



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS EDUARDO LIMA DE MORAIS

**CONFIGURAÇÃO E TESTES DAS PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE
CUBÍCULO DE MÉDIA TENSÃO NA PLANTA HÍBRIDA DE UM COMPLEXO
EÓLICO BAIANO**

Recife
2025

LUIS EDUARDO LIMA DE MORAIS

**CONFIGURAÇÃO E TESTES DAS PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE
CUBÍCULO DE MÉDIA TENSÃO NA PLANTA HÍBRIDA DE UM COMPLEXO
EÓLICO BAIANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Morais, Luis Eduardo Lima de.

Configuração e testes das proteções de sobrecorrente de cubículo de média tensão na planta híbrida de um complexo eólico baiano / Luis Eduardo Lima de Moraes. - Recife, 2025.

106 p. : il., tab.

Orientador(a): Vicente Ribeiro Simoni

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Proteção de sistemas elétricos. 2. Proteção de sobrecorrente. 3. IED SIEMENS. 4. Cubículos de média tensão. 5. Comissionamento. I. Simoni, Vicente Ribeiro. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUIS EDUARDO LIMA DE MORAIS

**CONFIGURAÇÃO E TESTES DAS PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE
CUBÍCULO DE MÉDIA TENSÃO NA PLANTA HÍBRIDA DE UM COMPLEXO
EÓLICO BAIANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 14/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Msc. Antonio Gustavo Evangelista Muniz (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho: a meus pais, à minha esposa, a meus avós, aos meus familiares em geral, à comunidade acadêmica e aos profissionais engenheiros eletricitas do setor de proteção, controle e automação de subestações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor Deus, por ter me dado inteligência, paciência e entendimento para escolher esta digníssima profissão para a minha vida e ter sido paciente comigo todas as vezes que pensei em desistir do curso.

Agradeço aos meus avós paternos e maternos: Severino A. da Silva (*in memoriam*) e Maria J. de M. Silva, José D. de Lima (*in memoriam*) e em especial a minha vó materna *Bá (Sebastiana de Souza Lima - in memoriam)* que apesar de não ter “estudo”, sabia do poder da educação para o nosso futuro e sempre custeou e investiu em escolas de qualidade para seus netos estudarem.

Agradeço: à minha esposa Mariana Roberta, por ter estado comigo praticamente durante todo o curso, ter visto as dificuldades que passei durante os semestres, mas sempre ter me incentivado a continuar e nunca desistir, ao meu irmão e cunhada Lucas Ewerton e Letícia Breguedo por todo o apoio e incentivo; e a meus pais: Wellington Moraes e em especial a minha mãe Nadilza Moraes (*in memoriam*) que, apesar de também não terem curso superior, sempre me incentivaram a estudar e a fazer um curso superior em universidade pública, sempre respeitaram minhas escolhas e deram o apoio e suporte necessário para seus filhos estudarem com o maior conforto possível. E aos familiares em geral que sempre me apoiaram: Obrigado por tudo!

Da comunidade acadêmica, agradeço a todos os amigos que fiz no curso e me auxiliaram nesta caminhada tão árdua e em especial a: Lucas Belarmino, pela oportunidade me dada de adentrar na área de proteção e controle de subestações; Genilson Souza e Matheus Urbano, por todo o incentivo técnico e acadêmico durante o curso e na escrita deste documento. Agradeço aos professores por terem compartilhado um pouco do seu conhecimento comigo, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Vicente Ribeiro, que aceitou me orientar e conduziu este trabalho da melhor maneira possível.

Por fim, agradeço à ESC Engenharia pela oportunidade a mim concebida de aprender um pouco mais sobre a área de comissionamento, proteção de sistemas elétricos, SPCS de subestações e poder contribuir na área conforme aprendi com vocês.

“Não há mal que sempre dure, nem bem que nunca
acabe.”
Provérbio Popular.

RESUMO

Este estudo analisa a configuração e os testes das proteções cadastradas no relé de proteção durante a etapa de comissionamento do cubículo 5 da planta híbrida de um complexo eólico no estado da Bahia. Por meio de um estudo de caso, investiga-se os critérios de parametrização dos sistemas de proteção, avaliando o desempenho do disjuntor de média tensão frente à injeção de carga realizada com equipamento de teste de relés, observando o correto processamento da lógica de proteção implementada originalmente em relés digitais. A metodologia envolveu a análise de sequências de testes, avaliações de tempo e registros oscilográficos coletados durante os testes de aceitação de campo (TAC). Foram examinadas a celeridade e a eficácia das atuações dos dispositivos de proteção em cenários críticos, verificando o momento correto da abertura do disjuntor do sistema elétrico local. Os resultados indicam que os testes apresentaram sucesso em todas as proteções testadas.

Palavras-chave: Proteção de Sistemas Elétricos, Proteção de Sobrecorrente, IED SIEMENS, Cubículos de média tensão, Comissionamento.

ABSTRACT

This study analyzes the configuration and testing of the protections registered in the protection relay during the commissioning stage of cubicle 5 of the hybrid plant of a wind complex in the state of Bahia. Through a case study, the criteria for parameterizing the protection systems are investigated, evaluating the performance of the medium voltage circuit breaker in the face of load injection carried out with relay test equipment, observing the correct processing of the protection logic originally implemented in digital relays. The methodology involved analyzing test sequences, time evaluations and oscillography records collected during field acceptance tests (FAT). The speed and effectiveness of the actions of the protection devices in critical scenarios were examined, verifying the correct moment for opening the circuit breaker of the local electrical system. The results indicate that the tests were successful for all the protections tested.

Keywords: Electrical System Protection, Overcurrent Protection, IED SIEMENS, Medium Voltage Cubicles, Commissioning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Variação percentual do consumo setorial de eletricidade.....	17
Figura 2: Participação das diferentes fontes de geração na matriz elétrica brasileira em 2025.....	18
Figura 3: Exemplo de um aerogerador.....	23
Figura 4: Evolução da capacidade instalada de aerogeradores.....	24
Figura 5: Média anual do total diário da irradiação direta normal no Brasil.....	25
Figura 6: Exemplo de conexão de sistemas fotovoltaicos.....	26
Figura 7: Diagrama de formação de um BESS.....	28
Figura 8: Exemplo de sistemas BESS montados em containers.....	29
Figura 9: Exemplo de um Sistema de Potência.....	31
Figura 10: Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia.....	33
Figura 11: Exemplo de SE abrigada.....	39
Figura 12: Exemplo de junção da parte de medição e proteção cubículos metálicos.....	40
Figura 13: Exemplo do cubículo de transformação em instalação abrigada.....	41
Figura 14: Exemplo de disjuntor de média tensão a vácuo.....	41
Figura 15: Exemplo de TP interno de 36,2 kV.....	42
Figura 16: Exemplo de TC interno de 36,2 kV.....	43
Figura 17: Exemplo de seccionadora de abertura vertical.....	43
Figura 18: Equipamentos elétricos presentes em cubículo de medição e proteção..	44
Figura 19: Chave de aferição de embutir com 10 polos.....	45
Figura 20: Relé Eletromecânico da General Electric.....	47
Figura 21: Relé estático de função de sobrecorrente de neutro.....	48
Figura 22: Componentes da arquitetura do relé digital.....	49
Figura 23: Relé digital de proteção Siemens 7SJ85.....	51
Figura 24: Curva de operação do relé digital.....	53
Figura 25: Curva normalmente inversa.....	54
Figura 26: Representação simplificada de estágio da função de proteção contra sobrecorrente trifásica.....	57
Figura 27: Estrutura embarcada da função de proteção de sobrecorrente de fase, avançada.....	60

Figura 28: Diagrama lógico das indicações do grupo de proteção de sobrecorrente	60
Figura 29: Diagrama lógico do estágio de tempo definido da função de sobrecorrente de fase, avançado	61
Figura 30: Diagrama lógico do estágio com curva característica de tempo inverso da função de sobrecorrente de fase, avançado	62
Figura 31: Ajustes parametrizáveis do estágio de tempo definido da função de sobrecorrente de fases, avançada	63
Figura 32: Ajustes parametrizáveis do estágio da curva característica de tempo inverso da função de sobrecorrente de fases, avançada	63
Figura 33: Estrutura embarcada da função de proteção de sobrecorrente de neutro, avançada	67
Figura 34: Diagrama lógico da seleção de medição de valor	67
Figura 35: Diagrama lógico do estágio de tempo definido da função de sobrecorrente de neutro, avançado	68
Figura 36: Diagrama lógico do estágio com curva característica de tempo inverso da função de sobrecorrente de neutro, avançado	68
Figura 37: Caixa de seleção de medição do valor de corrente da função de sobrecorrente de neutro	69
Figura 38: Ajustes gerais da gravação de oscilografias	70
Figura 39: Ajustes específicos da gravação de oscilografias	70
Figura 40: Traseira do módulo base do IED SIEMENS 7SJ85 utilizado no projeto	73
Figura 41: Diagramas de circuitos analógicos do módulo IO202	73
Figura 42: Diagrama unifilar do cubículo cinco da planta híbrida	75
Figura 43: Exemplo de visualização no DIGSI 5 de oscilografia gravada	76
Figura 44: Equipamento de teste de relés CMC356 da OMICRON	77
Figura 45: Exemplo de infraestrutura de montagem para injeção de carga no IED	79
Figura 46: Exemplo de simulação de falta na fase A no <i>State Sequencer</i>	79
Figura 47: Avaliação de tempo do <i>State Sequencer</i>	81
Figura 48: Ajustes da proteção de sobrecorrente de fase no estágio de tempo definido 1	83
Figura 49: Sequência de estados para atuação da função 50TD fase A	84
Figura 50: Oscilografia gravada da atuação da função 50TD fase A	85
Figura 51: Sequência de estados para atuação da função 50TD fase B	85
Figura 52: Oscilografia gravada da atuação da função 50TD fase B	86

