angle \theta_L \cdot I_R \cdot V_R^*)} \quad (5)$$

$$|r \cdot Z_{1L}| = \frac{|V_R|}{|I_R| \cdot \cos[\theta_L - (\theta_V - \theta_I)]} \quad (6)$$

Sendo θ_L o ângulo de sequência positiva da linha, θ_I o ângulo de I_R , θ_V o ângulo de V_R . E finalmente, fazendo $Z = |Z| \angle \phi$, onde $\phi = (\theta_V - \theta_I)$, obtém-se:

$$|Z| = |r \cdot Z_{1L}| \cdot \cos(\theta_L - \phi) \quad (7)$$

A Equação (7) descreve um círculo no plano de impedância, passando pela origem e por $|r \cdot Z_{1L}|$. É possível verificar por meio desta equação que utilizar o elemento tipo mho auto-polarizado, é o análogo a testar $Z = V/I$ contra uma característica circular no plano R-X (ROBERTS *et al.*, 1993).

2.2 Equacionamento das malhas de impedância

O modelo implementado utiliza três malhas de impedância para a detecção de faltas entre as fases AB, BC e CA. Um relé de distância tipo mho detectará uma falta quando a diferença angular entre os fasores S_{pol} e S_{op} for menor que 90° . Esta afirmação é representada matematicamente pelas Equações (3) e (4).

$$\text{Re}(S_{op} \cdot S_{pol}) > 0 \quad (8)$$

$$\text{Re}[(r \cdot Z_{1L} \cdot I_R - V_R) \cdot V_{pol}^*] > 0 \quad (9)$$

Para o relé apontar uma falta a frente, é necessário que a impedância calculada seja menor ou igual à impedância ajustada para determinada zona de operação ($r \cdot |Z_{1L}|$) (SALLES, 2007). Após algumas manipulações algébricas o termo $r \cdot |Z_{1L}|$ é isolado para que seja expressa a condição de operação do relé:

$$r \cdot |Z_{1L}| \leq Z_R = \frac{\text{Re}(V_R \cdot V_{pol}^*)}{\text{Re}(1 \angle \theta_L \cdot I_R \cdot V_{pol}^*)} \quad (10)$$



A Equação (10) pode ser adaptada para as três malhas de impedância de faltas bifásicas, definidos pelas Equações (11), (12) e (13). Onde a tensão V_{pol}^* é substituída pelo fasor da tensão de sequência positiva de linha.

$$M_{AB} = \frac{Re[V_{AB} \cdot (V_{A1} - V_{B1})^*]}{Re[1 \angle \theta_L \cdot I_{AB} \cdot (V_{A1} - V_{B1})^*]} \quad (11)$$

$$M_{BC} = \frac{Re[V_{BC} \cdot (V_{B1} - V_{C1})^*]}{Re[1 \angle \theta_L \cdot I_{BC} \cdot (V_{B1} - V_{C1})^*]} \quad (12)$$

$$M_{CA} = \frac{Re[V_{CA} \cdot (V_{C1} - V_{A1})^*]}{Re[1 \angle \theta_L \cdot I_{CA} \cdot (V_{C1} - V_{A1})^*]} \quad (13)$$

Utilizou-se como característica direcional neste modelo os torques T_{AB} , T_{BC} e T_{CA} , expressos nos denominadores das Equações (11), (12) e (13). Será apontado uma falta à frente, se o sinal do torque for positivo, e uma falta na direção reversa, caso o sinal do torque seja negativo. Uma vez que a falta esteja na direção à frente, o comparador verifica de acordo com a Equação (10) se a falta se encontra dentro do círculo característico do elemento mho (SALLES, 2007).

2.3 Cálculo da impedância aparente

Em caso de curto-circuito, ou demais distúrbios ocorridos em linhas de transmissão, o relé determina o valor da impedância aparente do local onde ocorreu a falta até o ponto no qual o mesmo está instalado, por meio da divisão entre os valores de tensão e corrente medidos nos terminais do elemento de distância (COURY *et al.*, 2007). Estes valores de impedância são calculados para os três tipos de falta bifásicas por meio das seguintes equações:

$$Z_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \quad (14)$$

$$Z_{BC} = \frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} \quad (15)$$

$$Z_{CA} = \frac{V_C - V_A}{I_C - I_A} \quad (16)$$

Onde V_A e I_A representam os fasores de tensão e corrente da fase A, assim como V_B e I_B , e V_C e I_C representam os valores de tensão e corrente nas fases B e C, respectivamente.

