

# Modelagem da Proteção Direcional de Sobrecorrente de uma Linha de Transmissão

Flavio E. Silva\* Claudia R. Mesquita\*\* Cleonor C. Neves\*\*\*  
Eduardo J. Araujo\*\*\*\* William Caires Amorim†

\* Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito, MG,  
(e-mail: eduflavio11@hotmail.com).

\*\* Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito, MG,  
(e-mail: claudia.mesquita@ifmg.edu.br).

\*\*\* Instituto Federal do Amazonas, Campus Manaus, AM, (e-mail:  
cleonor.neves@ifam.edu.br).

\*\*\*\* Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito,  
MG, (e-mail: eduardo.araujo@ifmg.edu.br).

† Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito, MG,  
(e-mail: william.amorim@ifmg.edu.br).

---

**Abstract:** In protection systems, directional relays are usually applied when the electrical system operates in closed loop, acting for faults only in a one direction, in order to optimize protection coordination. This study presents a modeling of a directional relay in Simulink/MatLab™. In the proposed electrical system, two directional relays are located in a 60 km transmission line and interconnected through a remote system. Three case studies are analyzed, in function of the location of the three-phase faults and the activation of the permissive signal for tripping the relays. The results of the actuation times obtained in the simulations showed differences between 0.5 and 5.4% in relation to the calculated values, representing a good approximation of the proposed model in relation to the analytical values.

**Resumo:** Em sistemas de proteção, os relés direcionais normalmente são aplicados quando o sistema elétrico opera em malha fechada, atuando para faltas somente em uma direção, de forma a otimizar a coordenação da proteção. Este estudo apresenta uma modelagem de um relé direcional no Simulink/MatLab™. No sistema elétrico proposto, são utilizados dois relés direcionais alocados em uma linha de transmissão de 60Km, interligados através de um sistema remoto. São analisados três estudos de caso, em função da localização das faltas trifásicas e da ativação do sinal de permissivo de disparo dos relés. Os resultados dos tempos de atuação obtidos nas simulações apresentaram diferenças entre 0,5 a 5,4% em relação aos valores calculados, evidenciando uma boa aproximação do modelo proposto em relação aos valores analíticos.

*Keywords:* : Simulink, MatLab, protection, directional relay, three-phase faults, acting time, simulations.

*Palavras-chaves:* Simulink, MatLab, proteção, relé direcional, faltas trifásicas, tempo de atuação, simulações.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Um sistema de proteção tem como função principal manter a integridade do sistema elétrico quando submetido a distúrbios elétricos. Para atuação adequada, o mesmo deve atender a requisitos básicos, tais como: seletividade e coordenação, rapidez na atuação, sensibilidade para proteger a maior zona de proteção possível e confiabilidade (Silveira et al., 2010) (Anderson et al., 2022).

Um sistema de proteção consiste nos seguintes subsistemas que contribuem para a detecção e remoção de falhas: transdutores, relés e disjuntor. Os transdutores, ou seja, os transformadores de corrente e tensão, transformam correntes e tensões do sistema de energia para magnitudes mais baixas para, além de fornecer isolamento galvânico entre a rede de energia. Os relés são os elementos lógicos que

controlam a abertura e fechamento do disjuntor (Horowitz et al., 2022) (da Silva, 2018).

O relé de proteção pode atuar instantaneamente ou de forma temporizada, dependendo da magnitude da corrente que circula na linha de transmissão. A expressão analítica para cálculo do tempo de atuação de um relé de sobrecorrente na forma temporizada é dada pela Equação 1 (Mamede Filho and Mamede, 2000) (Garcia et al., 2020). Neste estudo, esta expressão é aplicada para implementação do bloco dos relés de proteção e para cálculo analítico do tempo de atuação.

$$t = \frac{\beta}{\left(\frac{I_{max}}{I_s}\right)^\alpha - 1} \cdot Tms \quad (1)$$

onde  $t$  é o tempo de atuação do relé,  $I_{max}$  é a sobrecorrente máxima admitida,  $I_s$  é a corrente de acionamento,  $T_{ms}$  é o multiplicador de tempo,  $\beta$  e  $\alpha$  são constantes que dependem da característica da curva do relé.