Figura 53: Sequência de estados para atuação da função 50TD fase C	87
Figura 54: Oscilografia gravada da atuação da função 50TD fase C.....	88
Figura 55: Sequência de estados para atuação da função 50TD trifásica	88
Figura 56: Oscilografia gravada da atuação função 50TD trifásica	90
Figura 57: Ajustes da proteção de sobrecorrente de fase no estágio de tempo inverso	90
Figura 58: Sequência de estados para atuação da função 51 fase A.....	91
Figura 59: Oscilografia gravada da atuação da função 51 fase A	92
Figura 60: Sequência de estados para atuação da função 51 fase B	93
Figura 61: Oscilografia gravada da atuação da função 51 fase B	94
Figura 62: Sequência de estados para atuação da função 51 fase C.....	94
Figura 63: Oscilografia gravada da atuação da função 51 fase C	95
Figura 64: Sequência de estados para atuação da função 51 trifásica.....	96
Figura 65: Oscilografia gravada da atuação função 51 trifásica	97
Figura 66: Ajuste geral de valor medido para a função sobrecorrente de neutro.....	98
Figura 67: Ajustes da proteção de sobrecorrente de neutro por tempo definido.....	98
Figura 68: Sequência de estados para atuação da função 50N	98
Figura 69: Oscilografia gravada da atuação da função 50N	99
Figura 70: Ajustes da proteção de sobrecorrente de neutro por tempo inverso.....	100
Figura 71: Sequência de estados para atuação da função 51N	101
Figura 72: Oscilografia gravada da atuação da função 51N	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos textos e números dos elementos hierárquicos	58
Tabela 2: Parâmetros, indicações e números associados a função de sobrecorrente	59
Tabela 3: Resultados esperados para o estágio temporizado dos testes de sobrecorrente	82
Tabela 4: Resultados esperados para o estágio de tempo definido dos testes de sobrecorrente	82
Tabela 5: Avaliação de tempo para atuação da função 50TD fase A	84
Tabela 6: Avaliação de tempo para atuação da função 50TD fase B	86
Tabela 7: Avaliação de tempo para atuação da função 50TD fase C	87
Tabela 8: Avaliação de tempo para atuação função 50TD trifásica	89
Tabela 9: Avaliação de tempo para atuação da função 51 fase A	92
Tabela 10: Avaliação de tempo para atuação da função 51 fase B	93
Tabela 11: Avaliação de tempo para atuação da função 51 fase C	95
Tabela 12: Avaliação de tempo para atuação função 51 trifásica	96
Tabela 13: Avaliação de tempo para atuação da função 50N	99
Tabela 14: Avaliação de tempo para atuação da função 51N	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/ Digital
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BI	<i>Binary Input</i>
BO	<i>Binary Output</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
Chesf	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
COMTRADE	<i>Common Format for Transient Data Exchange</i>
EI	Extremamente Inversa
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H ₂ V	Hidrogênio Verde
IC	Inversa curta
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LI	Longa Inversa
MI	Muito Inversa
MPCCS	Medição, Proteção, Controle, Comando e Supervisão
MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira
NI	Normalmente Inversa
OIE	Oferta Interna de Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento

PCS	<i>Power Conversion System</i>
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PPC	<i>Power Plant Controller</i>
PROM	<i>Programmable Read-Only Memory</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
RTC	Relação do Transformador de Corrente
RTP	Relação do Transformador de Potencial
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	Subestação
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SHE	Sistema Híbrido de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPCS	Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão
SV	<i>Sampled Values</i>
TAC	Teste de Aceitação em Campo
TC	Transformador de Corrente
TMS	<i>Time Multiplier Setting</i>
TP	Transformador de Potencial
VCA	Tensão Alternada
VCC	Tensão Contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Geral	20
1.3.2	Específicos	20
1.4	METODOLOGIA.....	20
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	FONTES RENOVÁVEIS.....	22
2.1.1	Energia Eólica	23
2.1.2	Energia Solar.....	24
2.2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS	27
2.3	USINAS HÍBRIDAS	29
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
3.1	SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	30
3.1.1	Composição de um Sistema Elétrico de Potência	31
3.2	SUBESTAÇÕES.....	34
3.2.1	Classificação das SE.....	34
3.2.1.1	<i>Quanto ao nível de tensão.....</i>	<i>35</i>
3.2.1.2	<i>Quanto à categoria de utilização</i>	<i>36</i>
3.2.1.3	<i>Formas de operação</i>	<i>36</i>
3.2.1.4	<i>Quanto às funções das subestações.....</i>	<i>37</i>
3.2.1.5	<i>Quanto ao tipo construtivo.....</i>	<i>38</i>
3.3	CARACTERÍSTICAS DE UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA.....	39
3.4	EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE UMA SE ABRIGADA DE MÉDIA TENSÃO	40
3.4.1	Transformadores de Potência.....	40
3.4.2	Disjuntores	41
3.4.3	Transformador de Potencial Interno	42
3.4.4	Transformador de Corrente	42
3.4.5	Chaves Seccionadoras.....	43
3.4.6	Painéis de Controle e Proteção	44
3.4.6.1	<i>Chaves de Aferição</i>	<i>45</i>
3.5	RELÉS DE PROTEÇÃO.....	45
3.5.1	Relés Eletromecânicos de Indução	46
3.5.2	Relés Estáticos.....	47
3.5.3	Relés Digitais	48

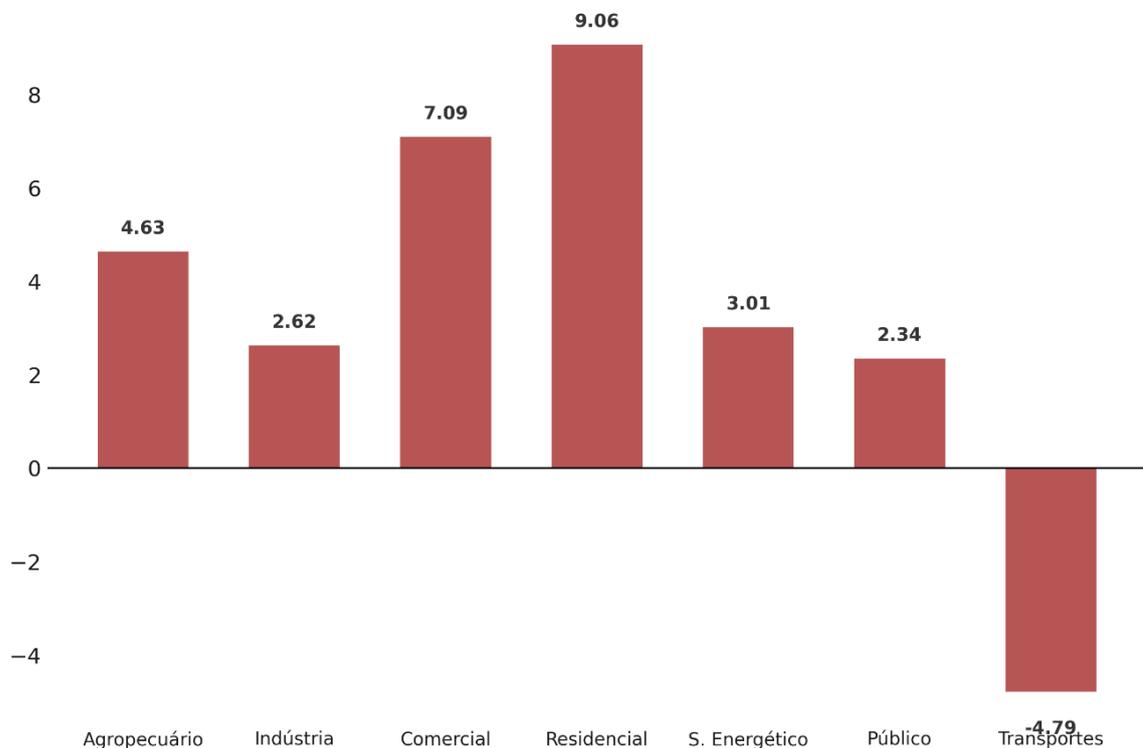
3.6	PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	51
3.6.1	Filosofia da Proteção	52
3.6.2	Proteção de Sobrecorrente por unidade de tempo definido	52
3.6.3	Proteção de Sobrecorrente por unidade temporizada.....	53
3.7	FUNÇÕES DE PROTEÇÃO EM IED SIEMENS 7SJ85	55
3.7.1	Estrutura de texto e números de referência para configurações	57
3.7.2	Função de sobrecorrente de fases	59
3.7.2.1	<i>Ajustes parametrizáveis para os estágios de tempo definido e curva de tempo inverso da função de sobrecorrente de fases</i>	<i>62</i>
3.7.3	Função de Sobrecorrente de Neutro	66
3.8	GRAVAÇÃO DE OSCILOGRAFIAS	69
3.9	CONEXÕES DE ENTRADAS ANALÓGICAS DO IED.....	72
4	ESTUDO DE CASO	74
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	74
4.2	METODOLOGIA DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	76
4.2.1	Roteiro de Testes de Proteção	77
4.3	MONTAGEM DA INFRAESTRUTURA PARA INJEÇÃO DE CARGA	78
4.4	CONFIGURAÇÃO DA MACRO DE TESTE	80
5	RESULTADOS.....	81
5.1	RESULTADOS ESPERADOS	81
5.2	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE FASE POR TEMPO DEFINIDO (50)	83
5.2.1	Fase A.....	84
5.2.2	Fase B.....	85
5.2.3	Fase C.....	87
5.2.4	Trifásica.....	88
5.3	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE FASE POR TEMPO INVERSO (51)	90
5.3.1	Fase A.....	91
5.3.2	Fase B.....	92
5.3.3	Fase C.....	94
5.3.4	Trifásica.....	95
5.4	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO POR TEMPO DEFINIDO (50N)	97
5.4.1	Falta por desequilíbrio de fases	98
5.5	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO POR TEMPO INVERSO (51N)	100
5.5.1	Falta por desequilíbrio de fases	100
6	CONCLUSÕES	102
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
7	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A geração de energia elétrica no Brasil tem se fortalecido nos últimos anos, impulsionada pela expansão de diversas fontes renováveis de energia na matriz energética nacional. Este crescimento tem sido justificado pelo aumento da demanda no setor agropecuário, comercial, industrial e residencial, conforme Figura 1, extraída do Balanço Energético Nacional 2024 (BEN). (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024)