2.4 Zonas de proteção

A atuação de um relé de distância próximo aos limites das suas zonas não é muito precisa, devido à erros de medição causados pela classe de exatidão de equipamentos, por



exemplo, sendo assim, torna-se necessário o uso de múltiplas zonas de atuação para cobrir com segurança o total da linha (COURY *et al.*, 2007).

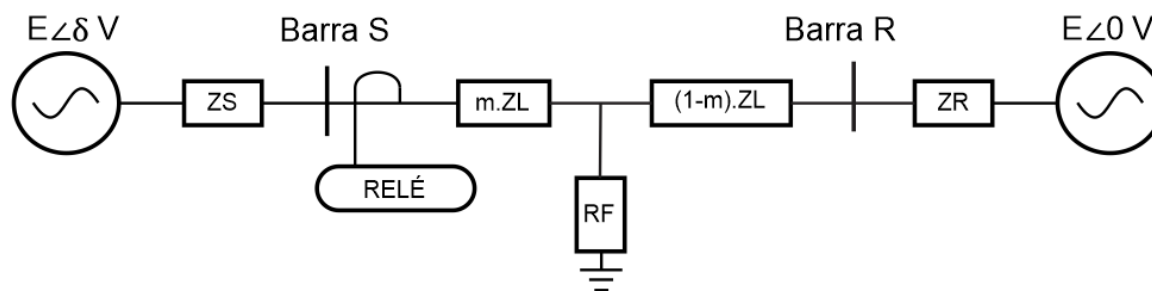
A zona 1 é geralmente ajustada para atuar instantaneamente alcançando 80% da impedância de sequência positiva da linha, a fim de evitar sua atuação para uma falta fora da linha; já a zona 2 é ajustada para proteger, no mínimo 120%, com um tempo de atuação em torno de 0,3 à 0,5 ciclos, a fim de assegurar a seletividade da zona 1 das zonas proteção das linhas adjacentes (SALLES, 2007).

3 RELÉ DE DISTÂNCIA TIPO MHO DESENVOLVIDO

3.1 Diagrama unifilar do sistema de transmissão utilizado

Como fonte de aquisição dos dados, foi implementado um sistema de transmissão trifásico como é mostrado na Figura 1 (ROBERTS *et al.*, 1993).

Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema de transmissão implementado.



Sendo m a distância em por unidade (pu) da falta à barra S, ZL a impedância da linha, ZS e ZR as impedâncias da fonte à barra S e a barra R, respectivamente, e RF a resistência de falta.

3.2 Diagrama de blocos do sistema de transmissão implementado

A Figura 2 apresenta o sistema de transmissão implementado na plataforma Matlab/Simulink e o bloco para aplicação de faltas trifásicas, assim como os componentes utilizados na aquisição e condicionamento dos sinais de tensão e corrente. Os blocos “i” e “v” representam os amperímetros e voltímetros, utilizados para a obtenção dos valores de corrente e tensão, respectivamente. Em seguida estes sinais passam pelos subsistemas “TC” e “TP”, Transformadores de Corrente e Transformadores de Potencial, onde são aplicadas as relações de transformação para as correntes (320:1) e tensões (3500:1), para que tais possam ser tratadas pelo relé.

Os subsistemas “CORRENTES DE LINHA”, “TENSÕES BIFÁSICAS” e “TENSÕES DE FASE”, são responsáveis por filtrar, realizar a conversão analógica/digital e extrair a componente fundamental dos sinais. Estes três subsistemas são compostos pelos mesmos blocos, sendo estes apresentados na Figura 3.

O bloco “*Analogic filter design*” é filtro passa-baixas *Butterworth* de segunda ordem, com frequência de corte sintonizada em 360 Hz (um terço da frequência de amostragem utilizada, 960 Hz), utilizado como filtro *anti-aliasing*, o qual deverá atenuar toda frequência superior à 480 Hz. O bloco “*Downsample*” é responsável pelo processo de amostragem do



signal. Neste bloco sinal é amostrado utilizando uma frequência de 960 Hz, padrão utilizado em alguns relés convencionais.