No caso de sistemas elétricos não radiais, é recomendável utilizar relés de sobrecorrente temporizados incorporados a elementos direcionais, os quais são sensibilizados ou não pelo sentido da corrente (Caminha, 1977) (Souza et al., 2019). A complexidade dos sistemas de transmissão atuais, seja pelo tamanho da malha ou pela geração distribuída, leva à utilização cada vez maior dos relés direcionais, considerando a necessidade dos elementos de sobrecorrente atuarem em sentido específico em função da localização das faltas (Panez and Tavares, 2016).

Este estudo visa a implementação de relés direcionais na plataforma Simulink/MatLab™ e aplicação dos mesmos em um sistema elétrico para diferentes estudos de caso. A plataforma Matlab/Simulink™ possui bibliotecas para utilização em estudos relacionados aos sistemas elétricos de potência, porém existem limitações com relação ao uso de modelos específicos de relés de proteção. Além disso, os modelos criados podem ser aplicados em projetos de pesquisa relacionados à proteção de sistemas elétricos em complementação aos softwares disponíveis no mercado, considerando a flexibilidade que a ferramenta possibilita aos usuários. Adicionalmente, a modelagem proposta tem potencial para agregar como ferramenta educacional em atividades acadêmicas, tendo em vista o elevado custo de equipamentos para montagem de laboratórios de proteção. Este trabalho desempenha um papel crucial no aprimoramento dos sistemas de proteção elétrica. Através de simulações e avaliação do modelo de relé direcional, os resultados obtidos podem servir como base para o desenvolvimento de sistemas ainda mais eficientes e confiáveis. Em meio às crescentes demandas energéticas e à importância da confiabilidade do sistema elétrico, este estudo pode contribuir significativamente para o avanço da tecnologia de proteção, garantindo um fornecimento de energia mais seguro e estável.

## 2. METODOLOGIA

Neste estudo, inicialmente foi elaborado o modelo do sistema elétrico no módulo Simulink/MatLab™, com as devidas parametrizações dos elementos, incluindo as configurações dos blocos do relé de proteção. A seguir, foram realizados cálculos para dimensionamento de TC's e correntes de ajustes dos relés. Posteriormente, foram realizadas simulações para três estudos de caso da função 67 (relé de proteção direcional), considerando diferentes localizações de faltas trifásicas no sistema e condição do sinal permissivo da conexão remota dos relés (ativado/desativado).

### 2.1 Modelagem do Sistema Elétrico

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema com gerador de 171kV/100MW conectado à barra 1 (tipo PV), duas cargas conectadas na barra 2 (carga 1:102MVA e carga 2:151,3MVA) e uma carga conectada na barra 3 (carga 3: 100,5MVA). As unidades de proteção A (UPA) e B (UPB) com os respectivos sentidos das funções direcionais recebem os sinais dos TC's e TP's localizados entre as

barra 2 e 3. A barra 4 é conectada ao sistema que está interligado ao sistema elétrico em estudo.

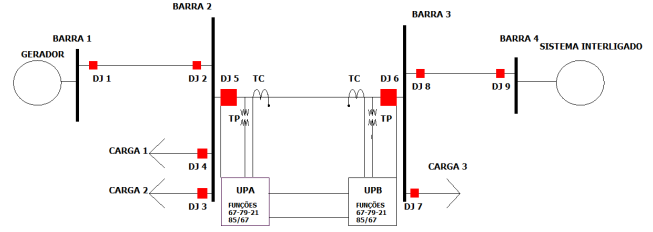


Figura 1. Diagrama unifilar do sistema elétrico

Conforme apresentado na Tabela 1, o sistema foi dividido em diferentes subsistemas (trechos) de forma a otimizar a análise.

Tabela 1. Subsistemas

Subsistema	Trecho
1	Gerador - Barra 1
2	Barra 1 - Barra 2 (linha L1)
3	Barra 2 - Barra 3 (linha L2)
4	Barra 3 - Barra 4 (linha L3)
5	Barra 4 - Sistema interligado

O subsistema 1 contém o gerador e sua impedância interna, conforme apresentado na Figura 2.