Figura 1: Variação percentual do consumo setorial de eletricidade



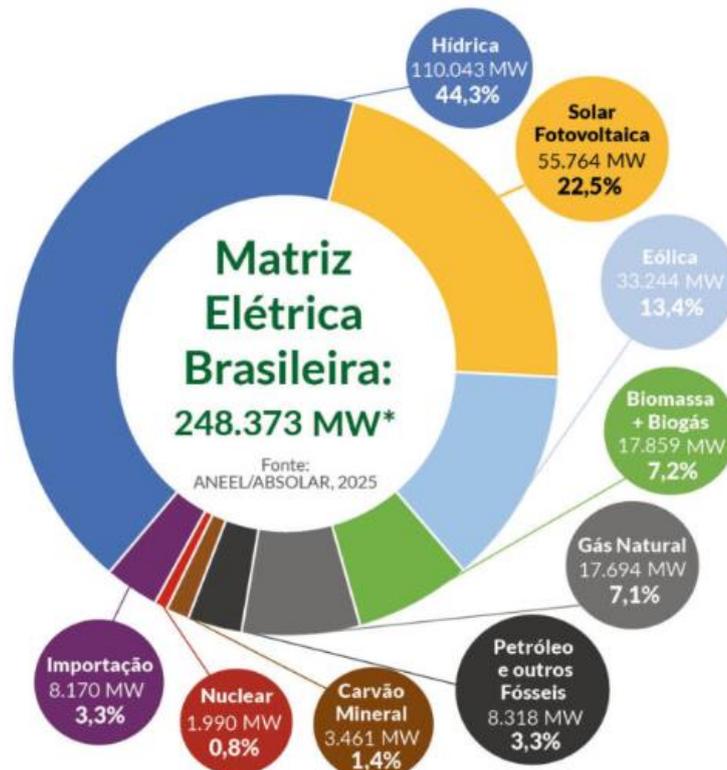
. Fonte: adaptado de (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024)

Acompanhando o histórico aumento do consumo de energia e a tendência mundial de investimentos em fontes renováveis, o Plano Decenal de Energia 2034 (PDE) — documento informativo elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que apresenta as perspectivas de expansão do setor energético brasileiro —

projeta investimentos da ordem de R\$ 3,2 trilhões para garantir que o aumento da oferta interna de energia, estimado em cerca de 25% nos próximos dez anos, seja suficiente para atender à demanda doméstica e à exportação de energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024).

Diante deste cenário de expansão planejada e crescente demanda energética, a matriz elétrica brasileira tem se adaptado para incorporar uma maior participação das fontes renováveis, com destaque para as fontes fotovoltaica e eólica. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a fonte solar fotovoltaica já alcançou 55.764 MW de potência instalada, sendo aproximadamente 30% de geração centralizada (GC) e 70% de geração distribuída (GD), o que corresponde a 22,5% da potência total do país e aproximadamente 50% da potência instalada da fonte hídrica — evidenciando o avanço expressivo dessa tecnologia frente à tradicional dominância hidrelétrica na matriz nacional, como pode ser visto na figura 2. (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025)

Figura 2: Participação das diferentes fontes de geração na matriz elétrica brasileira em 2025



Fonte: (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025)

Este cenário de diversificação da matriz energética tem impulsionado a pesquisa e implementação de projetos híbridos combinando fontes diferentes de energia — como hidrogênio verde (H₂V), solar, eólica e sistema de armazenamento de energia com baterias (BESS, do inglês *Battery Energy Storage Systems*) — onde tem sido pauta em estudos ao potencializar a rede elétrica ao integrá-los juntos em uma subestação (SE) do Sistema Interligado Nacional (SIN). (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2024)

Os sistemas BESS têm desempenhado um papel crucial neste âmbito, permitindo que o armazenamento da energia gerada por fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, seja liberado sob demanda para equilibrar a oferta e a demanda de energia, além de poder atuar como uma fonte de energia de *backup*, mantendo operações críticas e garantindo a continuidade dos serviços essenciais. (CASARIN, 2024)

1.2 Justificativa e motivação da pesquisa

A atuação correta dos sistemas de proteção é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico, sustentada por um estudo criterioso de graduação e ajuste das proteções, especialmente nas etapas de pré-operação e operação da planta.

Tais fenômenos exigem ajustes precisos e metodicamente estabelecidos nos dispositivos de proteção, com o objetivo de evitar danos aos equipamentos e ao barramento, além de assegurar a coordenação, a seletividade e a continuidade do fornecimento de energia. Assim, torna-se indispensável analisar a configuração das proteções aplicadas ao cubículo em estudo, garantindo uma energização segura do transformador e da carga conectada ao disjuntor, bem como a correta atuação dos sistemas de proteção diante de eventuais faltas ou anomalias transitórias.

Nesse contexto, o presente estudo se justifica pela necessidade de validar, por meio de testes de comissionamento dos SPCS (Sistema de proteção, controle e supervisão): a correta simulação de casos de falta, realizando análises de oscilografia, avaliações de tempo e a eficácia das parametrizações implementadas. A identificação

de potenciais melhorias visa aprimorar a segurança operacional, evitando atuações indevidas e elevando a confiabilidade das proteções na planta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O objetivo geral deste estudo é analisar a eficácia e configuração das proteções durante a etapa de comissionamento de um cubículo de média tensão em uma planta híbrida de geração, com foco na análise dos ajustes de proteção no *software* DIGSI 5 (nome comercial, sem definição formal de sigla) da SIEMENS, montagem de macros de teste no *Test Universe* da OMICRON e avaliação de tempo e oscilografias.

1.3.2 Específicos

O presente estudo tem como propósito a investigação dos critérios empregados na parametrização de sistemas de proteção da planta híbrida. A análise contempla a parametrização do dispositivo inteligente eletrônico (IED, do inglês *Intelligent Electronic Device*) SIEMENS 7SJ85, com ênfase nas proteções de sobrecorrente cadastradas e nos métodos pelos quais os relés de proteção são ajustados para responder a tais condições dinâmicas.

Adicionalmente, procede-se à avaliação do desempenho dos dispositivos de proteção, com particular atenção aos disjuntores e relés, mediante a observação de suas respostas frente ao comportamento característico por meio de oscilografias e testes das proteções simuladas com a caixa de testes da fabricante OMICRON.

1.4 Metodologia

Este trabalho adota como abordagem metodológica o estudo de caso, voltado para a análise do SPCS implementado em cubículos de média tensão (34,5 kV) pertencentes a uma planta híbrida de geração de energia elétrica. O desenvolvimento

desta pesquisa envolve a coleta de dados, parametrização do IED de controle e proteção de alimentadores SIEMENS 7SJ85 através do *software* DIGSI 5 e realização de testes de aceitação em campo.

Além disso, são conduzidas simulação de casos reais de falta utilizando um equipamento de testes de relés, o CMC 356 da OMICRON, bem como a análise de registros oscilográficos, utilizando o *software* SIGRA (também da fabricante SIEMENS). Tais atividades foram orientadas à avaliação da celeridade e eficácia das atuações em cenários críticos, a fim de verificar sua contribuição para a coordenação, seletividade e estabilidade do sistema elétrico de potência.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em 6 capítulos, onde:

No Capítulo 1, são apresentados os elementos introdutórios do estudo, iniciando pela contextualização do tema, seguido da motivação que despertou o interesse pela pesquisa, a justificativa da sua relevância, os objetivos traçados, a metodologia e, por fim, a forma como o trabalho foi estruturado ao longo dos capítulos.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão da literatura com base em contribuições teóricas e técnicas já consolidadas por outros autores, destacando os pontos ligados às fontes renováveis, armazenamento de baterias e plantas híbridas. Essa etapa tem como objetivo oferecer uma base sólida para a pesquisa prática e identificar lacunas que justificam a realização deste trabalho.

