

## ESTUDO DA TELEPROTEÇÃO ASSOCIADA À FUNÇÃO 21 NA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Débora Cristina Serra Pinheiro, [debora\\_serra@discente.ufg.br](mailto:debora_serra@discente.ufg.br)<sup>1</sup>

Rodrigo Gonçalves Souza, [souza\\_rodrigo@discente.ufg.br](mailto:souza_rodrigo@discente.ufg.br)<sup>1</sup>

Maria Leonor Silva de Almeida, [marialeonor@ufg.br](mailto:marialeonor@ufg.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Bloco A, Q. 86 - 3º piso, Av. Universitária, 1488 - Qd. 86 Bloco A - Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-010

**Resumo.** As linhas de transmissão constituem um elemento fundamental na garantia do fornecimento de eletricidade para as indústrias, o comércio e as residências. Em virtude disso torna-se indispensável o direcionamento de esforços, tais como estudos, análises e monitoramento, voltados à proteção dos equipamentos e dispositivos que as compõem. Neste trabalho será apresentado um estudo da teleproteção aplicada na diminuição do tempo de atuação da função 21. Para isso foram realizadas simulações de curtos-circuitos, aplicados em diferentes pontos de uma linha de transmissão de 500 kV e 200 km, no software ATPDraw. Ao final das análises ficou evidenciado que a associação da teleproteção à função 21 diminuiu consideravelmente o tempo de abertura dos disjuntores para a extinção da falta e que o esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance apresentou melhor desempenho.

**Palavras chave:** Teleproteção. Linhas de Transmissão. Função 21.

**Abstract.** Transmission lines are a fundamental element in ensuring the supply of electricity to industries, commerce and homes. Because of this, it is essential to direct efforts, such as studies, analyzes and monitoring, aimed at protecting the equipment and devices that make up it. In this article, a study of the teleprotection applied in the decrease of the performance time of function 21 will be presented. Short circuit simulations were performed at different points of a 500 kV and 200 km transmission line in the ATPDraw software. After the analyzes, it was evidenced that the association of the teleprotection to function 21 considerably reduced the opening time of the circuit breakers to the extinction of the shortage and the Permissive Overreaching Transfer Trip scheme presented better performance.

**Keywords:** teleprotection, transmission line, function 21.

### 1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (2019), o crescimento da demanda energética do Brasil será de 3,6% ao ano até 2029. O atendimento a essa crescente demanda é possível por meio do Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual corresponde a um complexo sistema formado por diversos equipamentos elétricos de potência e de controle, que operam conjuntamente, a fim de garantir o fornecimento de eletricidade aos centros de consumo. Esses consumidores, de modo geral, estão distantes fisicamente das usinas geradoras de energia elétrica, o que faz com que o SIN seja composto por longas linhas de transmissão (LTs), responsáveis pelo envio da energia gerada às cargas.

Dada a importância das LTs para a garantia do pleno fornecimento de energia elétrica pelo SIN, é necessário o emprego de um sistema direcionado inteiramente para sua proteção, o qual deve ser capaz de identificar, o mais rapidamente possível, situações anormais de operação, como curtos-circuitos. A proteção das LTs é realizada a partir da aplicação de relés digitais, que utilizam técnicas de microprocessadores e apresentam funções que vão além daquelas oferecidas pelos relés eletromecânicos. (MAMEDE, 2013) Dentre as funções de proteção, as quais são listadas e enumeradas pela Tabela ANSI de acordo com a sua lógica operacional, são descritas: função diferencial (87), a função de sobrecorrente (50/51) e a função de distância (21). A função 21, quando atua pela segunda zona, opera com um tempo entre 200 a 300 ms (Silva, 2009), o qual é maior que o estabelecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que exige um tempo total de eliminação de faltas de até 100 ms para LTs com tensão nominal igual ou superior a 345 kV. (ONS, 2021)