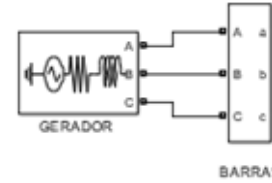


Figura 2. Subsistema 1 - Geração

Os subsistemas 2 e 4 contêm as linhas L1 e L3, respectivamente, sendo consideradas linhas curtas de 60km, as quais foram modeladas através de um circuito RL série com valores de resistência de 17,4  $\Omega$  e indutância de 0,0848  $\Omega$ , extraídos do Exemplo 3.12 de (Mamede Filho and Mamede, 2000). O subsistema 3 contém a linha L2, possuindo também 60 km de extensão, sendo dividida em 5 partes iguais, conforme apresentado na Figura 3, de forma a permitir a análise dos eventos de curto circuito ao longo da mesma. Esta linha foi modelada com os mesmos valores de resistência e indutância das demais linhas. Este trecho contém os transformadores de corrente (TC's) e transformadores de potencial (TP's) interligados às unidades de proteção. O subsistema 5 representa a barra de referência conectada ao sistema que está interligado ao sistema elétrico em análise.

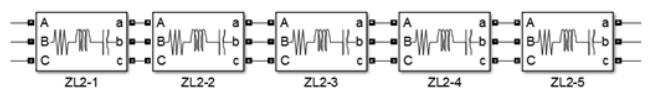


Figura 3. Subsistema 3 - linha L2

## 2.2 Modelagem do Relé de Proteção

A Figura 4 apresenta o modelo utilizado para os relés de proteção implementado no Simulink/MatLab™. O bloco do relé recebe os sinais de tensão e corrente dos transformadores de medição (TC's e TP's). O relé envia e recebe sinais da conexão remota através das conexões de entrada e saída do permissivo. O permissivo do terminal remoto da proteção tem como finalidade a aceleração da atuação da proteção para faltas localizadas entre os terminais da linha. Em caso de detecção de falha, o relé comanda a abertura do disjuntor através da saída *TRIP*.

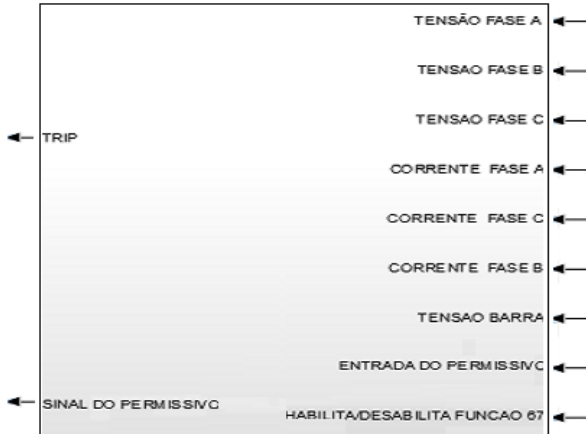


Figura 4. Bloco do relé de proteção

A lógica implementada para a função 67 é apresentada na Figura 5, consistindo no cálculo do tempo de atuação do relé a partir da medição da corrente de cada fase e na determinação do ângulo para verificação da zona de atuação da proteção, a qual é utilizada para avaliar a ativação ou bloqueio da função direcional do relé. A composição interna do bloco que implementa o cálculo do tempo de atuação do relé com base na Equação 1 é mostrada na Figura 7 e a composição interna do bloco para determinação do ângulo da zona de atuação é apresentada na Figura 7.

## 2.3 Critérios para Dimensionamento de TC's

Os transformadores de corrente utilizados na linha L2 foram dimensionados observando os seguintes critérios:

$$I_{tcnom} > I_{nom} \quad (2)$$

$$F_s \cdot I_{nom} > I_{cc3\phi} \quad (3)$$

onde  $I_{tcnom}$  é a corrente nominal do TC,  $I_{nom}$  é a corrente nominal da linha,  $F_s$  é o fator de sobrecorrente e  $I_{cc3\phi}$  é a corrente de curto circuito trifásica.

Ressalta-se que os valores de  $I_{nom}$  e  $I_{cc_{max}}$  foram obtidos através das simulações, considerando o sistema operando com carga nominal e com falta, respectivamente.

## 2.4 Equações para Cálculo da Corrente de Ajuste dos Relés

A corrente de ajuste de cada relé  $I_{tape}$  foi calculada através da seguinte Equação (Mamede Filho and Mamede, 2000):

$$\frac{I_{nom} \cdot k}{RTC} < I_{tape} < \frac{I_{cc2\phi}}{RTC} \quad (4)$$

onde  $I_{tape}$  é a corrente de tape da unidade temporizada,  $I_{nom}$  é a corrente nominal,  $k$  é o fator de sobrecarga admissível,  $I_{cc2\phi}$  é a corrente de curto circuito bifásica e  $RTC$  é a relação do TC.