Na sequência, o Capítulo 3 é dedicado à fundamentação teórica necessária para entender os fenômenos envolvidos. Nele, são apresentados conceitos gerais do sistema elétrico de potência (SEP), subestações, equipamentos elétricos, filosofia de proteção de sistemas elétricos, além dos princípios de funcionamento dos relés de proteção digital e os critérios utilizados para os ajustes das proteções e oscilografias, com base na prática consolidada no setor elétrico.

O Capítulo 4 traz a aplicação prática da pesquisa, por meio da análise de um caso real envolvendo o comissionamento e testes de proteção nos dispositivos de manobra em um cubículo de média tensão em uma planta híbrida de geração. Nesse

capítulo, são descritos os procedimentos adotados para coleta e interpretação dos registros do sistema, os parâmetros utilizados nos ajustes de proteção e a forma como a lógica implementada respondeu às simulações de faltas realizadas em campo.

O capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados referentes aos testes de aceitação de campo, referente a ensaios reais das proteções de sobrecorrente de fase e neutro na planta.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, apontando os principais resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fontes Renováveis

Fontes renováveis são fontes de energia consideradas inesgotáveis, devido a sua rápida recomposição pela natureza, são exemplos: fonte hídrica, solar, eólica, biomassa, geotérmica e oceânica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA).

A transição energética, mudança da produção e consumo de energia para fontes mais sustentáveis e menos poluentes, tem sido motivo constante de debate em todo o mundo, sobretudo no Brasil, que sediará em 2025 a 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30). (Notícias Agrícolas, 2025)

A energia elétrica proveniente de fontes renováveis tem ganhado cada vez mais espaço no Brasil e se destacou na matriz energética nacional nos últimos anos. Segundo dados do BEN de 2024, o país atingiu 49,1% de fontes renováveis na oferta interna de energia (OIE), quando em 2021 este percentual era de 45%.

Liderada pela biomassa da cana (16,9%), lenha e carvão vegetal (8,6%) e hidráulica (12,1%), a expressiva transição energética e altos níveis de renovabilidade na OIE foram asseguradas, de forma especial, pelo desenvolvimento das fontes eólica, solar e biomassa. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024)

2.1.1 Energia Eólica

A Energia eólica é limpa, renovável e proveniente dos ventos. Utilizando um recurso inesgotável e de fácil acesso, não emite poluentes na atmosfera enquanto transforma a energia cinética do vento em energia elétrica. Em resumo, a força do vento empurra as pás do aerogerador e esse movimento mecânico é transferido para uma caixa multiplicadora interna, responsável por aumentar a velocidade de rotação do eixo. Esta caixa, então, é conectada a um gerador que transforma a energia mecânica em energia elétrica (Neoenergia). Um exemplo de aerogerador pode ser visto na Figura 3.

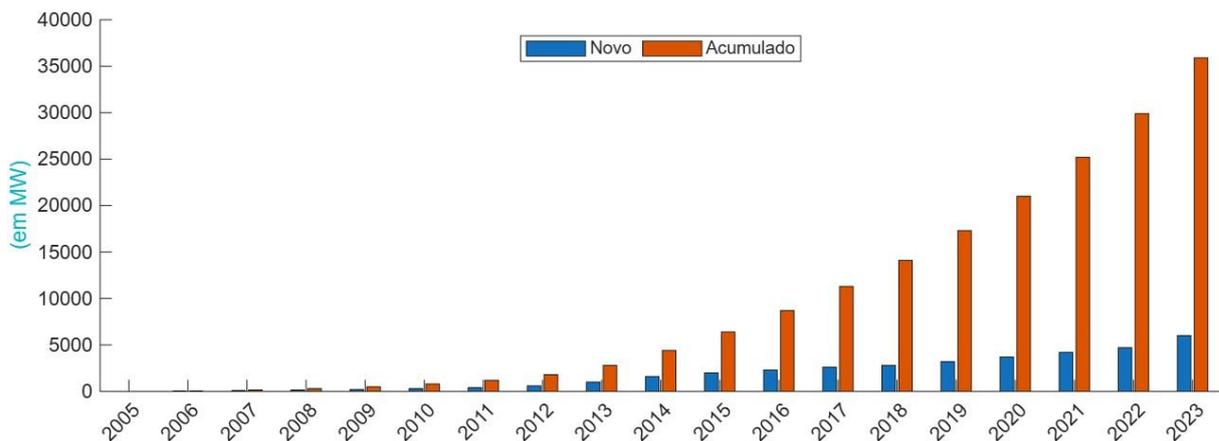
Figura 3: Exemplo de um aerogerador



Fonte: (Neoenergia)

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o tamanho da indústria no Brasil chegou a 12 estados, com cerca de 1100 parques eólicos e mais de 11000 aerogeradores em operação. Ocupando o sexto lugar no *ranking* global de capacidade instalada *onshore* (em terra), o Brasil possui 34 GW (gigawatt) de capacidade instalada em operação comercial e teste, como visto na Figura 4, mas tem um potencial de investir em mais de 1500 GW em eólicas *onshore* e *offshore* (no mar). (ABEEÓLICA)

Figura 4: Evolução da capacidade instalada de aerogeradores



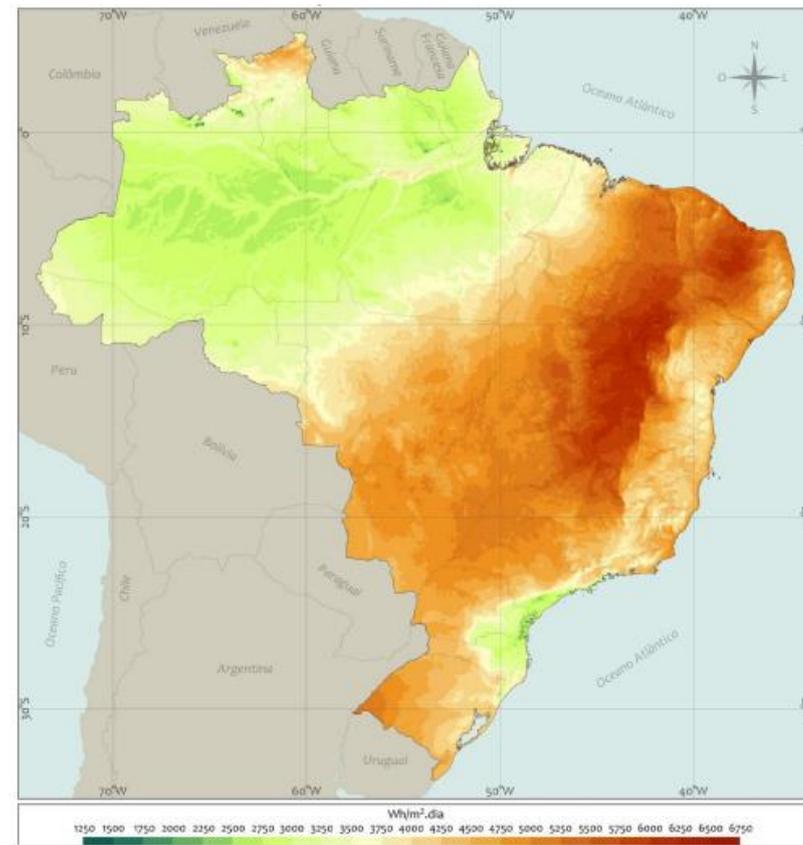
Fonte: adaptado de (ABEEÓLICA)

2.1.2 Energia Solar

A energia solar é uma fonte renovável de energia proveniente da luz do sol. Sua captação para ser utilizada como fonte de energia térmica e elétrica, principalmente, apresenta grande potencial como sendo uma das alternativas aos métodos atuais produtores de energia baseados em recursos limitados e não-renováveis. (PINHO e GALDINO, 2014)

No Brasil, o aproveitamento do recurso solar tem se destacado devido aos altos índices totais diários da irradiação direta normal, que ocorre no chamado “corredor solar brasileiro”, como pode ser visto na Figura 5. Tal abundância de energia disponível estimula a instalação de sistemas fotovoltaicos, favorecendo o controle hídrico nos reservatórios e possibilita o planejamento de novos investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

Figura 5: Média anual do total diário da irradiação direta normal no Brasil



Fonte: (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017)