Visando a diminuição do tempo de atuação da segunda zona da função 21, utilizam-se esquemas de teleproteção associados à função 21, a saber: Transferência Direta por Subalcance, do inglês *Direct Underreaching Transfer Trip* (DUTT), Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance, do inglês *Permissive Underreaching Transfer Trip* (PUTT), e Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance, do inglês *Permissive Overreaching Transfer Trip* (POTT). Outros esquemas de teleproteção, como o Bloqueio por Comparação Direcional, do inglês *Directional Comparison Blocking* (DCB), e o Desbloqueio por Comparação Direcional, do inglês *Directional Comparison Unblocking* (DCUB), também são empregados juntamente com a função 21, no entanto estes esquemas não serão abordados no decorrer do trabalho. (SILVA, 2009)

Diante do exposto, objetiva-se apresentar por meio deste artigo o estudo realizado acerca da função 21 associada aos esquemas de teleproteção para a proteção das LTs. Para o desenvolvimento desse estudo, modela-se, por meio do *software* ATPDraw, uma linha de transmissão de 500 kV e 200 km. Para as análises realizadas neste artigo, a LT modelada foi submetida a diferentes condições de curtos-circuitos francos monofásicos, obtidos variando-se a localização da falta e a resistência de falta. Para esses casos de curtos-circuitos, as tensões e correntes, medidas em ambos os terminais da linha em análise, foram utilizadas como entrada na função 21, considerando a teoria dos comparados por fase e a característica mho polarizada pela sequência positiva. Além da função 21, também foram implementados os diferentes esquemas de teleproteção, a fim de verificar se eles reduziram o tempo de atuação da função 21.

## 2. A FUNÇÃO 21 E A TELEPROTEÇÃO

Atualmente, a lógica operacional empregada na proteção de sistemas elétricos de potência baseia-se, predominantemente, na implementação de relés digitais associados de modo a garantir o pleno funcionamento da rede. Nestes equipamentos podem ser implementadas diferentes funções de proteção, as quais atuam de acordo com lógicas específicas de funcionamento. A proteção de distância opera com base na impedância aparente da rede a ser protegida, que pode ser representada graficamente pelo diagrama R-X, no qual se apresenta, ainda, uma característica de operação. Tal característica pode ser definida como uma forma geométrica que delimita a zona de operação do relé, as mais populares são: impedância, mho, lenticular, retângulo, blinder, reatância, resistência e quadrilateral (possível apenas em relés digitais). (SILVA, 2009) Além disso, a função 21 é predominantemente empregada em linhas de transmissão e, a princípio, a impedância aparente pode ser definida como sendo  $Z=V/I$ . Contudo, esse cálculo se torna insuficiente por existir alguns fatores, como a resistência de falta elevada, que interferem na correta atuação da proteção, impossibilitando que ela seja simplesmente definida por  $Z=V/I$ .

Considerando a lógica operacional descrita anteriormente, a função 21 pode ainda ser classificada pelas zonas de atuação, que consistem em diferentes alcances associados a diferentes tempos de atraso. É comum que se utilize duas zonas de proteção, sendo que a primeira atua instantaneamente e cobre de 80 a 85% da LT protegida; e a segunda zona abrange 100% da linha protegida mais cerca de 50% da linha que emana do terminal remoto, com atraso de 200 a 500 ms no tempo de atuação.

São denominados esquemas de transferência de disparo os sistemas acionados a partir do recebimento de sinais enviados pelos relés quando são detectadas faltas nas delimitações das zonas de proteção. Diz-se disparo direto quando o sinal é enviado diretamente ao disjuntor remoto da linha de transmissão; e permissivo quando esse sinal é enviado ao relé do terminal remoto da linha de transmissão. No que se refere à zona na qual a falta é identificada os disparos podem ser por Subalcance, quando a primeira zona detecta a falta, ou por Sobrealcance, quando o erro ocorre na segunda zona.