## 2.5 Estudos de Caso

As simulações para a função direcional foram realizadas para eventos de curto circuito trifásico em diferentes localizações da linha L2. Os seguintes estudos de caso foram analisados:

- Estudo de caso 1 (EC1): Falta dentro da linha com permissivo ativado
- Estudo de caso 2 (EC2) : Falta fora da linha com permissivo ativado
- Estudo de caso 3 (EC3): Falta dentro da linha com permissivo desativado

Para todos os estudos de caso, foram utilizados parâmetros que representam a curva  $t \times I$  do tipo "Muito Inversa" (padrão IEC), ou seja,  $\beta = 13,8$  e  $\alpha = 1$ . O multiplicador de tempo  $T_{ms}$  foi configurado para 0,1.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Dimensionamento dos TC's

As relações dos transformadores de corrente da linha L2 ( $RTC_1$  e  $RTC_2$ ) foram determinadas obedecendo os critérios de dimensionamento de TC's. A Tabela 2 apresenta os valores da corrente nominal  $I_{nom}$  e das correntes de curto circuito máximas ( $I_{cc2\phi}$  e  $I_{cc3\phi}$ ) nas barras 2 e 3, obtidas através das simulações.

Tabela 2. Valores de corrente obtidas através de simulações

Parâmetro	Localização	Valor
$I_{nom}$	Linha 2	240A
$I_{cc2\phi}$	Barra2	6099A
$I_{cc2\phi}$	Barra3	7546A
$I_{cc3\phi}$	Barra 2	6718A
$I_{cc3\phi}$	Barra 3	9243A

Considerando os valores de  $I_{nom}$  e de  $I_{cc3\phi}$  apresentados e utilizando as Equações 2 e 3 para dimensionamento dos TC's, foram obtidos valores de  $RTC_1$  e  $RTC_2$  iguais a 80, equivalentes ao TC de 800:5A.

### 3.2 Cálculo das Correntes de Ajuste dos Relés

Os valores de  $I_{tape}$  para as unidades de proteção *UP1* e *UP2* foram determinados com base na Equação 4, considerando os valores de  $RTC$  obtidos, o valor da corrente nominal  $I_{nom}$  e das correntes de curto circuito bifásico  $I_{cc2\phi}$  apresentados na Tabela 2 e um fator de sobrecarga  $k$  igual a 1,2. De posse destes valores, foi obtido valor  $I_{tape}$  igual a 2,0 para ambos os relés.