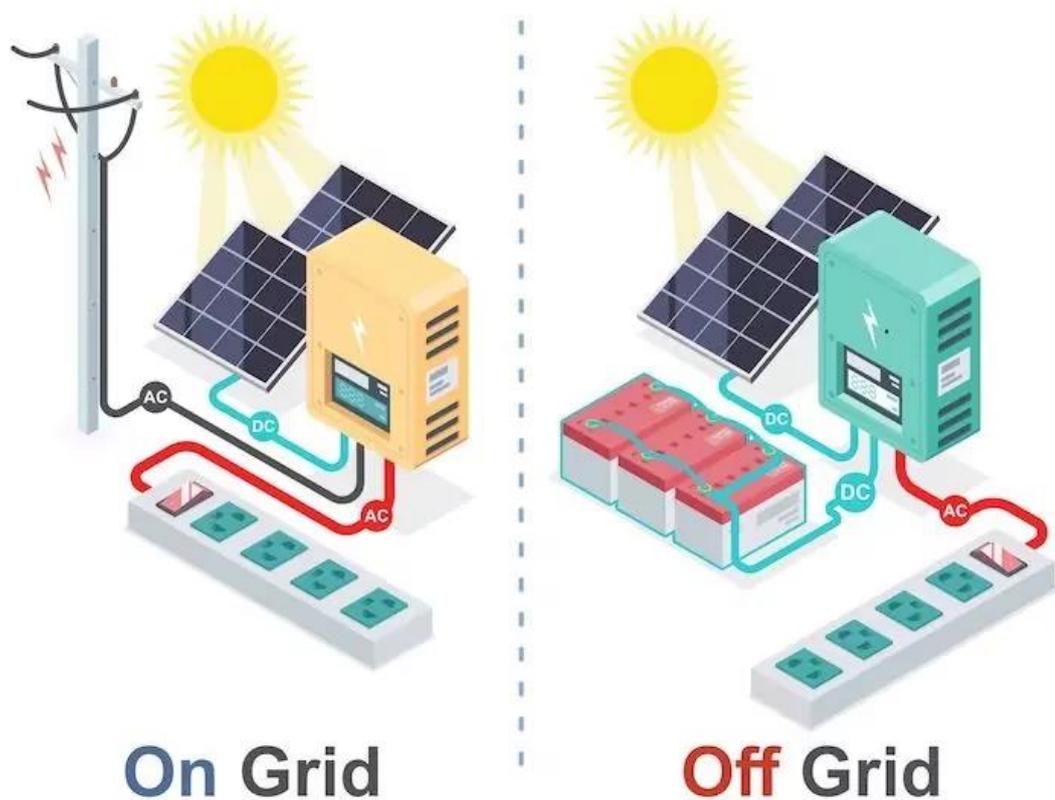
Os sistemas fotovoltaicos podem apresentar-se, dentre outras formas, como sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR ou *on-grid*), onde a energia é convertida em eletricidade por meio de inversores conectados à painéis fotovoltaicos, permitindo a integração com a rede elétrica convencional ou sistemas ilhados, sem necessidade de conexão com a rede elétrica (*off-grid*).

O sistema *on-grid* possibilita a compensação dos créditos de energia excedentes em outras unidades consumidoras, segundo a Lei 14.300 de 2022, enquanto os sistemas *off-grid*, por não poderem escoar o excedente para a rede elétrica diretamente, necessitam de baterias para armazenar a energia produzida não consumida para um consumo posterior. Uma ilustração disso pode ser vista na Figura 6.

Além desses aspectos técnicos, é importante destacar que a expansão da energia solar no Brasil também contribui para a diversificação da matriz elétrica, reduzindo a dependência de fontes hidrelétricas em períodos de estiagem. Essa

flexibilidade amplia a segurança energética nacional, ao mesmo tempo em que favorece a sustentabilidade e atende às diretrizes de transição energética exigidas em escala global.

Figura 6: Exemplo de conexão de sistemas fotovoltaicos



Fonte: (Torre de Iluminação Solar)

Segundo infográfico da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), até abril de 2025 o Brasil contava com mais de 56 GW de potência instalada operacional, sendo cerca de 70% destes em GD e 30% em GC. A GD e a GC são dois modelos de produção de energia com diferenças na escala e forma como a energia é gerada e distribuída. Enquanto a GD é caracterizada pela produção em pequena escala, próxima ao local de consumo, a GC produz em larga escala, envolve grandes usinas e sua energia é transmitida aos consumidores por linhas de transmissão. (Portal Solar)

2.2 Armazenamento de Energia em Baterias

O protagonismo crescente das fontes renováveis na matriz elétrica do Brasil, sobretudo a solar e a eólica, tem exigido uma maior robustez e flexibilidade da rede. Diante deste cenário, os sistemas de armazenamento de energia por baterias têm se destacado como uma solução eficaz para mitigar a intermitência dessas fontes, garantindo estabilidade para possibilitar o contínuo atendimento das cargas conectadas à rede. O BESS, composto primordialmente por baterias de íons de lítio, se mostra versátil devido à sua modularidade, alta eficiência energética (superior a 90%) e capacidade de atuação em diversas aplicações do SEP, desde a geração até o consumo final. (CAMPOS, ARAÚJO, *et al.*, 2022)

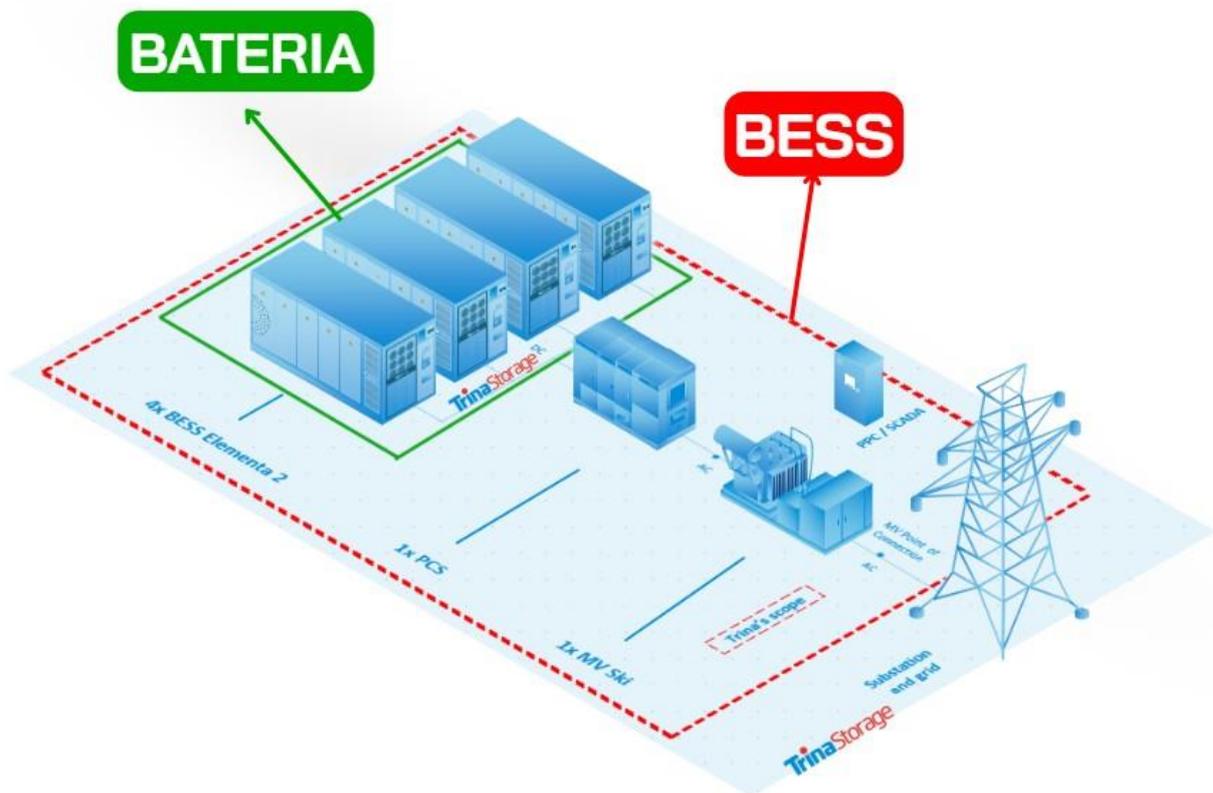
Em sistemas híbridos ou isolados da rede elétrica, a utilização destes dispositivos se faz necessária para atender a demanda em períodos nos quais a geração solar é nula ou insuficiente, como por exemplo à noite, que contém baixos níveis de irradiância solar. Assim, parte da energia que foi convertida em energia elétrica durante o dia pelos módulos fotovoltaicos e aerogeradores é armazenada para ser usada em momentos posteriores, observando a necessidade de atendimento à demanda. (PINHO e GALDINO, 2014)

Segundo Campos et al. (2022), os BESS vêm sendo amplamente adotados no Brasil em projetos híbridos com geração solar e eólica, principalmente com baterias de íons de lítio, que representam 90% da capacidade instalada. Esta liderança está diretamente associada à expressiva redução de custos dessa tecnologia e ao seu desempenho consolidado, com 65% das instalações associadas à geração fotovoltaica. Projetos de empresas como Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), CPFL, Neoenergia e Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) evidenciam o importante papel das políticas públicas, especialmente por meio dos programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), na promoção desta solução. Além de compensar a intermitência das fontes renováveis, contribuem com serviços como controle de frequência, gerenciamento de demanda e melhoria da qualidade da energia, podendo tanto ser aplicados no ponto de consumo quanto na infraestrutura do sistema elétrico, ampliando a confiabilidade e flexibilidade operacional da rede.