O esquema DUTT utiliza um sinal instantâneo de primeira zona para disparar os disjuntores locais e enviar um sinal de abertura aos disjuntores remotos.

No esquema PUTT, é utilizado um sinal instantâneo de primeira zona para abrir o disjuntor local e mandar um sinal permissivo de disparo para o relé no terminal remoto da linha de transmissão; se o relé do terminal remoto identificar a falta em seu elemento de segunda zona, este envia um sinal de disparo para o disjuntor local.

O POTT possui uma zona destinada exclusivamente para Teleproteção, denominada Zona 2B. Quando a falta é identificada por essa zona adicional, o relé envia um sinal permissivo de disparo para o terminal remoto. Um sinal de abertura é enviado ao disjuntor se o relé do terminal remoto também identificar a falta.

## 3. SISTEMA ANALISADO

Neste estudo foram realizadas simulações tomando como base a modelagem e os parâmetros descritos por IEEE Power System Relaying Committee (2004). Conforme representado na Fig. 1, a linha de transmissão implementada é composta por transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TPC), cuja função principal é ajustar os níveis de corrente e tensão da rede para alimentar as entradas dos relés, e disjuntores (DJ) que são seccionados conforme as condições da rede.

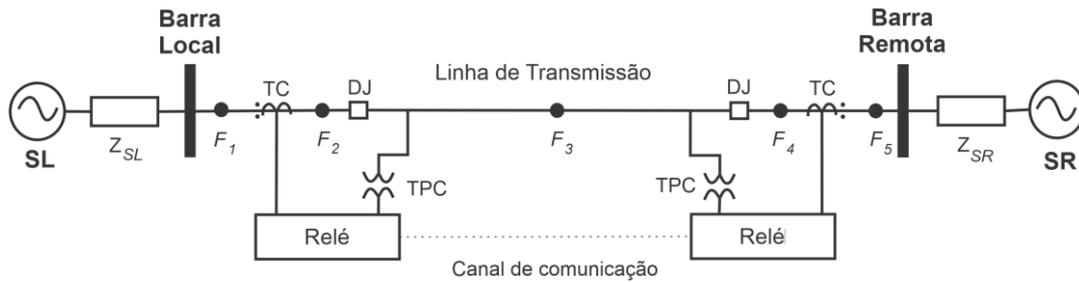


Figura 1. Linha de transmissão analisada

Além disso, os sistemas elétricos a montante da barra local e a jusante da barra remota foram reduzidos aos equivalentes de Thévenin. Os parâmetros das fontes são apresentados na Tab. 1, sendo SL a fonte de tensão próxima à barra local, SR a fonte de tensão próxima à barra remota e  $Z_{SL}$  e  $Z_{SR}$  as impedâncias de cada terminal. Vale ressaltar que os índices 0 e 1 representam as componentes de sequência zero e positiva, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros da fonte

Fonte SL	Fonte SR
$Z_{SL0} = SIR_L \cdot Z_{TL,0}$	$Z_{SR0} = SIR_R \cdot Z_{TL,0}$
$Z_{SL1} = SIR_L \cdot Z_{TL,1}$	$Z_{SR1} = SIR_R \cdot Z_{TL,1}$

Estão presentes ainda os seguintes parâmetros da LT:  $V_{LL}$  a tensão de linha, L o comprimento,  $Z_{TL,0}$  a impedância de sequência zero,  $Z_{TL,1}$  a impedância de sequência positiva,  $Y_{TL,0}$  a admitância de sequência zero e  $Y_{TL,1}$  a admitância de sequência positiva, apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo da linha de transmissão analisada

$V_{LL}$	L	$Z_{TL,0}$	$Z_{TL,1}$	$Y_{TL,0}$	$Y_{TL,1}$
500 kV	200 km	$0,4930+i1,3390 \Omega/\text{km}$	$0,0186+j0,2670 \Omega/\text{km}$	$j2,890 \mu\text{S}/\text{km}$	$j6,124 \mu\text{S}/\text{km}$