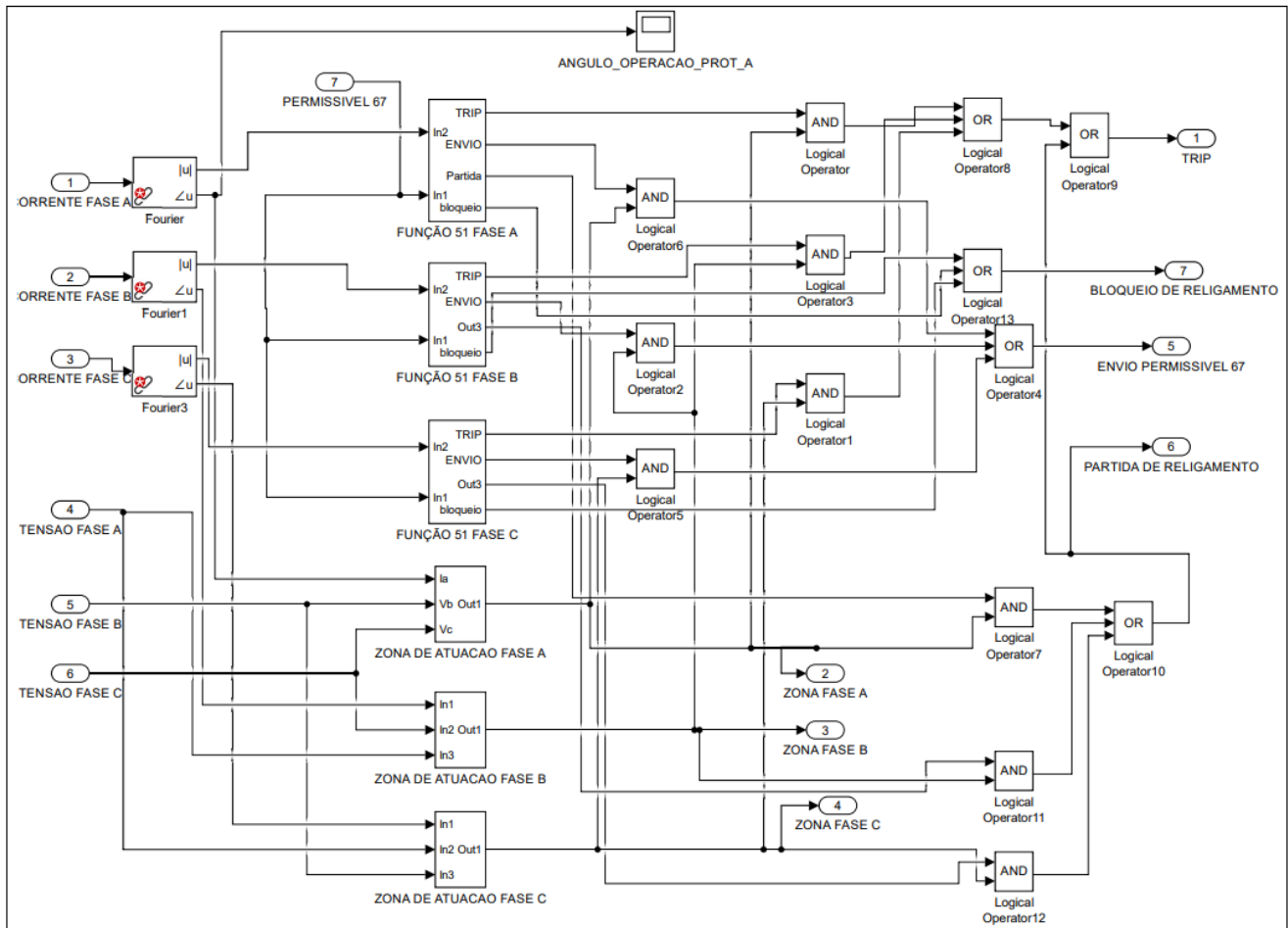


Figura 5. Lógica da função 67

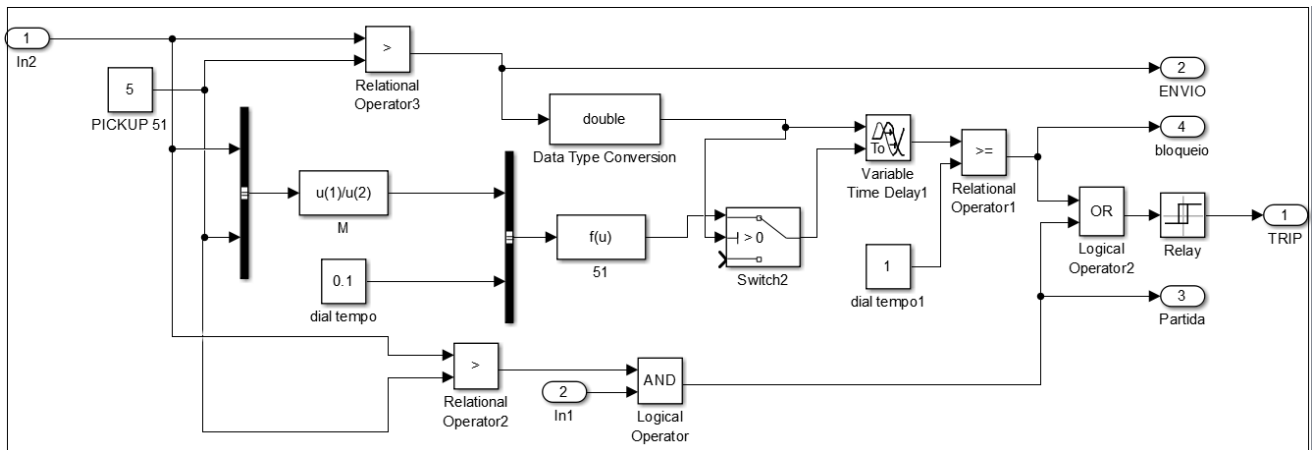


Figura 6. Lógica para cálculo do tempo de atuação

### 3.3 EC1: Falta Dentro da Linha com Permissivo Ativado

O curto circuito trifásico dentro da linha foi inserido entre os blocos ZL2 – 2 e ZL2 – 3 da linha L2 mostrada na Figura 3. Considerando a localização da falta dentro da linha L2, o sentido da corrente de curto circuito está no mesmo sentido configurado para os relés direcionais das unidades UPA e UPB (Figura 1), habilitando-os para atuação. A Figura 8 apresenta os resultados de tensão,

corrente e condição do disjuntor 5 para a unidade de proteção A, sendo equivalente aos resultados da proteção B. No tempo  $t = 0,5s$  ocorre o evento de curto circuito, aumentando o nível de corrente detectada pela proteção. Considerando que as unidades direcionais estão habilitadas e o permissivo ativado, a atuação das proteções A e B ocorrem com tempo de  $27,3ms$ , ou seja, as unidades de proteção levam este tempo para processar que a corrente superou o valor de atuação e receber o comando da