De acordo com (Energês, 2025) e mostrado na Figura 7, O BESS não é formado apenas por baterias, mas é um sistema completo, podendo ser composto também:

1. De um Sistema de conversão de energia, (PCS, do inglês *Power Conversion System*), que converte a energia armazenada (em CC) em energia exportável para a rede elétrica (em CA).
2. De Transformadores: responsáveis por adequar a tensão da energia exportada e garantir compatibilidade. Em alguns casos o transformador e o PCS podem estar em um único equipamento.
3. De Controladores da planta e sistema supervisorio. Respectivamente: (PPC, do inglês *Power Plant Controller*) e (SCADA, *Supervisory Control and Data Acquisition*), sistemas de supervisão e controle que monitoram e gerenciam diversas fontes de energia.

Figura 7: Diagrama de formação de um BESS



Fonte: (Energês, 2025)

As baterias e seus controladores, após toda a etapa de montagem e comissionamento, podem ser encontrados encapsulados em grandes ou pequenos containers que possibilitam uma acomodação e refrigeração adequada para a operação contínua dos módulos, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8: Exemplo de sistemas BESS montados em containers



Fonte: (Iberdrola)

2.3 Usinas Híbridas

Com a modernização e popularização das fontes renováveis, tendo como base a transição energética mundial, abriu-se a possibilidade da combinação da disponibilidade de mais de uma fonte de energia, renovável ou não, disponíveis na mesma localidade, visando otimizar e potencializar a geração de energia elétrica (SANTOS e TORRES, 2021).

Barbosa et al. (2016) definem um sistema híbrido de energia (SHE) como aquele que utiliza, para produzir eletricidade, mais de uma fonte de energia. Segundo os autores, a combinação entre essas fontes, com ou sem a presença de sistemas de

armazenamento, permite que as limitações de uma tecnologia sejam compensadas pelas vantagens de outra, onde esta complementaridade contribui para um melhor aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis, possibilitando a redução de interrupções no fornecimento e otimização da produção energética.

No Brasil e no mundo tem-se observado, sobretudo em locais isolados, uma crescente implantação de usinas híbridas. Segundo a EPE (2025), o leilão de sistemas isolados previsto para o ano de 2025 apresenta 241 projetos, somando 1.870 MW de potência cadastrada, onde cerca de 61% desta se refere a usinas híbridas (termelétricas + solar fotovoltaicas), com ou sem baterias para armazenamento, e 55% dos projetos híbridos possuem sistemas de baterias para armazenamento, o BESS.

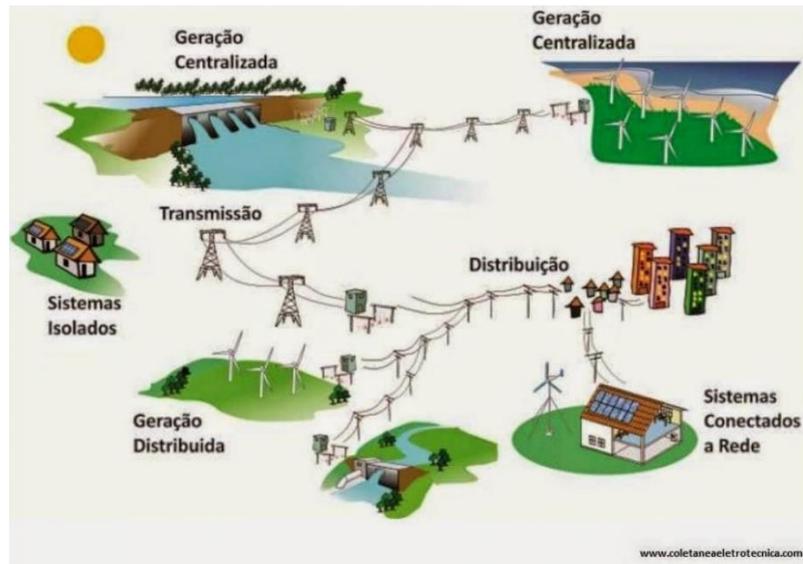
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sistemas Elétricos de Potência

O SEP é composto por um conjunto de equipamentos e estruturas responsáveis por três importantes partes: geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Dentre estes segmentos podem-se incluir elementos como: geradores, transformadores, disjuntores, linhas de transmissão e subestações, que têm como objetivo fornecer energia de forma segura, confiável e contínua. No Brasil, este sistema é conhecido como SIN, que a exceção de sistemas isolados, interliga todos os sistemas de potência do país. A Figura 9 representa um exemplo de um sistema elétrico de potência atual, considerando as classificações de geração, como: as centralizadas e distribuída, as linhas de transmissão e seus sistemas conectados à rede, e não menos importante, os sistemas isolados da rede elétrica.

Esse arranjo evidencia a complexidade e a dimensão do sistema elétrico brasileiro, que precisa operar de forma coordenada e em tempo real. A integração entre geração, transmissão e distribuição exige planejamento robusto, uso intensivo de tecnologia e atuação constante do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Dessa maneira, garante-se não apenas o fornecimento contínuo, mas também a estabilidade e a confiabilidade necessárias para sustentar o desenvolvimento econômico e social do país.

Figura 9: Exemplo de um Sistema de Potência



Fonte: (Bioenerg Consultoria Ambiental)

Segundo o ONS, em 2023 o SIN possuía uma extensa malha de 170.000 km de linhas de transmissão da rede básica (conjunto de instalações de transmissão de energia elétrica com tensão igual ou superior a 230kV) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS). Esse sistema interligado transporta energia elétrica desde os grandes geradores, como: usinas hidrelétricas ou parques eólicos/ solares; passam pelas mais diversas subestações, elevando-se a tensão para reduzir as perdas na transmissão, e próximo a carga é entregue a subestações que rebaixam a tensão, quer seja de subtransmissão ou distribuição, para que possam chegar até os grandes centros urbanos, com tensões adequadas ao consumidor final.

3.1.1 Composição de um Sistema Elétrico de Potência

Segundo Mamede Filho (2021), pode-se classificar um sistema elétrico de potência da seguinte forma:

- **Sistema de distribuição**, que pode ser dividido em dois segmentos:
 1. Sistema secundário ou de baixa tensão: aquele no qual estão conectados consumidores com cargas normalmente

iguais ou inferiores a 50 kW. Esse sistema atende a residências, pequenos comércios, iluminação pública etc.

2. Sistema primário ou de média tensão: aquele que interliga, em geral, o sistema secundário ao sistema de subtransmissão através dos transformadores de distribuição. Neste tipo estão sistemas entre 1 kV e 69 kV.

- **Sistema de subtransmissão:** aquele que interliga os sistemas primários aos sistemas de transmissão através das subestações de potência, operando em tensões de 69 kV, 88 kV e 138 kV.
- **Sistema de transmissão:** aquele que interliga os sistemas de subtransmissão aos sistemas de geração através de subestações denominadas elevadoras. No Brasil, as tensões usuais para os sistemas de transmissão variam entre 230 kV e 765 kV, ou seja: 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 765 kV. Essas tensões formam a rede básica do SIN, que é operado pelo ONS.
- **Sistema de transmissão em corrente contínua (CC):** no Brasil, tem sido utilizado geralmente em tensões de ± 600 kVcc e ± 800 kVcc, atendendo a necessidade de aproveitamento dos hidrogeradores da usina de Itaipu, Belo Monte, Santo Antônio e Jirau. Essas linhas de transmissão (LT) possuem alto custo inicial devido às estações conversoras CA/CC, porém para LT CC aéreas com mais de 800 km, seu custo relativo à LT com corrente alternada (CA) é menor e torna-se economicamente viável. (DIAS, 2023)

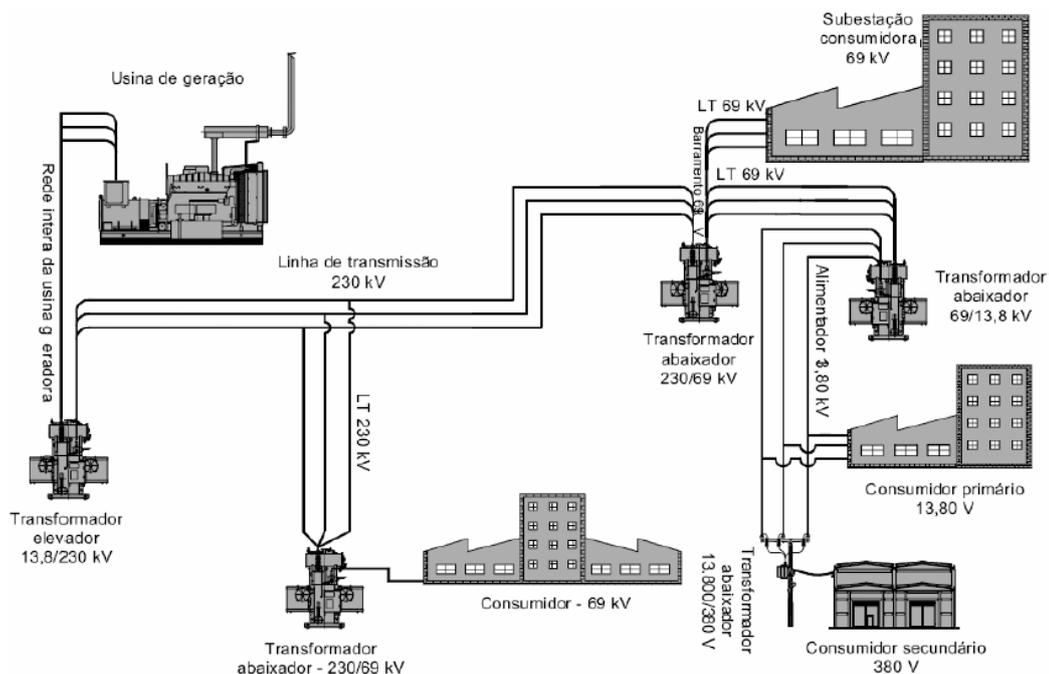
Um exemplo de LT ± 800 kVcc em implementação é o bipolo entre Graça Aranha (MA) e Silvânia (GO) que terá 1.513 km de extensão e capacidade nominal de 5 GW. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023)

- **Geração:** A geração de energia ocorre em usinas hidráulicas, térmicas, eólicas e fotovoltaicas sempre em níveis mais baixos de tensão. Estes níveis variam de 320V a 25 kV, dependendo da fonte de energia. Por exemplo: usinas hidráulicas e térmicas geram entre

6 kV e 25 kV enquanto usinas fotovoltaicas e eólicas geram entre 320 V e 1000V. No caso da energia eólica ou fotovoltaica, estas tensões ainda precisarão ser elevadas por transformadores logo na saída da geração para 13,8kV (pequenos parques) ou 34,5 kV (médios e grandes parques). Tais classificações podem ser vistas como representado na Figura 10.