Por fim, nota-se que 5 pontos foram destacados, estes correspondem ao local de aplicação de cada falta. Ao considerar a posição do TC como referência, destaca-se que o ponto F1 corresponde ao local de aplicação de curtos-circuitos a jusante do mecanismo de proteção do terminal local, o ponto F2 corresponde a faltas aplicadas em 5% do comprimento total da LT, o ponto F3 corresponde a faltas aplicadas em 50% da LT, o ponto F4 corresponde a faltas aplicadas a 95% da LT e o ponto F5 corresponde a faltas aplicadas a montante do mecanismo de proteção do terminal remoto.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A verificação da atuação dos esquemas de teleproteção foi realizada aplicando-se curtos-circuitos francos monofásicos, variando-se a localização da falta e a resistência de falta. As características dos curtos-circuitos simulados são descritas na Tab. 3. Ressalta-se que, para avaliação da teleproteção, as primeiras e segunda zonas das funções 21, dos relés instalados nos terminais local e remoto, são avaliadas. Assim, para cada um dos curtos-circuitos avaliados são apresentados quatro gráficos. O gráfico (a) corresponde à atuação dos comparadores de fase para uma falta aplicada em 100 ms. O gráfico (b) refere-se à atuação da lógica DUTT, que envolve: a 1ª zona do terminal local (Z1L), a 1ª zona do terminal remoto (Z1R), a atuação do disjuntor do terminal local (DijL) e a atuação do disjuntor do terminal remoto (DijR). O gráfico (c) corresponde à atuação da lógica PUTT, que envolve a 2ª zona do terminal local (Z2L) e a 2ª zona do terminal remoto (Z2R), além de Z1L, Z1R, DijL e DijR. O gráfico (d) refere-se à atuação da lógica POTT, que envolve os mesmos parâmetros empregados na lógica PUTT.

Tabela 3 - Casos Analisados

Casos	Tipo de falta	Local da falta	Resistência de falta ( $\Omega$ )
1	AT	5%	0,0
2	BT	50%	0,0
3	CT	95%	5,0
4	AT	0%*	0,0

\*Curto-circuito aplicado a montante do relé local.

Apresenta-se na Fig. 2, a atuação dos comparadores da fase A e da teleproteção para o Caso 1, que corresponde a um curto-circuito franco aplicado em 5% da LT. Observa-se, na Fig. 2(a), que a unidade ZAT identificou a falta, em primeira e segunda zonas do terminal local e em segunda zona do terminal remoto.

No que diz respeito às lógicas de teleproteção, nota-se que na lógica DUTT, após a primeira zona do terminal local identificar a falha, os disjuntores dos terminais local e remoto foram acionados, como é mostrado na Fig. 2(b).

Na lógica PUTT, cuja atuação é apresentada na Fig. 2(c), verifica-se que após a identificação da falta na primeira zona do terminal local, ocorre a abertura do disjuntor local e, simultaneamente, há o envio do sinal permissivo para o relé do terminal remoto. Este permite a abertura do disjuntor remoto, visto que identificou a falta em seu elemento de segunda zona.

Para a lógica POTT, cuja atuação é apresentada na Fig. 2(d), nota-se que após a identificação da falta pela segunda zona do terminal local, o disjuntor local é acionado e o relé do terminal local envia um sinal permissivo para o relé do terminal remoto. Ao identificar a falta em seu elemento de segunda zona, o relé do terminal remoto permite a abertura do disjuntor remoto. É possível observar uma semelhança na atuação das lógicas PUTT e POTT. Isso ocorre porque ambas utilizam sinal permissivo para abertura do disjuntor remoto.