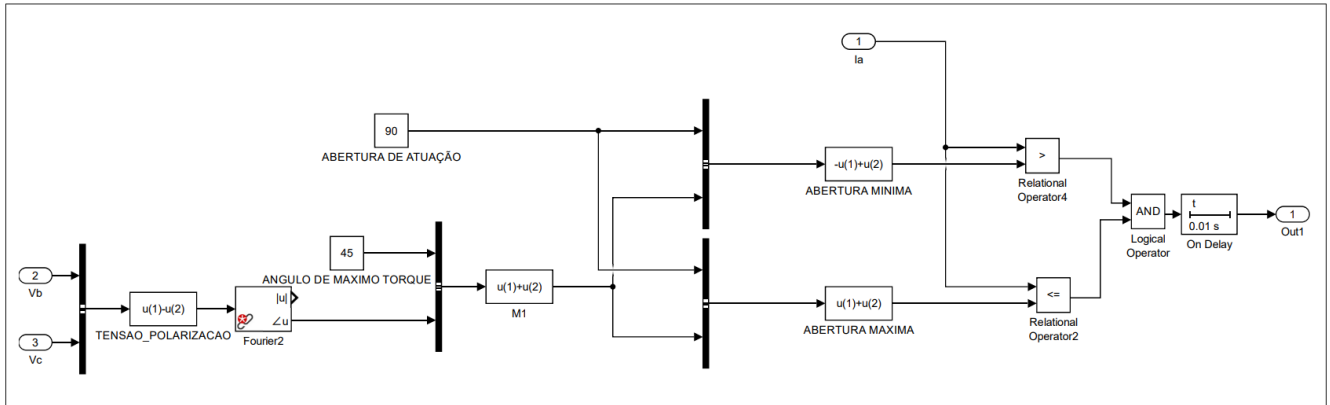


Figura 7. Lógica para determinação da zona de atuação

estação remota, ativando a saída do comando e abrindo os disjuntores 5 e 6.

A Figura9 apresenta os diagramas fasoriais para a fase A relacionados com as zonas de atuação para as condições de pré falta e pós falta das unidades UPA e UPB. Em cada diagrama, são apresentados os vetores da tensão de polarização e do ângulo máximo de torque, os quais definem, em conjunto com a corrente da fase A, a região de atuação do relé direcional para a fase A. Para a condição de pré falta, a corrente da fase A está fora da zona de atuação para UPA e dentro da zona de atuação para UPB. Para a condição de pós falta, as unidades direcionais estão habilitadas, considerando que as correntes de curto circuito da fase A estão dentro da zona de atuação para UPA e UPB.

