

ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO DE ATUAÇÃO E OSCILOGRAFIA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DA SIEMENS MODELO SIPROTEC 7SJ81

Pedro Henrique Carvalho Monteiro¹; Felipe Laure Miranda².

¹Estudante de Engenharia Elétrica, IFTM, Campus Paracatu, pedro.monteiro@estudante.iftm.edu.br

²Professor do IFTM, Campus Paracatu, MG, felipelaure@iftm.edu.br

Resumo: Este artigo tem como objetivo principal investigar a aplicação da análise de oscilografias na otimização dos ajustes de relés de proteção em subestações. Através da análise detalhada da oscilografia dos dados capturados pelos relés de proteção, busca-se compreender as características das falhas ocorridas no sistema elétrico e avaliar a eficácia dos dispositivos de proteção na sua detecção e isolamento. A análise de oscilografia permite identificar o tipo de falta, a sua localização e a sequência de eventos que levaram à operação dos relés. Com base nessas informações, é possível realizar ajustes mais precisos nos relés, garantindo maior seletividade e rapidez na atuação em caso de falhas, o que contribui para a melhoria da confiabilidade e segurança do sistema elétrico. A relevância deste estudo reside na importância dos relés de proteção para a manutenção da integridade dos sistemas elétricos e na necessidade de otimizar seus ajustes para garantir um desempenho adequado. A análise de oscilografias se apresenta como uma ferramenta fundamental para essa tarefa, permitindo a identificação de possíveis falhas nos ajustes dos relés e a implementação de medidas corretivas.

Palavras-chave: oscilografia; análise de faltas; curto-circuito; relé de proteção.

CASE STUDY ANALYSIS OF PERFORMANCE AND OSCILLOGRAPHY OF THE SIEMENS SIPROTEC 7SJ81 PROTECTION RELAY

Abstract: This article aims to investigate the application of oscillography analysis in optimizing the settings of protection relays in substations. By conducting a detailed examination of the oscillographic data captured by protection relays, the study seeks to understand the characteristics of system faults and assess the effectiveness of protection devices in detecting and isolating these faults. Oscillography analysis enables the identification of fault types, their locations, and the sequence of events leading to the relay operations. Based on this information, more precise relay adjustments can be made, ensuring greater selectivity and faster response in the event of faults, thereby enhancing the reliability and safety of the power system. The relevance of this study lies in the critical role of protection relays in maintaining the integrity of power systems and the need to optimize their settings to ensure proper performance. Oscillography analysis emerges as a fundamental tool for this purpose, allowing the identification of potential issues in relay settings and the implementation of corrective measures.

Keywords: oscillography; fault analysis; short circuit; protection relay.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de sistemas de proteção é uma importante etapa em projetos de subestações. Entre os dispositivos utilizados na proteção dos equipamentos, os relés são equipamentos que exigem contínuos estudos de ajustes de parametrização de modo a garantir a segurança e a seletividade da proteção. Como ferramenta de auxílio à proteção dos sistemas, o estudo e análise de oscilografias pode ser utilizado na detecção e predição de faltas nos sistemas, reduzindo assim os impactos dos defeitos. A oscilografia corresponde ao registo das oscilações de grandezas elétricas do sistema de energia, como tensões e correntes, durante uma perturbação elétrica. Um oscilograma é, dessa forma, um ficheiro com um conjunto de grandezas e duração temporal pré-determinada, originado em consequência da identificação de uma perturbação elétrica.

Nesse contexto, os relés de proteção, dispositivos responsáveis por detectar falhas e interromper o fornecimento de energia em situações de curto-circuito, desempenham uma função crítica na manutenção da estabilidade do sistema. A análise de oscilografia, técnica utilizada para capturar e armazenar os sinais elétricos durante falhas, surge como uma ferramenta crucial para aprimorar a detecção e a compreensão das falhas ocorridas, além de contribuir para o diagnóstico de problemas que possam comprometer a operação do sistema.

Este trabalho tem como objetivo investigar o funcionamento dos relés de proteção em uma subestação, utilizando a análise de oscilografia como ferramenta principal. O propósito do estudo apoia-se na importância que os relés desempenham na mitigação de danos em casos de falhas e na prevenção de danos em equipamentos vitais para o fornecimento de energia. Através da análise de dados coletados em um Registrador Digital de Perturbações (RDP), busca-se identificar as causas de possíveis falhas e avaliar a eficácia dos ajustes dos relés de proteção.