Dessa forma, observa-se que a classificação de um sistema elétrico de potência não apenas organiza os diferentes níveis de tensão, mas também estabelece a hierarquia entre os subsistemas e suas funções dentro do SIN. Cada nível cumpre um papel específico, garantindo que a energia gerada em baixa tensão seja devidamente elevada, transmitida em longas distâncias com eficiência e, posteriormente, reduzida até alcançar o consumidor final com segurança e confiabilidade. Além disso, a diferenciação entre os sistemas evidencia a complexidade da infraestrutura elétrica brasileira e ressalta a importância de uma coordenação criteriosa entre geração, transmissão, subtransmissão e distribuição, assegurando estabilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica em um país de dimensões continentais.

Figura 10: Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia



Fonte: (FILHO, 2021)

3.2 Subestações

O uso da energia elétrica tem-se potencializado e caminhado lado a lado com o desenvolvimento social. Tendo começado a ser utilizada no final do século XIX no Brasil, em pouco tempo ficaria claro que sua expansão com as recentes construções de usinas hidrelétricas, no início do século XX, para suprir a crescente demanda de energia, necessitaria de instalações elétricas robustas como subestações, com mão de obra especializada para tornar possível a chegada desta energia à toda a população. (História da eletricidade)

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 5460/ 1992, uma subestação pode ser definida como uma instalação integrante do sistema de potência, localizada em um ponto específico, que reúne equipamentos destinados à conexão de linhas de transmissão e/ou distribuição. Estas instalações incluem dispositivos de manobra, controle, proteção, estruturas civis, podendo incluir também transformadores, conversores e outros componentes elétricos.

Em outras palavras, uma subestação é uma instalação essencial no sistema de potência, composta por um conjunto de equipamentos destinados ao controle, proteção, manobra e transformação de energia elétrica. Entre os principais dispositivos presentes em uma subestação, destacam-se: disjuntores, transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), chaves seccionadoras, transformadores de potência, barramentos, condutores, transformadores de aterramento, reatores de barra e de linha, compensadores síncronos, além de toda a parte do SPCS da subestação que inclui painéis de controle e proteção, medição e supervisão, sistemas supervisórios, arquitetura digital e de rede, que possibilita a comunicação rápida e eficaz dos mais diversos equipamentos de proteção modernos.

3.2.1 Classificação das SE

Segundo FILHO (2021), NBR 5410 e 14039, as SE podem ser classificadas de diferentes formas, dentre elas pelo:

3.2.1.1 Quanto ao nível de tensão

As classificações pelo nível de tensão podem variar de acordo com o entendimento de cada órgão regulador. De modo geral, segundo Júnior (2025), encontram-se as seguintes classificações:

3.2.1.1.1 Baixa tensão

Sistemas de até 1000 VCA (tensão alternada) e 1500 VCC (tensão contínua), regido pela NBR 5410, com tensões típicas de: 1000;760;660;440;380;220;127 (F-N);115 (FN) V. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004)

3.2.1.1.2 Média tensão

Sistemas de 1 kV a 36,2 kV, regido pela NBR 14039, com tensões típicas de: 2,13; 4,16; 6,9; 11,5; 12,6; 13,2; 13,8; 23; 25,8; 34,5 kV. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021)

3.2.1.1.3 Alta tensão

Sistemas acima de 36,2 kV, com tensões típicas de: 69 kV (subtransmissão); 138, 230 e 500 kV (transmissão).

3.2.1.1.4 Extra alta tensão

Sistemas acima de 500 kV, com tensões típicas de: 600 kVcc ou 750 kV

3.2.1.1.5 Ultra alta tensão

Sistemas acima de 750 kV, com tensões típicas de: 800 kV a 1,2MV

3.2.1.2 Quanto à categoria de utilização

As SE podem ser dimensionadas e projetadas para exercer diversas funções no SEP, dentre outras:

3.2.1.2.1 SE coletora

Responsável por aumentar a tensão produzida por fontes de energia elétrica, como: usinas hidráulicas, térmicas, eólicas ou fotovoltaicas, permitindo a distribuição de potência por linhas de transmissão com tensão superior a inicial.

3.2.1.2.2 SE de distribuição

A subestação de distribuição tem a função de diminuição da tensão elétrica para atendimento às demandas de consumo locais, como regiões ou estados. Geralmente, pertencem a companhias de distribuição de energia ou consumidores de médio porte, contendo tensões típicas de 0,38 kV, 13,8 kV e 69 kV na região Nordeste.

3.2.1.3 Formas de operação

Pode-se citar três formas diferentes de operação de uma subestação:

3.2.1.3.1 Subestações com operação presencial

Estas SE requerem a presença contínua de operadores, normalmente organizados em turnos. A depender do porte e importância sistêmica da subestação, com tensões a partir de 69 kV, pode ser comum a presença de apenas um operador por turno. Em subestações com maior complexidade, pode ser necessário dois ou mais operadores. Este modelo de subestação aos poucos está migrando para sistemas com tecnologias mais avançadas de supervisão, como as subestações de operação assistida ou supervisionada.

3.2.1.3.2 Subestações supervisionadas

Estas SE são equipadas com sistemas digitais de supervisão que permitem monitoramento e controle remoto de todos os equipamentos operacionais relevantes, eliminando a necessidade de operadores presenciais. O sistema supervisor registra e transmite em tempo real informações importantes como corrente, tensão e potência, transmitindo essas informações para o Centro de Operação do Sistema (COS). Como proteção adicional, podem possuir câmeras com visão noturna posicionadas em locais estratégicos, como entradas, barramentos e salas de comando.

3.2.1.4 Quanto às funções das subestações

De modo geral, as SE podem ser classificadas também por função, conforme FILHO (2021):

3.2.1.4.1 Subestação central de transmissão

Construída normalmente próximo das usinas produtoras de energia com a finalidade de elevar os níveis de tensão fornecidos pelos geradores para transmitir energia gerada para os centros consumidores.

3.2.1.4.2 Subestação receptora de transmissão

Construída próximo aos consumidores ou blocos de carga, recebe energia através de linhas de transmissão vindas da SE central de transmissão ou outra intermediária.

3.2.1.4.3 SE de subtransmissão

Normalmente implantada no centro de grandes blocos de carga, sendo alimentada por uma SE receptora, a partir dela, partem os alimentadores de distribuição primária que abastecem diretamente os transformadores de distribuição.

3.2.1.5 Quanto ao tipo construtivo

Os principais tipos construtivos encontrados em SE são os seguintes:

3.2.1.5.1 Instalação abrigada

Também chamada de SE internas, as subestações abrigadas são aquelas cujos equipamentos ficam dentro de uma edificação, geralmente de concreto armado. Nestes casos, todos os equipamentos de alta tensão ficam dentro de um galpão, parcial ou totalmente fechado com uso de ventilação forçada. Este tipo construtivo é utilizado em locais com alta concentração de poluentes como regiões litorâneas ou áreas industriais com o objetivo de proteger os equipamentos contra contaminação e corrosão. (THÓRUS ENGENHARIA)

3.2.1.5.2 Instalação ao tempo

1. Barramento nu e instalação convencional

Nesta configuração, que é bem comum e menos custosa, os equipamentos estão expostos a intempéries como sol, chuva etc. e usam componentes próprios para ambientes externos, como (TCs, TPs, disjuntores etc.). Observa-se predominância desta configuração em subestações a partir de 69 kV. .

2. Barramento isolado compacto

Nesta configuração é utilizado barramentos revestidos por material isolante, porém sem blindagem eletrostática, permite redução no espaço entre barramentos e ocupa menos área que subestações convencionais.

3.2.1.5.3 Instalação blindada

Nesta configuração os equipamentos elétricos são instalados em cubículos metálicos, podendo ser ao tempo ou abrigados, dependendo do grau de proteção. Geralmente são utilizados em locais com pouco espaço e são comumente aplicados em sistemas de até 34,5 kV.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA

As SE com instalações abrigadas (ou internas) são feitas normalmente cabines metálicas ou em alvenaria e tem uma excelente vantagem que é a redução de custo e espaço ocupado (THÓRUS ENGENHARIA). Tipicamente abrangendo níveis de tensão de até 34,5 kV, o projeto elétrico é feito considerando um espaço separado para receber os cubículos de medição, proteção e transformação.