Os blocos “Rate transition” e “Quantizer” são responsáveis pela digitalização do sinal, o primeiro segura os valores de tensão ou corrente, nos níveis especificados pelo “Quantizer”. A última etapa consiste na filtragem digital da componente fundamental dos sinais, sendo realizada pelo bloco “Fourier”, onde são obtidos os módulos e os ângulos de fase dos sinais na frequência fundamental da rede.

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de transmissão simulado.

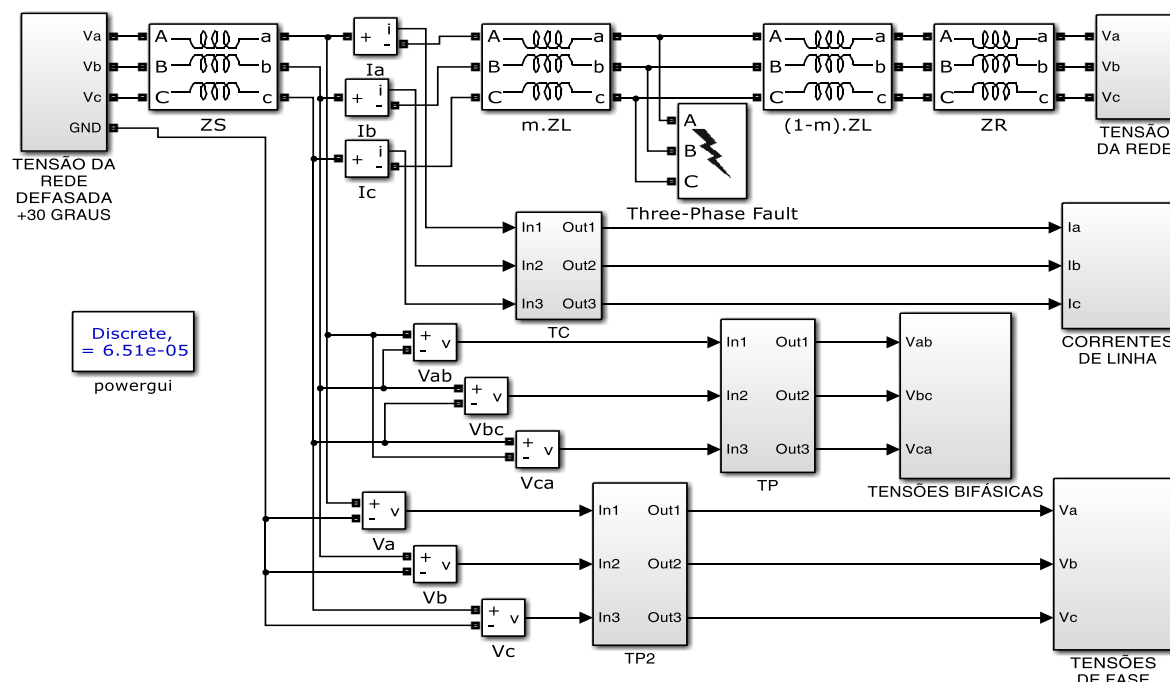
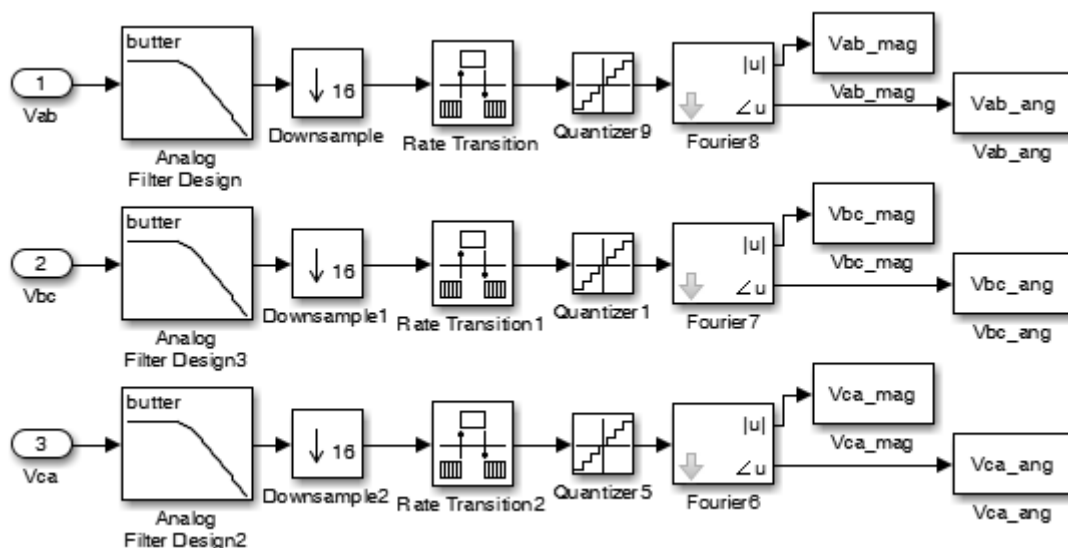