O registro de perturbações de curta duração é voltado essencialmente para a aquisição das formas de onda das tensões e correntes para fins de análise de distúrbios rápidos, principalmente de curto-circuitos. São utilizados registradores de perturbação de curta duração instalados nas subestações dos agentes de transmissão. Os equipamentos mais antigos registram as perturbações em papel, ao passo que os mais modernos utilizam tecnologia digital e são denominados Registradores Digitais de Perturbações – RDP, mas também são conhecidos como

oscilógrafos digitais. A partir da análise dos gráficos das medições armazenadas pelo RDP, em momentos antes, durante e depois da atuação do relé de proteção, é possível determinar qual o tipo de falta que levou o sistema de proteção a atuar, esse estudo é chamado de análise de oscilografia. Portanto, compreender a interação entre os relés de proteção, a oscilografia e as condições operacionais dessas instalações é fundamental para garantir uma boa confiabilidade e segurança do sistema, atendendo às necessidades energéticas atuais de forma eficiente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Investigar o funcionamento e a importância dos relés de proteção na subestação de usina solar em estudo, destacando a aplicação da oscilografia como objeto de análise na contribuição para a segurança e confiabilidade da operação elétrica em um todo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir o conceito de relé de proteção e analisar sua importância na operação de subestações elétricas;
- Examinar a relevância da análise de oscilografia na verificação de eventos de curto-circuito em sistemas elétricos;
- Descrever o funcionamento dos Registradores Digitais de Perturbação (RDPs) e sua contribuição para a obtenção de oscilações precisas;
- Interpretar oscilações registradas e discutir os objetivos da análise de perturbações em sistemas elétricos;
- Coletar dados do relé de proteção para simular cenários de curto-circuito em uma rede de média tensão (MT).

1.2 Delimitação

Essa pesquisa está voltada para o ramo da Engenharia Elétrica, delimitada aos estudos de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. O artigo foi desenvolvido com foco no funcionamento dos relés de proteção, usando como estudo de caso uma subestação de Usina Solar Fotovoltaica localizada em uma cidade do interior de Minas Gerais. O período de pesquisa deste artigo teve um intervalo de tempo de observação no início do mês de agosto de 2024 finalizando o período no mês de fevereiro de 2025,

analisando detalhadamente o modelo Siemens Siprotec 7SJ81, aplicado em subestações de média e alta tensão. O estudo tem como objetivo avaliar a eficiência do equipamento e de seu sistema operacional.

1.3 Problema

Os relés de proteção possuem grande importância na identificação de mitigação de faltas nos sistemas elétricos de potência. Neste ramo, há grandes desafios voltados à faltas ocasionadas por curto-circuito nas redes, onde a oscilografia do relés de proteção pode contribuir diretamente na identificação das causas de curto-circuitos. Dessa forma, assim como os relés de proteção atuam ao avistar uma falta, a análise de oscilografia auxilia na identificação da causa do problema desse curto-circuito.

1.4 Hipótese

O excesso de umidade em cabos de média tensão pode ocorrer por situações específicas de instalações como, por exemplo, a passagem desses cabos de fase por valas diretamente no solo em vez de se utilizar eletrodutos. O contato direto do cabeamento com o solo pode reduzir sua isolamento elétrica, principalmente na presença de intempéries naturais como chuvas e altas temperaturas do solo devido à incidência solar. Esses eventos promovem um aumento da evapotranspiração, ou seja, perda de água dos solos que pode ser absorvida em parte pelos condutores enterrados.

Figura 1: Cabo da Fase A da LT com falta de isolamento devido à alta umidade do local ocorrendo o curto-circuito monofásico-terra.



Fonte: o próprio autor, 2024.

A Figura 1 ilustra o desgaste ocorrido no cabo da Fase A devido a sua alta umidade, o que pode ser considerada uma causa provável do curto-circuito onde houve um contato de fuga da fase para a terra. Espera-se com este estudo que as medições e análises de oscilografia permitam identificar a recorrência do curto-circuito, e, assim, mitigar perdas de geração e no equipamento propriamente.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial Teórico

Os relés de proteção funcionam realizando as medidas das grandezas operacionais do sistema elétrico, como tensão e corrente. Os equipamentos que inicialmente realizam a primeira medição das grandezas operacionais do sistema elétrico são denominados transformadores de medidas, denominados, Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP). Os transformadores de corrente reproduzem no seu secundário as correntes que passam pelo primário, fornecendo essa grandeza analógica aos relés de proteção e aos dispositivos de medida, em valores muito pequenos de corrente, normalmente 1A a 5A. O mesmo ocorre com os transformadores de potencial, que reproduzem no seu secundário as tensões primárias, fornecendo aos relés de proteção os sinais analógicos em valores normalmente pequenos, entre 66V a 115V (IEEE, 2007).

Os sinais analógicos fornecidos pelos transformadores de medida aos relés são processados digitalmente e comparados com os valores ajustados nos relés. Se essas grandezas de medidas alcançarem os valores predefinidos nos relés e o tempo previsto para atuação, o relé envia para o disjuntor associado um sinal de abertura seccionando o trecho do sistema afetado. Nesse contexto, os autores Mamede Filho e Mamede D. R., descrevem os relés digitais como:

“Esses relés são dotados normalmente de uma unidade de oscilografia cujo objetivo é fornecer informações sobre as características das faltas. Em geral, a unidade é composta por duas funções distintas: a função de captura, que está relacionada com a obtenção da informação e o seu registro na memória do relé; e a função de visualização das informações armazenadas antes e durante as faltas. As principais informações referem-se às componentes harmônicas e sub-harmônicas presentes, a forma de onda da tensão, corrente, frequência etc.” (MAMEDE FILHO e MAMEDE D. R, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 2011, p. 321).