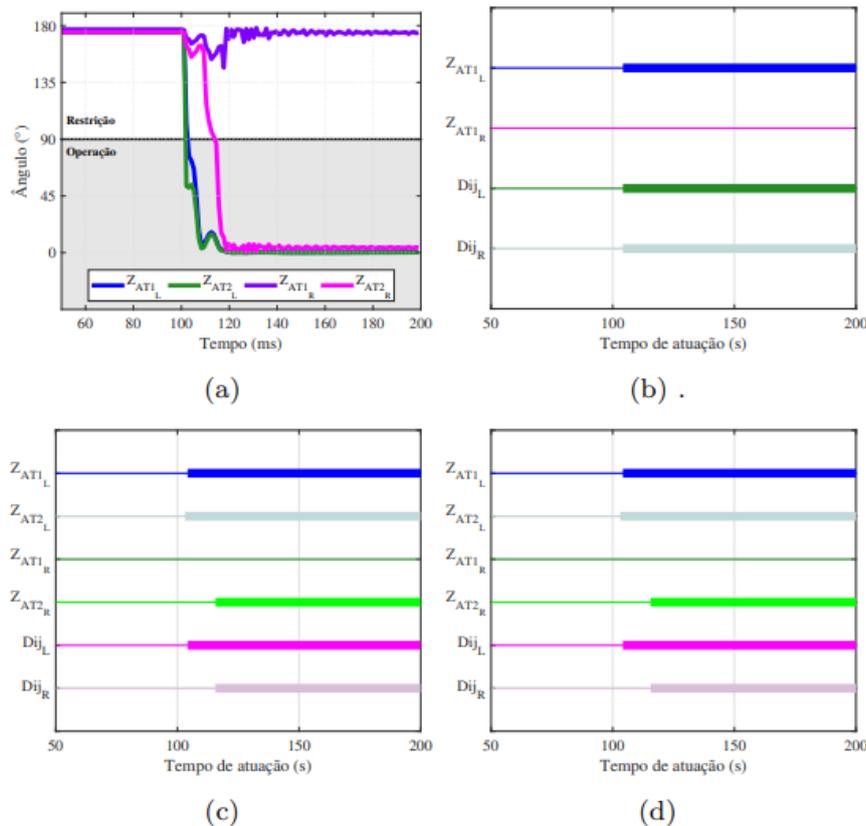


Figura 2. Caso 1: (a)Unidades atuantes; (b)Lógica DUTT; (c)Lógica PUTT; (d)Lógica POTT

Ao simular o Caso 2, correspondente a um curto-circuito monofásico na fase B, em 50% da LT, constata-se que a unidade ZBT identificou a falta em primeira e segunda zona para ambos os terminais, conforme exibido na Fig.3(a). Avaliando o esquema DUTT, cuja atuação é exibida na Fig. 3(b), verifica-se que ambos os disjuntores foram acionados

simultaneamente após as funções de ambos os terminais identificarem o curto-circuito em primeira zona. Na lógica PUTT, cuja atuação é apresentada na Fig. 3(c), verifica-se que ocorre a abertura simultânea de ambos os disjuntores devido a detecção da falta em primeira zona do terminal local e segunda zona do terminal remoto. No esquema POTT, cuja análise é apresentada pela Fig. 3(d), a falta é identificada em segunda zona para ambos os terminais. Como consequência, há o acionamento dos disjuntores local e remoto.