Figura 3 – Diagrama de blocos do subsistema “Tensões bifásicas”.



3.3 Elemento de distância do tipo mho implementado



Desenvolveu-se a lógica de funcionamento do relé por meio de linhas de código no editor do Matlab, em um arquivo com extensão “.m”. Primeiramente, efetuou-se os cálculos das componentes simétricas de tensão para a obtenção dos valores de sequência positiva que são empregados nas equações dos *loops* das malhas de impedância. Em seguida, implementou-se todas as equações apresentadas na seção 2, responsáveis pelo desenvolvimento da característica mho, cálculo das impedâncias, lógica de detecção de falta e determinação da zona na qual a mesma ocorreu.

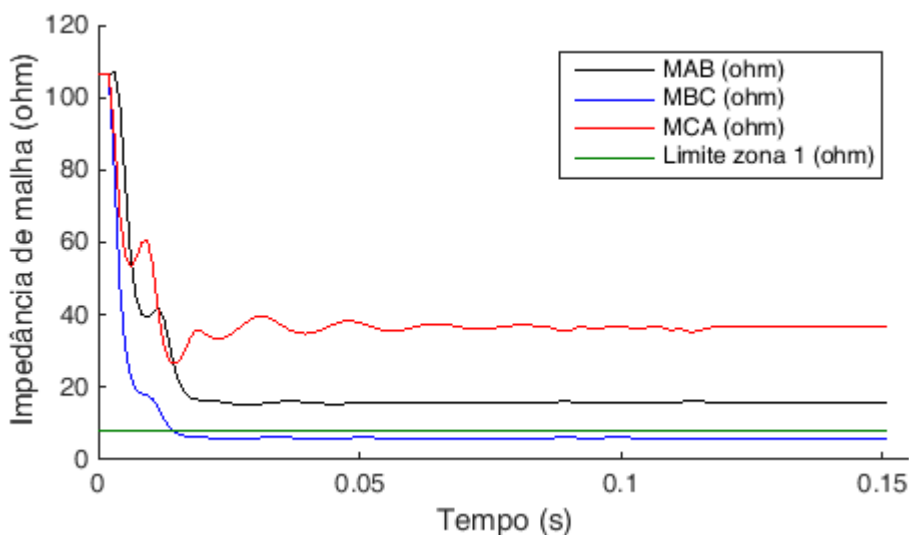
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Falta bifásica BC aplicada à 60% da impedância de sequência positiva da linha

Analizou-se o funcionamento do elemento de distância para duas faltas aplicadas entre as fases B e C, localizadas nas zonas 1 e 2 definidas. A Figura 4 apresenta as curvas das malhas de impedância calculadas para uma falta aplicada à 60% da impedância de sequência positiva da linha, assim como a curva de ajuste do limite da zona1. É possível observar o instante em que a curva da malha de impedância MBC cruza com o valor limite de ajuste para a zona 1, sendo este o momento no qual o relé manda o sinal de abertura para os disjuntores localizados nas extremidades da linha. Esta etapa de abertura dos disjuntores não foi implementada pelo fato do programa ter sido feito no editor do Matlab, impossibilitando a comunicação com a simulação.

Ainda sobre a Figura 4, pode-se observar também que as malhas de impedância MAB e MCA estão localizadas acima do valor de ajuste da zona 1, o que está correto, visto que as fases AB e CA não participam da falta.