Os principais tipos de curto-circuitos ocorridos em sistemas elétricos de potência, são os do tipo curto-circuito monofásico (fase-neutro/fase-terra), bifásico (fase-fase) e trifásico (fase-fase-fase). O curto-circuito monofásico, ou fase-neutro, por sua vez, ocorre quando um condutor de fase toca diretamente o neutro, sendo mais comum em sistemas monofásicos e frequentemente causado por defeitos em equipamentos ou problemas na instalação elétrica. Já o curto fase-terra se caracteriza pelo contato de uma fase com o solo ou com uma estrutura aterrada, sendo um dos mais comuns, especialmente em sistemas elétricos de potência, podendo resultar em correntes elevadas dependendo do tipo de aterramento do sistema. Essas faltas, do tipo monofásicas, podem ser calculadas conforme Equação 1 (para Fase A):

$$I_0 = E \frac{1}{(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_g)} \quad (1)$$

$$I_a = 3I_0$$

Onde:

- E_1 é a tensão de sequência direta.
- Z_0 , Z_1 , Z_2 representam as impedâncias de sequência homopolar, direta e inversa, respectivamente.
- Z_g é a impedância do caminho de retorno à terra.

Entre os tipos de curto-circuito, o fase-fase acontece quando duas fases entram em contato direto, geralmente devido a falhas no isolamento, podendo gerar correntes elevadas. Os curtos do tipo bifásico podem ser calculados conforme Equação 2:

$$I_1 = E \frac{1}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)} \quad (2)$$

$$I_0 = -(Z_2 + Z_f)I_1 \frac{1}{(Z_2 + Z_f)} + (Z_0 + Z_f + 3Z_g)$$

Onde:

- Z_f é a impedância de falta (ou impedância associada ao curto-circuito).

O curto-circuito trifásico, por sua vez, pode ser considerado o mais severo para o sistema, pois envolve simultaneamente todas as fases do sistema elétrico. Esse tipo

de falha pode ser provocado por danos estruturais em equipamentos, como transformadores e geradores, e tende a gerar as correntes de curto mais elevadas, exigindo dispositivos de proteção robustos para interromper rapidamente a falha (MARDEGAN, 2016). O curto trifásico é obtido conforme Equação 3:

$$I1 = E \frac{1}{(Z1 + Zg)} = Ia \quad (3)$$

Diante desses cenários, a seletividade na proteção elétrica se torna um fator fundamental para garantir que, na ocorrência de um curto-circuito, apenas a parte afetada do sistema seja desenergizada, mantendo o restante da rede em operação. Esse conceito é essencial para evitar interrupções desnecessárias, melhorar a confiabilidade do sistema elétrico e reduzir os danos causados pelas falhas, tornando o gerenciamento da energia mais eficiente e seguro.

A interpretação da oscilografia e a análise de perturbações são essenciais para a manutenção e aprimoramento da confiabilidade dos sistemas elétricos de potência. Ao realizar uma análise da oscilografia de um relé de proteção, um software é utilizado para ler os dados obtidos das grandezas de valores coletados pelo TC e TP da linha, onde são armazenados nos respectivos relés dimensionados para o trecho da linha afetado. Os arquivos são gerados no formato COMTRADE, processados pelo software DIGSI 5 da Siemens, que armazena os dados obtidos pelo relé. Já o sistema SIGRA V4.61, também da fabricante Siemens, é responsável pela leitura das oscilografias. O software disponibiliza uma diversidade de estudos para a análise de uma oscilografia, como os valores em amplitude de cada fase nos momentos de pré-falta, durante a falta e pós-falta do ocorrido curto-circuito. Ao perceber e identificar uma falta em determinado trecho da LT, o relé dimensionado atuará e armazenará todos os valores obtidos durante o curto-circuito. No software DIGSI 5, é realizada a conexão do supervisor do projeto ao dispositivo de proteção através de um IP determinado para cada relé da subestação, em que cada dispositivo tem a sua comunicação em anel e, ao ingressar ao IP do relé afetado, é possível observar um armazenamento do histórico deste relé na data e horário do ocorrido.

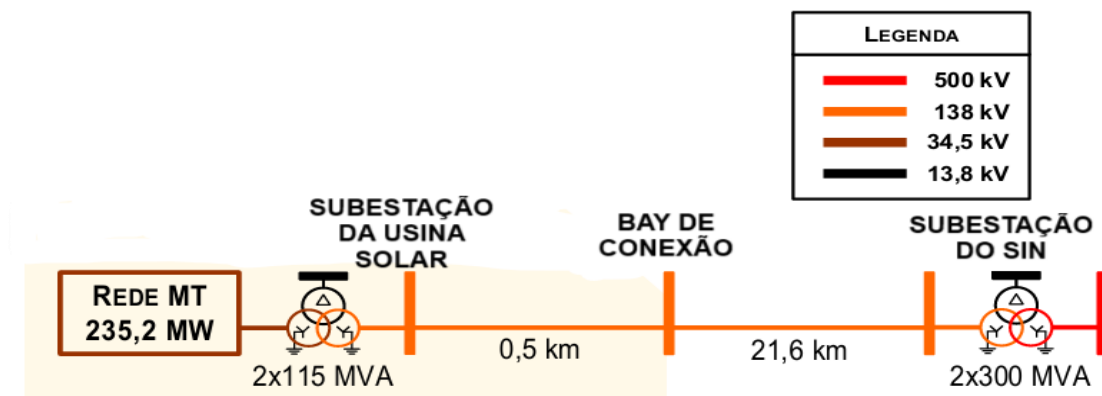
Com o histórico registrado e armazenado, é realizada a exportação do arquivo no formato COMTRADE para assim prosseguir a uma análise dos distúrbios das ondas visto pelo TC e pelo TP conectado ao relé.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Localidade da instalação protegida pelo relé SIPROTEC 7SJ81