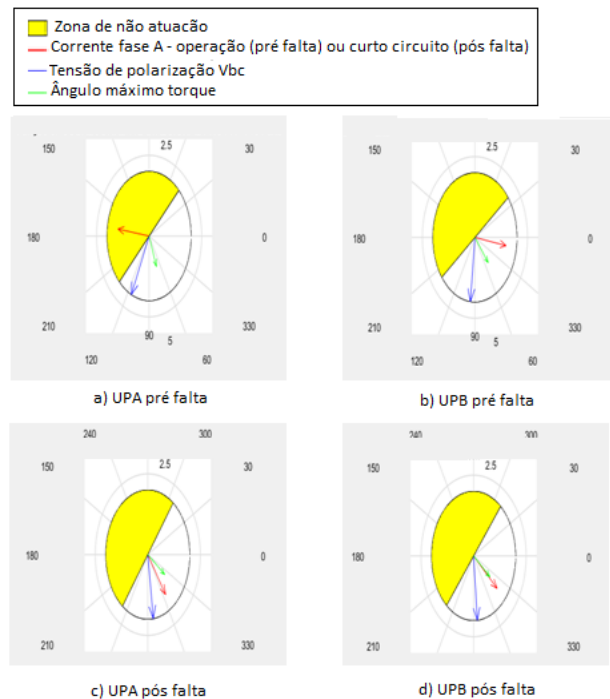


Figura 9. Zonas de atuação para UPA e UPB pré e pós falta

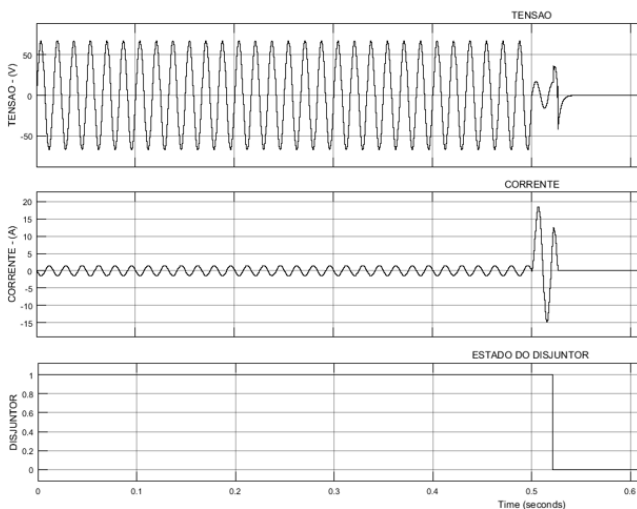


Figura 8. ECI - Formas de onda para UPA

### 3.4 EC2: Falta Fora da Linha com Permissivo Ativado

O curto circuito trifásico fora da linha foi inserido na saída da barra 1, a qual é mostrada na Figura 2. Considerando que a corrente de curto circuito está fora da zona de atuação para UPA e dentro da zona de atuação para UPB, UPA está bloqueada e UPB está habilitada para atuação. Desta forma, UPB atua de forma temporizada, abrindo o disjuntor 6 após o tempo de atuação obtido de 353,8ms.

### 3.5 EC3: Falta Dentro da Linha com Permissivo Desativado

Neste caso, como o sinal permissivo está desativado, não ocorre a ação de aceleração da atuação dos relés. Desta forma, as atuações das proteções ocorrem de acordo com a curva de atuação temporizada de cada relé, em função da corrente de curto circuito que circula em cada extremidade da linha. As correntes de curto circuito estão dentro da zona de atuação para UPA e UPB, ou seja, as unidades estão habilitadas para atuação.

A Figura 10 ilustra os tempos de atuação na curva  $t \times I$  obtidos para UPA e UPB para falta dentro da linha com permissivo desativado. O tempo de atuação de UPB de 155ms é menor que o tempo de atuação de UPA de 222ms, já que a contribuição da corrente de curto circuito na barra 3 é maior do que na barra 2.

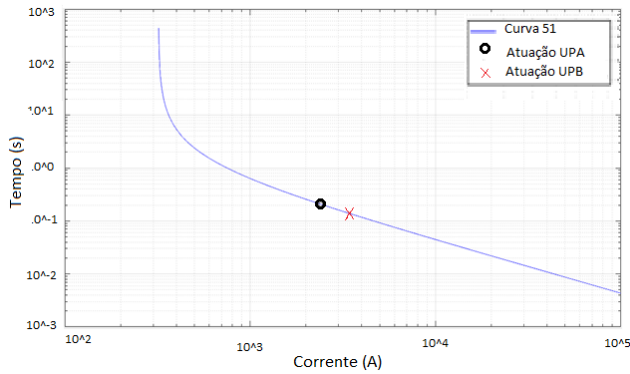


Figura 10. EC3: Curva tempo inverso para UPA e UPB

### 3.6 Compilação dos resultados

Os resultados obtidos para os três estudos de caso estão compilados na Tabela 3. A corrente de curto circuito encontra-se fora da zona de atuação somente para UPA no EC2, desabilitando o relé direcional. Nos demais casos, como a corrente de curto circuito está dentro da zona de atuação, os elementos direcionais estão habilitados.

A atuação não temporizada ocorre somente no EC1, considerando que o permissivo está ativado, os elementos direcionais estão habilitados e a falta ocorre dentro da linha. Neste caso, ocorre a aceleração da atuação dos proteção, com tempo de atuação mais baixo em relação aos demais casos. Nos casos de atuação temporizada, o tempo de atuação depende do nível da corrente de curto circuito que circula no trecho da linha. Por exemplo, para UPB no EC3, o nível da corrente de curto circuito sendo mais elevado em relação à UPB no EC2, resulta em um tempo de atuação da proteção de 155,0ms, ou seja, um tempo menor em relação ao tempo de 353,8ms obtido para EC2.