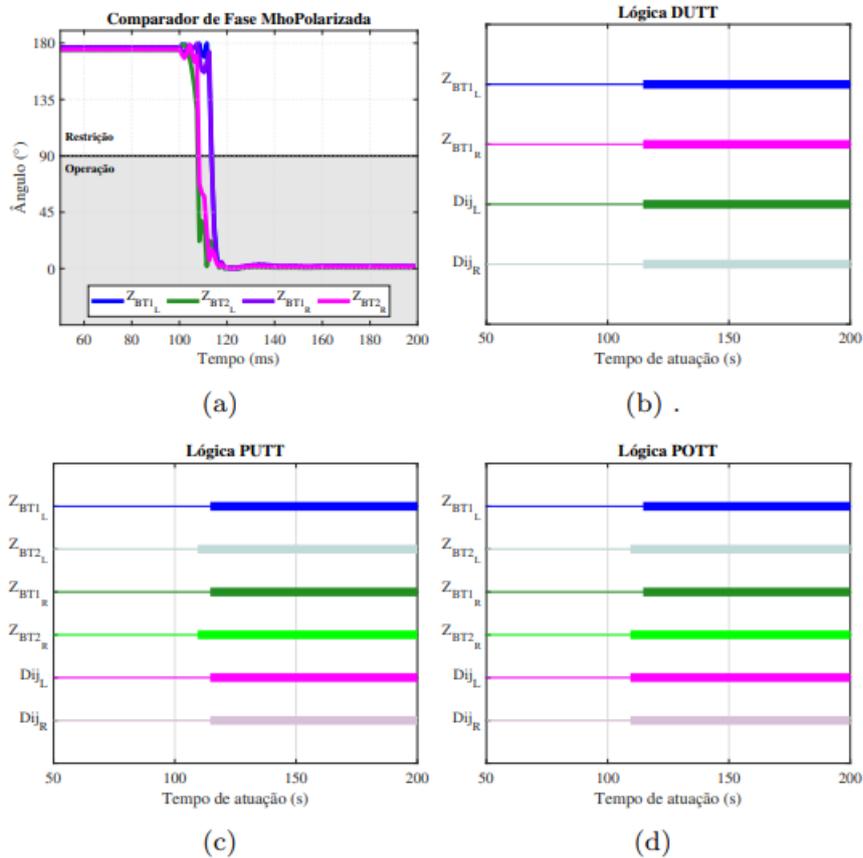


Figura 3. Caso 2: (a) Unidades atuantes; (b) Lógica DUTT; (c) Lógica PUTT; (d) Lógica POTT.

Foram analisados curtos-circuitos monofásicos com diferentes valores de resistência de falta. Contudo, as lógicas de proteção atuaram devidamente somente para resistência de falta de até  $5\Omega$ . Optou-se por apresentar os gráficos para o curto-circuito monofásico na fase C, em 95% da LT, com resistência de falta igual a  $5\Omega$ .

Na Figura 4(a) observa-se que, para o curto-circuito supracitado, a unidade ZCT identificou a falta, em primeira e segunda zonas do terminal remoto e em segunda zona do terminal local. Quanto às lógicas de Teleproteção, para o esquema DUTT, os disjuntores foram acionados após a primeira zona do terminal remoto identificar a falta. A Figura 4(b) mostra graficamente a atuação do esquema DUTT. Na Figura 4(c) apresenta-se o esquema PUTT para o Caso 3. Nota-se que a interrupção do circuito ocorre em ambos os disjuntores após a identificação da falta no elemento de primeira zona do terminal remoto e em segunda zona para o terminal local. O gráfico apresentado na Fig. 4(d) exibe a atuação do esquema POTT, no qual ocorre a abertura do circuito em ambos os disjuntores devido à identificação da falta em segunda zona para os terminais local e remoto.