A subestação de objeto deste trabalho é localizada em uma cidade no interior de Minas Gerais, que comporta uma carga máxima nominal de 267 MWp e 235,2 MW de potência instalada de geração fotovoltaica. Essa potência chega através de linhas de transmissão com cabos de alumínio de 630 mm² subterrâneos em contato diretamente com o solo. Na entrada de cada circuito à subestação, são instalados TC's e TP's no barramento para medição e proteção, cuja potência instalada é dividida em dois transformadores de 115 MVA, instalados no pátio da subestação. A tensão é convertida de 34,5 kV para 138 kV e conduzida através de uma linha de transmissão para uma subestação coletora do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Figura 2: Demonstração da Conexão da Subestação da Usina Solar ao Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: o próprio autor, 2025.

A Figura 2 demonstra o sistema de conexão da subestação mencionada com o Sistema Interligado Nacional (SIN), onde a potência é gerada a uma tensão de 34,5 kV, elevada para 138 kV através de dois transformadores de 115 MVA. Um Bay de Conexão interliga a subestação em análise com outra subestação de usina fotovoltaica através de uma linha de transmissão de 21,6 km de comprimento até chegar à subestação coletora do SIN onde ocorre a elevação de 138 kV para 500 kV. Nesta última etapa, dois transformadores de 300 MVA operam em paralelo, distribuindo a carga das subestações geradoras.

2.2.2 Relé de Proteção Siemens modelo Siprotec 7SJ81

Figura 3: Relé de Proteção da Siemens modelo Siprotec e as suas conexões de entradas.



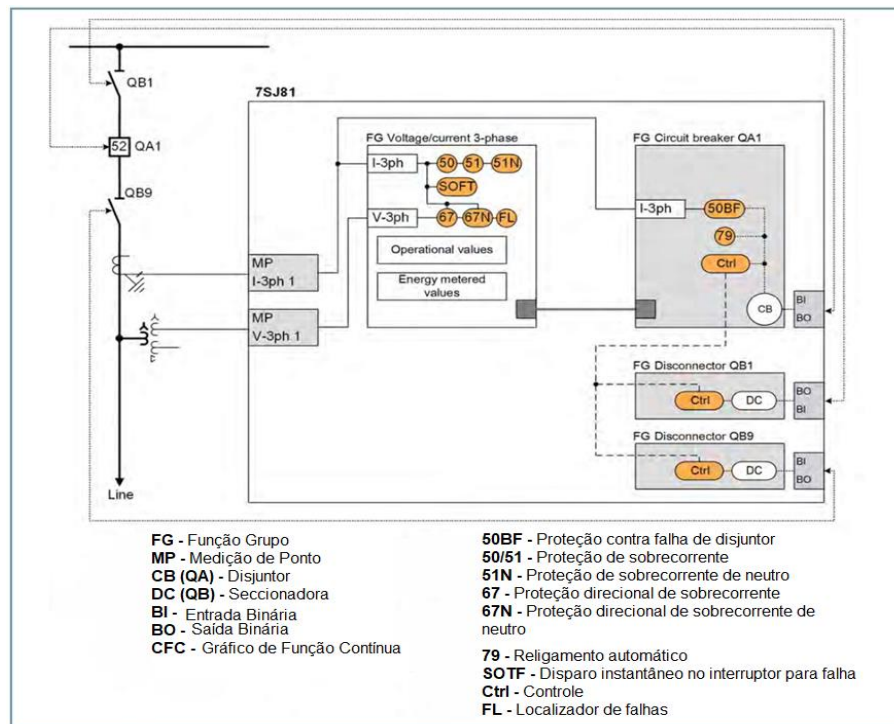
Fonte: o próprio autor, 2025.

O relé de proteção Siprotec, ilustrado na Figura 3, é um moderno dispositivo da fabricante Siemens e está em sua versão SIPROTEC 5, inserido ao mercado desde 2012. O Dispositivo Eletrônico Inteligente (IED), ou relé, possui uma diversidade de proteções, configurações, comunicações e funcionalidades dentre as quais pode-se citar como mais relevantes as Integrações Funcionais de Proteção (possui 5 configurações de proteção), Controle (blocos baseados no padrão IEC 61131-3), Automação (CFC-Continuous Function Chart, função de blocos), Comunicação (IEC 60870-5-103, serial DNP3 e TCP/IP, Modbus TCP, IEC 60870-5-104 e IEC 61850 Ed1 e Ed2) e Segurança Cibernética (mecanismos de segurança multicamadas em todos os links do sistema), monitoramento da estabilidade da rede elétrica (PMUs – unidades de medições fasoriais) e monitoramento da qualidade de energia (EM 50160), monitoramento de equipamentos (disjuntores, transformadores e compartimentos de gás em disjuntores isolados a gás (GIS)), e automonitoramento (detecta falhas internas e externas em circuitos secundários).