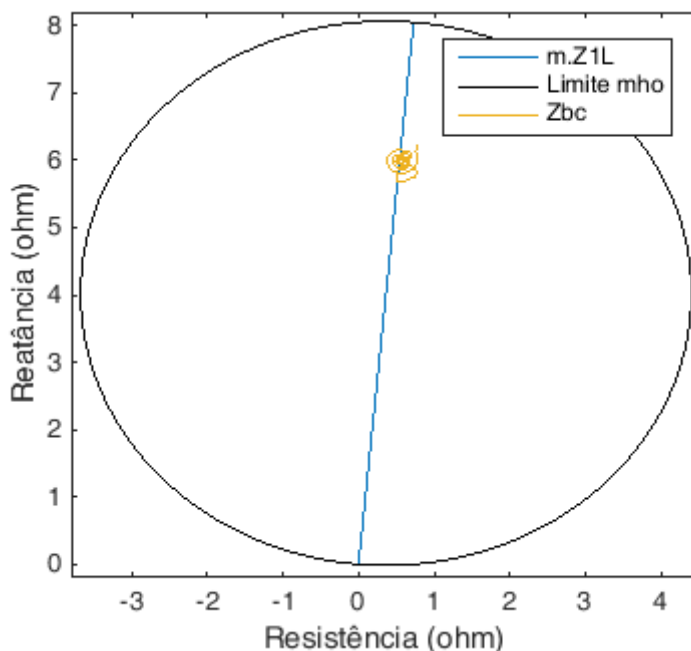
Figura 4 – Malhas de impedância e o limite ajustado para a zona 1.



A Figura 5 mostra a impedância aparente sobre a reta da impedância de sequência positiva da linha, dentro dos limites da característica mho.



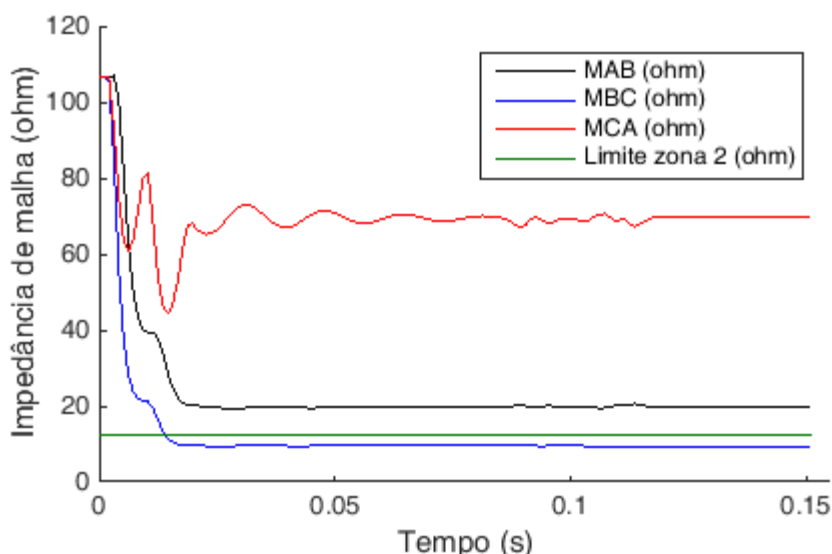
Figura 5 – Falta bifásica BC detectada na zona 1.



4.2 Falta bifásica BC aplicada dentro do limite de ajuste para a zona 2

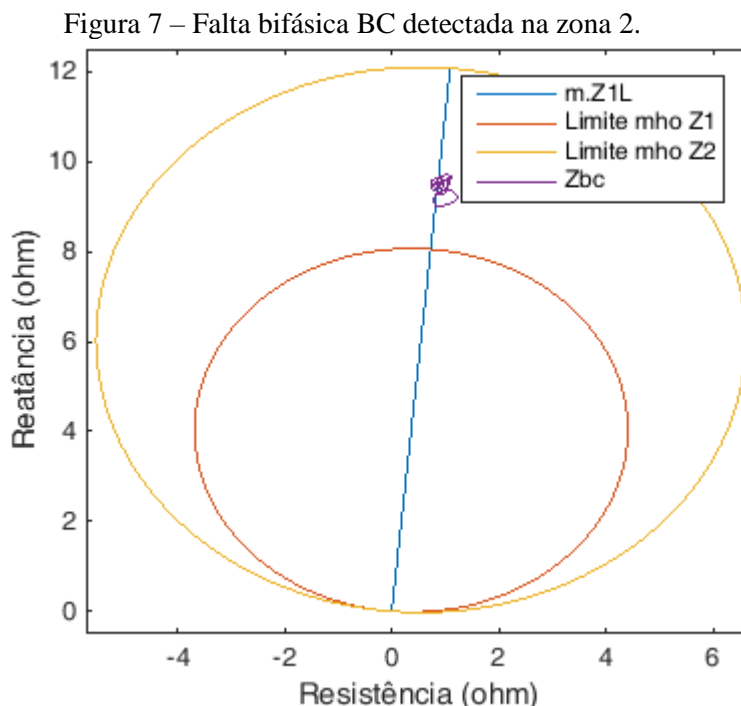
As curvas das malhas de impedâncias referentes ao curto-circuito aplicado entre as fases B e C, localizada na zona 2 de proteção, são apresentadas na Figura 6. Pode-se observar também o instante em que a curva de impedância da malha BC cruza o limite da zona 2, ajustada para proteger 120% da linha. Neste momento o relé envia o comando para a abertura dos disjuntores responsáveis pela isolamento da área comprometida pela falta. Pode-se notar também as curvas das malhas AB e CA, que não participam da falta e estão localizadas acima do limite da zona 2.