Tabela 3. Compilação dos resultados para UPA e UPB

Caso	Proteção	Tempo	Direcional	Atuação
EC1	UPA	27,3ms	Habilitado	Não temporizada
EC1	UPB	27,3ms	Habilitado	Não temporizada
EC2	UPA	-	Desabilitado	Não aplicável
EC2	UPB	353,8ms	Habilitado	Temporizada
EC3	UPA	222,2ms	Habilitado	Temporizada
EC3	UPB	155,0ms	Habilitado	Temporizada

### 3.7 Validação dos resultados

Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com resultados analíticos de cálculo do tempo de atuação obtidos através da Equação 1, considerando os mesmos parâmetros utilizados nas simulações para curva "Muito Inversa" (padrão IEC), ou seja,  $\beta = 13,8$  e  $\alpha = 1$ , além do multiplicador de tempo  $T_{ms}$  igual a 0,1.

Ressalta-se que, para o estudo de caso 1 (EC1), como ocorre a atuação da proteção sem temporização, a validação dos resultados não se aplica. A Tabela 4 apresenta o comparativo entre os tempos de atuação obtidos analiticamente e o tempos de atuação obtidos através das simulações para os estudos de caso 2 e 3. A diferença máxima percentual de 5,4% entre o tempo de atuação analítico e

simulado para UPB no EC3 evidencia uma boa aproximação entre os resultados. O tempo de processamento de alguns blocos matemáticos do MatLab/Simulink™ justificam as diferenças encontradas.

Tabela 4. Comparativo entre tempos de atuação calculados e tempos de atuação obtidos pelas simulações

Caso	Proteção	Analítico	Simulado	Dif.%
EC2	UPA	352,0ms	Sem atuação	-
EC2	UPB	352,0ms	353,8ms	0,5
EC3	UPA	219,0ms	222,2ms	1,5
EC3	UPB	147,0ms	155,0ms	5,4

## 4. CONCLUSÃO

Através das simulações realizadas neste estudo, foi possível avaliar a aplicação do modelo de um relé direcional em diferentes localizações de falta trifásica no sistema elétrico proposto.

As simulações mostraram que a atuação temporizada dos relés direcionais dependem da localização da falta trifásica e da condição do sinal de permissivo. No caso em que houve atuação temporizada, o comparativo com cálculos analíticos do tempo de atuação mostraram que o modelo computacional reproduz com boa aproximação os valores analíticos, considerando as diferenças percentuais entre 0,5 e 5,4% entre os valores dos tempos de atuação obtidos através das simulações e os valores analíticos.

Em trabalhos futuros, os autores visam implementar um relé multifuncional, incorporando funções como proteção à distância, diferencial, dentre outras, além de analisar os modelos em sistemas elétricos de maior complexidade.

## REFERÊNCIAS

- Anderson, P.M., Henville, C.F., Rifaat, R., Johnson, B., and Meliopoulos, S. (2022). *Power system protection*. John Wiley & Sons.
- Caminha, A.C. (1977). *Introdução à proteção dos sistemas elétricos*. Editora Blucher.
- da Silva, R.C.M.V. (2018). Desenvolvimento de procedimentos padrão para homologação de relé de proteção na rede de transporte.
- Garcia, T.R., Leão, F.B., and Barradas, H.M. (2020). Metodologia para reparametrização adaptativa do sistema de proteção considerando a inserção de geração distribuída. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 1(1).
- Horowitz, S.H., Phadke, A.G., and Henville, C.F. (2022). *Power system relaying*. John Wiley & Sons.
- Mamede Filho, J. and Mamede, D.R. (2000). *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Grupo Gen-LTC.
- Panez, J. and Tavares, M.C. (2016). Modelagem de um relé de proteção direcional de linha de transmissão no atp.
- Silveira, J.G., FORMIGA, L.E., Medeiros, E., and Colaço, A. (2010). Sistema para seleção automática de grupos de ajustes de relés de proteção do sistema elétrico. In *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Souza, L.A.P.d. et al. (2019). Comparação entre métodos de otimização aplicados aos ajustes de relés direcionais de sobrecorrente.