Para comunicação com o relé, um IP específico permite fácil acesso tanto da equipe de manutenção em campo como da equipe de Engenharia de Proteções e Controle, que podem realizar eventuais mudanças necessárias em seus parâmetros.

Em razão da facilidade de comunicação, o modelo Siprotec 5 detém uma funcionalidade denominada Segurança Cibernética, que permite apenas pessoas autorizadas terem acesso às suas funções. As funções parametrizáveis no relé em estudo, desde a chegada da linha de transmissão à usina até o cubículo de 34,5 KV, são ilustradas na Figura 4 a seguir:

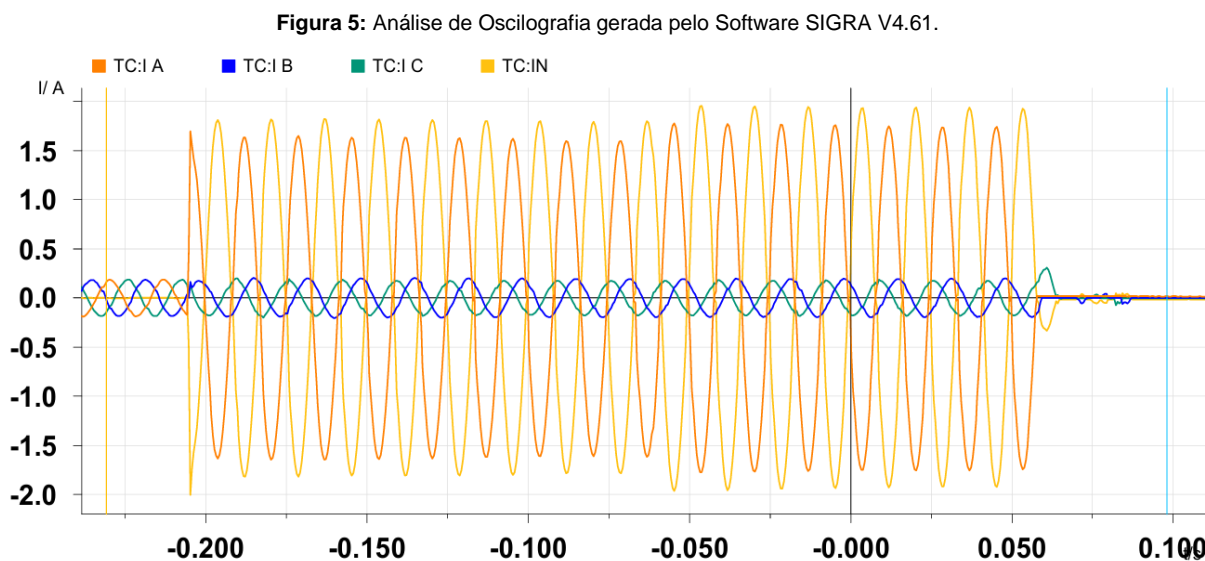
Figura 4: Bloco de funções do Relé 7SJ81.



Fonte: o próprio autor, 2025.

2.2.3 Análise da Oscilografia

Um aspecto importante na gestão de sistemas elétricos é a análise de perturbações através de oscilografias. Esta técnica permite a coleta e registro dos dados necessários para investigações detalhadas visando compreender o comportamento de componentes críticos como relés de proteção e disjuntores em condições adversas, como curtos-circuitos. Esta abordagem é essencial para identificar e resolver falhas sistêmicas, melhorando assim a confiabilidade e segurança da rede elétrica.



Fonte: o próprio autor, 2025.

A Figura 5, representa uma oscilografia oriunda de uma falta decorrente de um curto-circuito monofásico do tipo fase-terra. Inicialmente é possível observar, de acordo com as ondas de corrente de cada fase, a ocorrência de um curto-circuito na fase A para a terra (monofásico-terra). A simples visualização das senóides na Figura 5 permite aferir, a partir dos ângulos fasoriais, que a falta afetou apenas a fase A na oscilografia descrita. No entanto, um estudo mais aprofundado da ocorrência necessita de uma análise das condições do sistema antes, durante e após a falta. Dessa forma, a equipe pode observar presença de anormalidades no sistema anteriormente à falta, como desequilíbrios de fase devido a perturbações.

Ocasionalmente, oscilografias podem apresentar comportamentos importantes antes e após a ocorrência de defeitos. Isso retrata a importância do RDP para armazenar e registrar dados para análise posterior da equipe de engenharia e manutenção. O registro cronológico das ocorrências permite verificar a frequência das falhas e as condições prévias que levaram ao defeito. Dessa forma, é possível tomar decisões preventivas de modo a evitar futuras interrupções no serviço.