Figura 6 – Malhas de impedância e o limite ajustado para a zona 2.





A Figura 7 mostra a falta BC localizada entre as zonas 1 e 2 de operação da característica tipo mho.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos resultados obtidos pode-se verificar a eficácia do relé implementado na identificação de faltas aplicadas à frente e em diferentes zonas, baseado em estudos publicados por fabricantes e outros trabalhos desenvolvidos, onde este se mostrou preciso o suficiente para ser empregado em pesquisas na área de proteção de linhas de transmissão, possibilitando também, o estudo novas lógicas ou até mesmo novos algoritmos.

Este modelo se mostrou simples e versátil para ser aplicado como ferramenta didática no ensino de proteção de sistemas em nível de graduação e pós-graduação, uma vez que este possibilita a demonstração de seu princípio de funcionamento e sua atuação em um sistema elétrico. Para tal, buscou-se apresentar as principais informações da maneira mais didática possível, descrevendo todas equações e passos a serem seguidos, para que futuramente outros pesquisadores e estudantes possam implementá-lo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARRAMASCHI, Isa Helena Castro. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Departamento de Engenharia Elétrica. Avaliação do desempenho de uma proteção digital de distância frente alguns algoritmos, 2006. Monografia (Graduação).

COURY, Denis Vinicius; OLESKOVICZ, Mario; GIOVANINI, Renan. Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. 1. ed. São Carlos: EDUSP, 2007.

MASCHER, Leandro Jacob Dantas. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Programa de pós-graduação em engenharia elétrica. Análise do desempenho de algoritmos de proteção



de distância frente à faltas monofásicas – abordagem tendo em vista Uma proteção adaptativa, 2010. Dissertação (Mestrado).

ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; SCHWEITZER, E. O. $Z=V/I$ não faz um relé de distância. Anais: 20th Annual western protective relay conference. Washington, 1993.

SALLES, Newton José de. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos, 2007. Dissertação (Mestrado).

COMPUTATIONAL IMPLEMENTATION OF A DISTANCE PROTECTION RELAY WITH MHO CHARACTERISTICS FOR TEACHING IN ENGINEERING

Abstract: *The purpose of this paper is to present the computational development of a distance relay with mho characteristic, widely used in the protection of transmission lines for the isolation of defects (short circuit faults), if these occur. In the course of the project, the equations that define the characteristic of the element mho, the impedance meshes used in the fault detection tests, the apparent impedances measured by the relay and the definition of the limits of the protection zones are presented. The Simulink/Matlab platform was used for simulation of the electrical system and implementation of the logic of operation and actuation of the relay. Two biphasic faults were applied at different points of the transmission line to verify the operation of the relay in them detection, for the different protection zones. By the obtained results, it was possible verify the effectiveness of the implemented model in the identification of faults applied in different zones, where this one was accurate enough to be used in researches in the area of protection of transmission lines, in teaching systems protection at undergraduate and postgraduate level. It should be emphasized that the simulation of protection philosophies promotes the innovation of academic teaching, as well as, they can be attractive teaching alternatives due to the technical and economic difficulties for modernization and constant updates of laboratories.*

Key-words: *Protection of electric power systems, Protection of distance, Simulation of electrical systems.*