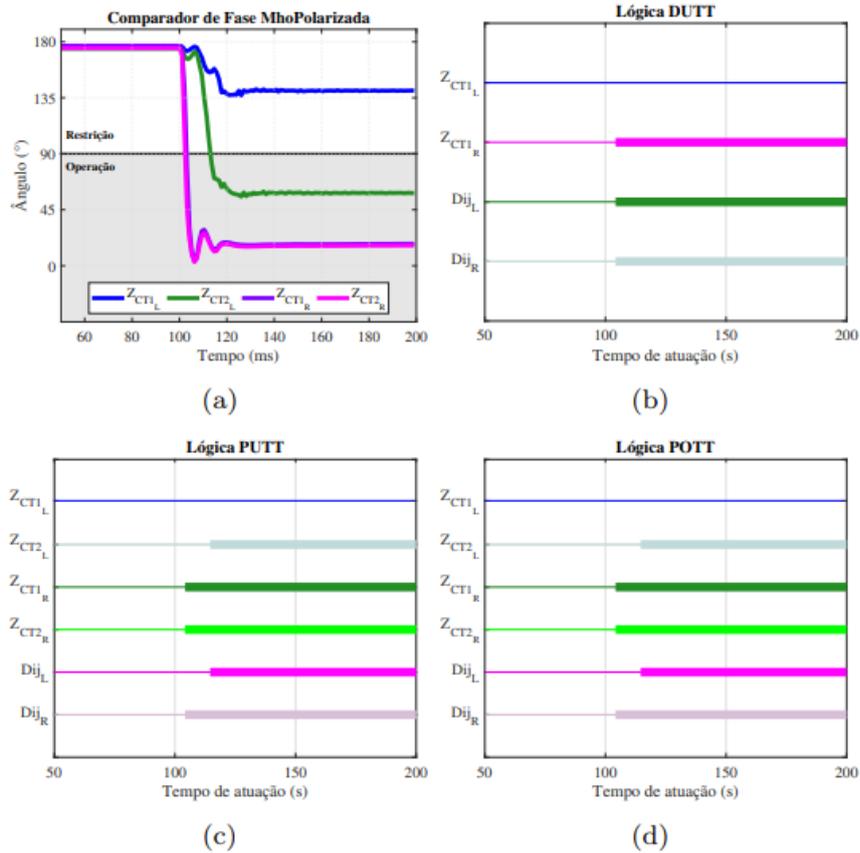


Figura 4. Caso 3: (a) Unidades atuantes; (b) Lógica DUTT; (c) Lógica PUTT; (d) Lógica POTT.

Para um curto-circuito aplicado a montante do relé do terminal local, observa-se que apenas a segunda zona do terminal remoto identificou a falta. Em consequência disso, os esquemas de teleproteção não atuam.

De modo análogo, quando a falta é aplicada a jusante do relé do terminal remoto, as lógicas de teleproteção não atuam, visto que apenas a segunda zona do terminal local identifica o curto-circuito.

Na Figura 5(a) observa-se que, para o curto-circuito indicado, a unidade ZAT identificou a falta, nas primeira e segunda zonas do terminal remoto e em segunda zona do terminal local. Quanto às lógicas de teleproteção, para o esquema DUTT, os disjuntores foram acionados após a primeira zona do terminal remoto identificar a falta. A Figura 5(b) mostra graficamente a atuação do esquema desse esquema. Na Figura 5(c) apresenta-se o esquema PUTT para o Caso 3. Nota-se que a interrupção do circuito ocorre em ambos os disjuntores após a identificação da falta no elemento de primeira zona do terminal remoto e em segunda zona para o terminal local. O gráfico da Fig. 5(d) exhibe a atuação do esquema POTT, no qual ocorre a abertura do circuito em ambos os disjuntores devido à identificação da falta em segunda zona para os terminais local e remoto.