O RDP utilizado, cuja função básica é armazenar os valores de medição de todas as entradas analógicas oriundas dos TC's e TP's, é dividido em módulos de aquisição de dados. O primeiro módulo é responsável pelo armazenamento das grandezas elétricas, enquanto o segundo módulo é responsável pelo processamento e aquisição de dados, mostrando informações de forma gráfica ou por tabela de dados. O RDP possui memória limitada, de modo que, após falta de espaço, o

armazenamento dos valores de perturbação é atualizado automaticamente após cada novo registro. Quando a capacidade máxima for atingida, o registro mais recente substituirá automaticamente o mais antigo, garantindo que os dados mais atuais sejam sempre preservados.

Figura 6: Registrador Digital de Perturbações da Siemens modelo Siprotec e as suas entradas de conexões.



Fonte: o próprio autor, 2025.

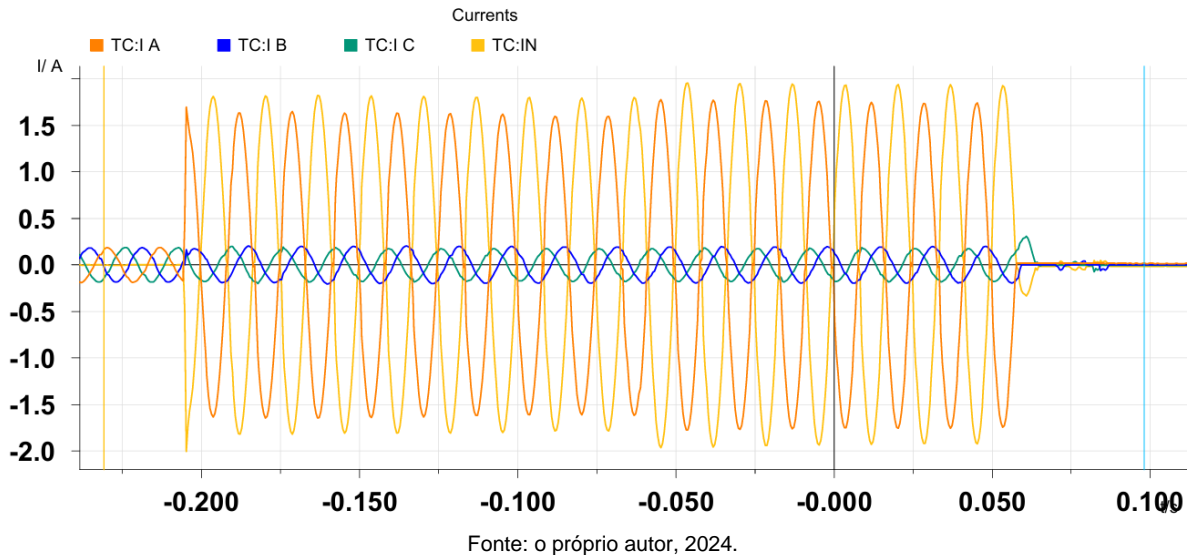
2.3 Resultados e Discussão

No estudo de caso avaliado, referente à constatação de uma falha do tipo curto-circuito fase-terra, foi observado um desligamento do transformador que alimenta o circuito do barramento da linha de transmissão. A análise preliminar dessa falta foi efetuada com base nas medições oriundas dos transformadores de instrumento interligados ao relé, onde os dados são processados pelo software SIGRA V4.61. As oscilografias da falha permitem observar o comportamento das senóides de corrente e tensão no momento do defeito, conforme ilustrado na Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

Na Figura 7 observa-se que, tanto no instante antes da falta, como durante a ocorrência, os TC's referentes às fases B e C fornecem leituras nominais de corrente, enquanto a fase A, bem como a leitura de corrente de neutro, apresentam claramente um degrau de corrente no momento do defeito. Essa característica oscilatória caracteriza um curto-circuito do tipo monofásico entre a fase A e a terra. Após o

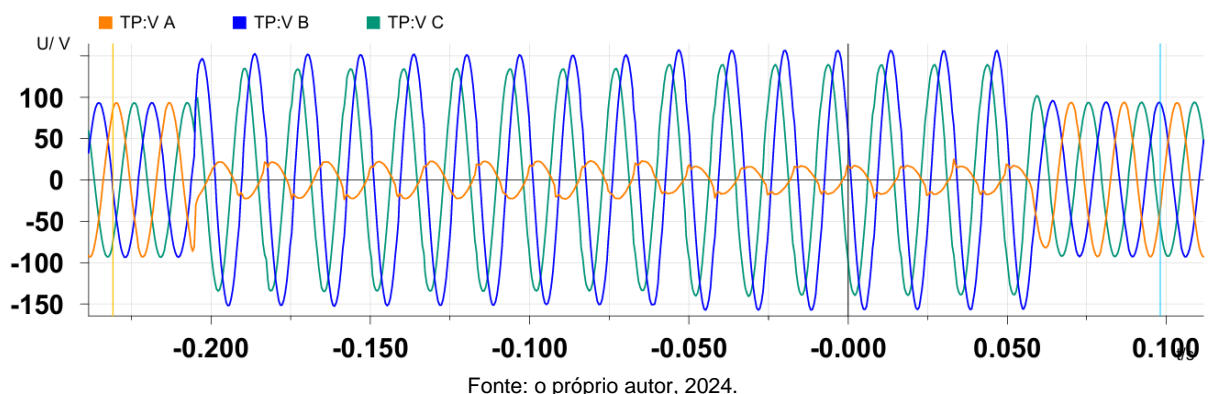
defeito, a proteção atua no desligamento do circuito, o que pode ser observado pela supressão das leituras de corrente em todas as fases do alimentador.

Figura 7: Distúrbios das ondas de corrente vistos pelo TC das três fases no curto-circuito ocorrido na LT.



Já a Figura 8 ilustra o comportamento das tensões nas fases observadas pelos TP's conectados. Imediatamente antes do defeito se verifica que as três fases apresentam simetria em módulo e defasagem, ou seja, operando de modo normal. Na ocorrência do curto-circuito, já caracterizado como uma falha monofásica na fase A, observa-se um afundamento de tensão exatamente na fase do defeito, enquanto as fases B e C mantêm-se em seus valores nominais. Tal comportamento gráfico reforça o tipo de falha mencionada e corretamente detectada pelo relé.

Figura 8: Distúrbios das ondas de tensão vistos pelo TP das três fases no curto-circuito ocorrido na LT.



O Quadro 1 resume as leituras dos transformadores de instrumento no momento do curto-circuito, referentes ao módulo e ângulo do valor medido e o valor de pico extremo detectado.

Quadro 1: Valores de secundário coletados no momento do TRIGGER (momento em que ocorreu os maiores valores de distúrbios no momento do curto) das três fases no curto-circuito ocorrido na LT.

Sinal de Medição	Valor Medido	Ângulo	Pico Extremo
TC:I A	1,2359 A	-177,8 °	-0,02207 A
TC:I B	138,06 mA	121,8 °	197,01 mA
TC:I C	121,38 mA	-117,1 °	178,4 mA
TC:IN	1,3628 A	1,6 °	-1,9366 A
TP:V A	12,457 V	29,6 °	17,080 V
TP:V B	111,20 V	146,6 °	156,84 V
TP:V C	98,368 V	-147,1 °	139,64 V
TC:3I0	1,3620 A	-178,4 °	1,9362 A
TP:3V0	165,22 V	175,1 °	234,44 V

Fonte: o próprio autor, 2025.

No Quadro 2 e Quadro 3 são apresentados os parâmetros de ajuste dos TC's e TP's, ou seja, as relações de transformação de corrente e de tensão, respectivamente. Com essas relações, é possível calcular os valores primários de corrente e tensão observados pelo relé de proteção.

Quadro 2: Características e RTC do Transformador de Corrente instalado no circuito derivado do curto.

Primário	Secundário	Característica	Relação Ligada
Transformador de Corrente			
Cubículos de 34,5kV			
300-600 A	1 A	20VA - 5P20	600/1

Fonte: o próprio autor, 2025.

Quadro 3: Características e RTP do Transformador de Potencial instalado na subestação.

Alimentadores 34,5kV				
Primário	Secundário	Relação	Características	Relação Ligada
34.500 / $\sqrt{3}$ V	115 / $\sqrt{3}$ V	300/1	3P - 50VA	300/1

Fonte: o próprio autor, 2025.

Valores calculados do lado primário do curto-circuito:

TC da Fase A: $1,2359 \times 600 = 741,54$ A

TC da Fase B: $0,13806 \times 600 = 82,836$ A

TC da Fase C: $0,12138 \times 600 = 72,828$ A

TP da Fase A: $(12,457 \times (34500 / \sqrt{3})) / (115 / \sqrt{3}) = 3.737,1$ Vf

TP da Fase B: $(111,20 \times (34500 / \sqrt{3})) / (115 / \sqrt{3}) = 33.360$ Vf

TP da Fase C: $(98,368 \times (34500 / \sqrt{3})) / (115 / \sqrt{3}) = 29.510,4$ Vf

Observa-se que os valores de tensão acima são por fase.

Quadro 4: Valores nominais médios visto pelo lado primário do TC e do TP instalado no circuito.

Sinal de Medição	Valor Nominal Médio
TC:I A	251,02 A
TC:I B	251,02 A
TC:I C	251,02 A
TP:V A	19.918,58 V
TP:V B	19.918,58 V
TP:V C	19.918,58 V

Fonte: o próprio autor, 2025.

O Quadro 4 apresenta os valores médios nominais de tensão em cada fase. Para se obter os valores máximos de corrente, é utilizada a potência nominal de 15 MW e a tensão de fase de 19,9 KV. Com base nessa relação, obtém-se uma corrente nominal de cerca de 251 A. Ao comparar com os valores vistos pelo primário do transformador do circuito, observa-se uma diferença na corrente da fase A em relação ao valor nominal, caracterizando a condição da falha descrita. Observa-se ainda aumento nos valores medidos pelos TP's das fases B e C.

É importante destacar que os valores de curto-circuito monofásico (fase-terra) máximo observado no projeto de estudo de curto-circuito e seletividade para este tipo de falha deste projeto, correspondem a uma corrente máxima de 949,7 com ângulo de 13,5° negativo. Dessa forma, ao sensibilizar o relé em uma corrente de 741,54 A, fica claro que as proteções atuam para um valor de corrente menor que o de projeto. Isso ocorre em razão dos valores de impedância do transformador instalado em campo e as impedâncias do cabo utilizado no circuito. Nesse caso, é possível constatar a atuação correta dos dispositivos, respeitando os requisitos básicos de proteção como a seletividade e confiabilidade do sistema.