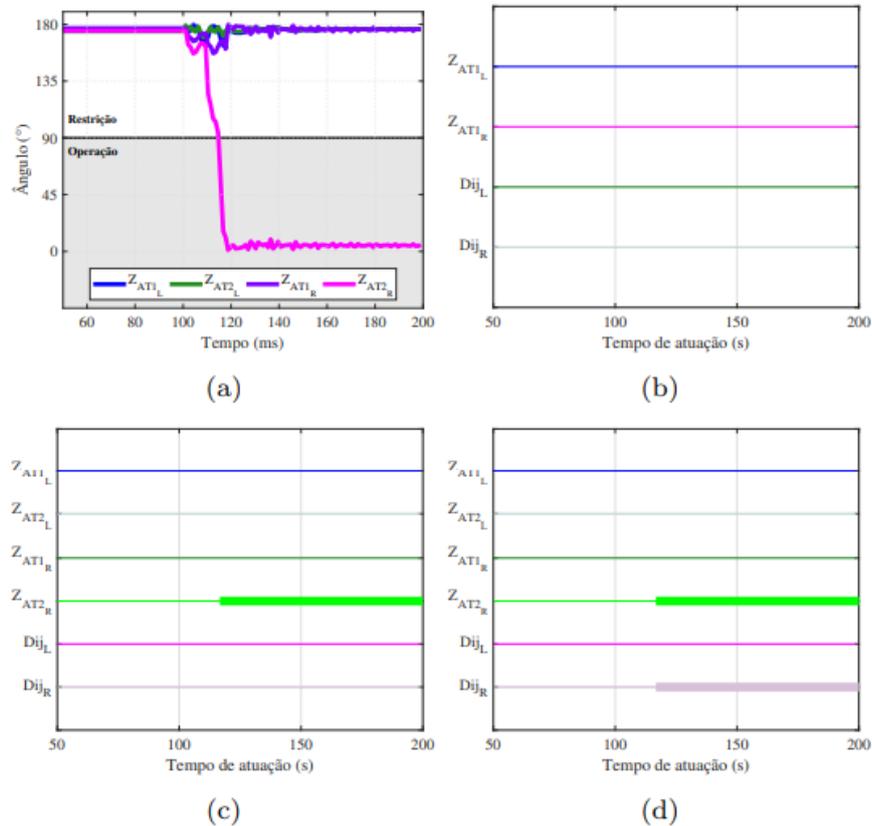


Figura 5. Caso 4: (a) Unidades atuantes; (b) Lógica DUTT; (c) Lógica PUTT; (d) Lógica POTT.

## 5. CONCLUSÃO

Tendo em vista os aspectos analisados, verificou-se que o uso da teleproteção reduziu o tempo de atuação da função 21, quando identificada pela segunda zona (de 200 a 500 ms), para cerca de 20 ms. Essa diminuição é evidenciada nos casos em que a teleproteção atuou, nos quais o tempo de atuação inicial na faixa de 200 ms foi reduzido para cerca de 20 ms após o emprego da teleproteção.

É possível notar uma semelhança entre os esquemas PUTT e POTT devido a ambos utilizarem sinais permissivos para a abertura dos disjuntores. No entanto, há uma diferença na origem do sinal utilizado. No esquema PUTT o sinal permissivo provém de seu elemento de primeira zona, enquanto na lógica POTT utiliza-se um sinal de segunda zona.

Nota-se ainda que o esquema POTT apresentou melhor desempenho nos casos avaliados. Os três esquemas de teleproteção atuaram devidamente para curtos-circuitos aplicados em 5%, 50% e 95% da LT. Contudo, quando a falta foi aplicada sobre os terminais apenas o POTT atuou. Isso ocorre porque a lógica POTT utiliza elementos de segunda zona, a qual possui maior alcance, para gerenciar a abertura dos disjuntores.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Programa de Educação Tutorial, ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação e ao Ministério da Educação, pelo apoio e estímulo à pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS

- EPE (2019). Plano decenal de expansão de energia em 2029. Empresa de Pesquisa Energética.  
 IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing. [S.l.], 2004. Disponível em: <https://www.pes-psrc.org/> .  
 MAMEDE, D. R., FILHO, J.M., 2013. "Proteção de sistemas elétricos de potência". Grupo GEN, Rio de Janeiro, 1ª Ed.  
 ONS (2021). Procedimentos de rede - submódulo 2.6. Operador Nacional do Sistema Elétrico.  
 SILVA, K.M.e. (2009). Estimacão de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Campina Grande.

## **8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.