As funções de proteção que atuaram no defeito foram as do tipo sobrecorrente temporizada de neutro (51N) e sobrecorrente temporizada de falta à terra (51G).

Por fim, com base nos dados obtidos pelo RDP instalado no projeto, foi possível concluir através da análise de oscilografia das fases que o tipo de falha detectada ocorreu em razão de falta de isolamento no cabo de alimentação do transformador, conforme ilustrado na Figura 1. Dessa forma, os estudos de oscilografia podem ser utilizados como ferramentas de suporte na engenharia de proteção de sistemas e auxiliar nos procedimentos de manutenção dos circuitos de modo a evitar falhas futuras nos sistemas. O monitoramento dos dados de proteção pode permitir ainda a

detecção prévia de tipos de falha, oriundas de condições atreladas a deterioração de equipamentos ou mesmo de condições rápidas, como o estudo de caso descrito.

3 CONCLUSÃO

A análise da atuação do relé de proteção Siemens SIPROTEC 7SJ81, aplicada a uma subestação de usina solar fotovoltaica, demonstrou a relevância da oscilografia como ferramenta essencial para diagnóstico e otimização dos sistemas de proteção elétrica. Através da interpretação dos registros capturados pelo relé e processados no software SIGRA V4.61, foi possível identificar a ocorrência de um curto-circuito monofásico fase-terra, avaliar os impactos da falha sobre o sistema e validar a resposta do relé frente a esse evento.

Os resultados apontaram que a parametrização adequada do relé permitiu uma atuação eficiente das proteções, interrompendo a falta antes que a corrente atingisse valores críticos, o que garantiu a integridade dos equipamentos e minimiza perdas operacionais. A análise da oscilografia revelou um comportamento instantâneo da falha, indicando que a degradação da isolação do cabo da fase A ocorreu de maneira abrupta, sem sinais prévios de deterioração gradual. Esse achado reforça a necessidade de inspeções periódicas e aprimoramento das metodologias preditivas de manutenção, utilizando a oscilografia não apenas para análise pós-evento, mas também como ferramenta preventiva.

Além disso, o estudo evidenciou a importância da configuração correta das funções de proteção 50/51N e 50/51NE, responsáveis pela detecção de sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro e falta à terra. A seletividade dos ajustes garantiu que apenas o trecho afetado fosse desenergizado, evitando desligamentos desnecessários em outros circuitos e contribuindo para a confiabilidade da subestação.

Dessa forma, o estudo reforça a importância da oscilografia na engenharia de proteção de sistemas elétricos, tanto para a análise e mitigação de falhas quanto para a otimização dos ajustes de relés. Como perspectiva futura, recomenda-se a implementação de técnicas de aprendizado de máquina para a identificação automática de padrões em registros oscilográficos, permitindo diagnósticos mais rápidos e eficientes. Além disso, a ampliação da base de dados de eventos registrados possibilitaria um refinamento contínuo dos ajustes de proteção, garantindo maior

segurança e estabilidade à rede elétrica. E consequentemente, a alteração de projeto onde consiste em evitar o uso de cabos em valas diretamente em contato com o solo para cabos de passagem aérea através de estruturas de transmissão de energia até a chegada do cubículo na subestação, evitando o contato com a umidade do solo seria uma correção para mitigar o curto-circuito com a terra. As instalações das estruturas devem ser feitas de forma a não afetar a geração da usina solar com sombreamentos dessas estruturas sobre os módulos fotovoltaicos. Instalações de funções como a função de Relé de Distância de Impedância não evitaria o curto-circuito, mas auxiliaria de forma a encontrar a localidade do curto.

REFERÊNCIAS

GOMES, Carlos Alberto Batalha; LIMA, Alexandre K. S. **Análise de oscilografias para diagnóstico de falhas em sistemas de proteção**. *Revista Brasileira de Eletrônica e Sistemas de Energia*, v. 40, n. 1, p. 45-53, 2022.

GUERRA, Mariana Martins. **Especificação dos Requisitos de um Sistema Automático de Aquisição e Tratamento de Oscilografia para apoio à manutenção dos Sistemas de Proteção da Rede Nacional de Transporte**. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE C37.110-2007 - **Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes**. New York: IEEE, 2007.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MARDEGAN, Cláudio Sérgio (2016). **Capítulo XII: Tipos de faltas mais comuns**. O Setor Elétrico”, Edição 131, dezembro de 2016. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-xii-tipos-de-faltas-mais-comuns/>. Acesso em: 08 jan. 2025.

ONS. Submódulo 11.6. **Registro de Perturbações**. Brasília, 2017. Disponível em: https://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FMódulo%2011%2FSubmódulo%2011.6%2FSubmódulo%2011.6_Rev_0.1.pdf. Acesso em: 03 dez. 2024.

PAULO, S. **Estudo, Projeto e Desenvolvimento de um Sistema para Localizar Faltas em Redes de Distribuição**. Paulo S. Pereira, PhD, 2016.