Figura 11: Exemplo de SE abrigada



Fonte: (O que você Precisa Saber sobre subestações em Média Tensão, 2021)

Em alguns casos, de acordo com a necessidade do cliente, pode-se observar a junção da parte de medição/ proteção em um ou mais cubículos de junção ou cabines metálicas, normalmente utilizadas por concessionárias de energia, conforme Figura 12 (sistema de 13,8 kV), caracterizando-a como SE blindada.

Figura 12: Exemplo de junção da parte de medição e proteção cubículos metálicos



Fonte: (ENGEMAKRO, 2025)

Segundo a Engemakro (2025), estes cubículos são utilizados quando se deseja obter a independência das proteções e medições dos equipamentos elétricos, como transformadores, que estão interligados a um barramento geral, conectados em um único ponto da concessionária (ou ponto de conexão em subestação receptora).

3.4 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE UMA SE ABRIGADA DE MÉDIA TENSÃO

Nas SE abrigadas de média tensão são encontrados os mesmos equipamentos elétricos de uma SE ao tempo comum, notando-se uma diminuição de algumas características como: tamanho e tipo construtivo, comparativamente. A seguir, é dado um breve resumo sobre alguns equipamentos elétricos encontrados nestas SE.

3.4.1 Transformadores de Potência

Os transformadores de potência são um dos principais equipamentos de uma SE, eles que fazem a transformação de tensão, possibilitando a entrega de energia à rede de distribuição/ transmissão, que operam com níveis de tensão diferentes. Em uma SE abrigada, os transformadores, que podem ser a óleo ou a seco (tipo de

isolação interna), estão localizados no cubículo de transformação protegidos pela instalação, garantindo um maior tempo de vida e estabilidade na operação.

Figura 13: Exemplo do cubículo de transformação em instalação abrigada



Fonte: (THÓRUS ENGENHARIA)

3.4.2 Disjuntores

O disjuntor é utilizado como equipamento principal de seccionamento e proteção de circuitos elétricos. Podem ser isolados à ar, óleo, vácuo e gás hexafluoreto de enxofre (SF_6). Esse equipamento é utilizado na mitigação de curto-circuito e sobrecarga, interrompendo o fluxo de cargas em caso de falhas ou por atuação de comando de *trip* (sinal de atuação da função de proteção) vindo do relé de proteção ou IED, assim evitando maiores danos aos equipamentos associados. (WEG)

Figura 14: Exemplo de disjuntor de média tensão a vácuo



Fonte: (SIEMENS)

3.4.3 Transformador de Potencial Interno

O TP interno, como o nome já sugere, tem construção própria para utilização interna, é conectado em paralelo com o barramento e tem como objetivo transformar os níveis de tensão do barramento ao qual está conectado seu enrolamento primário V_p (comumente associado ao lado de alta tensão), em níveis de tensões menores no seu enrolamento secundário V_s (comumente associado ao lado de baixa tensão), para que possam ser medidas pelos instrumentos de medição e proteção com segurança, tendo tensão secundária padrão de 115 V entre fases e 66,40 V entre fase e neutro. Sendo assim, pode-se definir a Relação do Transformador de Potencial (RTP) como

$$RTP = \frac{V_p}{V_s} \quad (1)$$

Figura 15: Exemplo de TP interno de 36,2 kV



Fonte: (BRASFORMER)

3.4.4 Transformador de Corrente

O TC interno, como o nome já sugere, tem construção própria para utilização interna, é conectado em série com o barramento e tem como objetivo transformar os níveis de corrente do barramento ao qual está conectado seu enrolamento primário I_p (comumente associado ao lado de alta tensão), em níveis de corrente menores no seu enrolamento secundário I_s (comumente associado ao lado de baixa tensão), para que possam ser medidas pelos instrumentos de medição e proteção com segurança, tendo

corrente secundária padrão de 1 ou 5 A. Sendo assim, pode-se definir a Relação do Transformador de Corrente (RTC) como

$$RTC = \frac{I_p}{I_s} \quad (2)$$

Figura 16: Exemplo de TC interno de 36,2 kV



Fonte: (BRASFORMER)

3.4.5 Chaves Seccionadoras

A chave seccionadora, bem como o disjuntor, é um dispositivo de manobra e interrupção do fluxo de eletricidade. Os seccionadores permitem a desconexão física dos circuitos para viabilizar a manutenção e outras operações (SILVA, 2024). Um exemplo de chave seccionadora de abertura vertical de média tensão pode ser vista na Figura 17.

Figura 17: Exemplo de seccionadora de abertura vertical



Fonte: (MORAN ELÉTRICA LTDA.)

3.4.6 Painéis de Controle e Proteção

Os painéis de proteção e controle são peças fundamentais no monitoramento e supervisão de toda a subestação, abrangendo toda a parte do sistema de medição, proteção, controle, comando e supervisão (MPCCS) do vão ou cubículo em estudo. No início do SPCS das subestações eram utilizados chassis para controle, supervisão e proteção em locais separados. Atualmente, os painéis modernos utilizam IED com várias funções de medição, controle e proteção embarcadas em um só lugar. Junto ao SPCS do painel de média tensão, estes equipamentos garantem que a SE funcione de modo seguro e eficiente (SILVA, 2024).

Esses painéis tanto podem ser encontrados em painéis exclusivos e dedicados a este fim, geralmente quando os equipamentos associados estão no pátio da SE, como também fazendo parte de cubículos de medição e proteção, conforme Figura 18, quando todos ou a maioria dos equipamentos estão no painel elétrico associado. No caso apresentado, estão presentes no cubículo o: disjuntor de média tensão, mini disjuntores, chave seccionadora, botoeiras, sinaleiras, chave normal/ em teste, bornes de passagem, condutores, multimetror, IED e chaves de aferição.

Figura 18: Equipamentos elétricos presentes em cubículo de medição e proteção



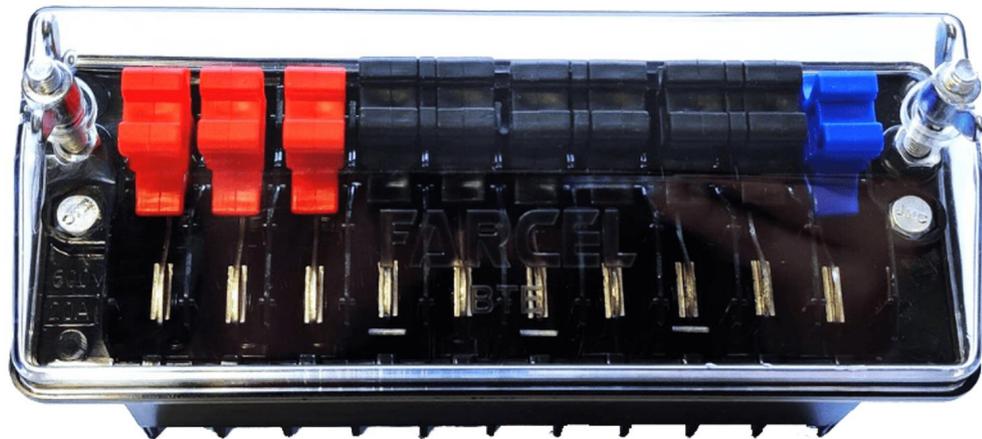
Fonte: O Autor.

3.4.6.1 Chaves de Aferição

As chaves ou blocos de aferição, instalados em série com o circuito analógico entre TP, TC e IED, são utilizados em circuitos onde se faz necessário realizar medições do sistema com amperímetros ou voltímetros e realizar seccionamento elétrico do circuito visando curto-circuitar secundários de transformadores de corrente. (ELÉTRICA BRASILTEC)

Circuitos de corrente e tensão também podem ser encontrados juntos em uma mesma chave de aferição, conforme Figura 19.

Figura 19: Chave de aferição de embutir com 10 polos



Fonte: (FARCEL)

3.5 RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés de proteção têm desempenhado um papel essencial na proteção dos sistemas elétricos de potência, executando diversas funções como: sobrecorrente, diferencial, distância etc. O primeiro modelo, segundo Mamede Filho e Mamede (2011), foi um dispositivo eletromecânico de proteção de sobrecorrente do tipo indução, surgido em 1901.

Alguns anos depois foram desenvolvidos os princípios da proteção diferencial de corrente e em seguida, em 1910, a proteção direcional. Em 1930 foi desenvolvida a proteção de distância e ao passar dos anos todos os modelos foram sendo

melhorados por meio de diversos estudos e investimentos por parte de seus fabricantes.

Na década de 1930 surgem os primeiros relés com tecnologia base de componentes eletrônicos, com semicondutores, e em 1980, com o desenvolvimento da microeletrônica, surgiram os primeiros relés com tecnologia digital. Contendo vantagens e desvantagens em relação a seus predecessores, os relés digitais se mostraram superiores em inteligência, integrando recursos de programação, comunicação e lógica com preços competitivos e uma maior confiabilidade. (FILHO e MAMEDE, 2013)

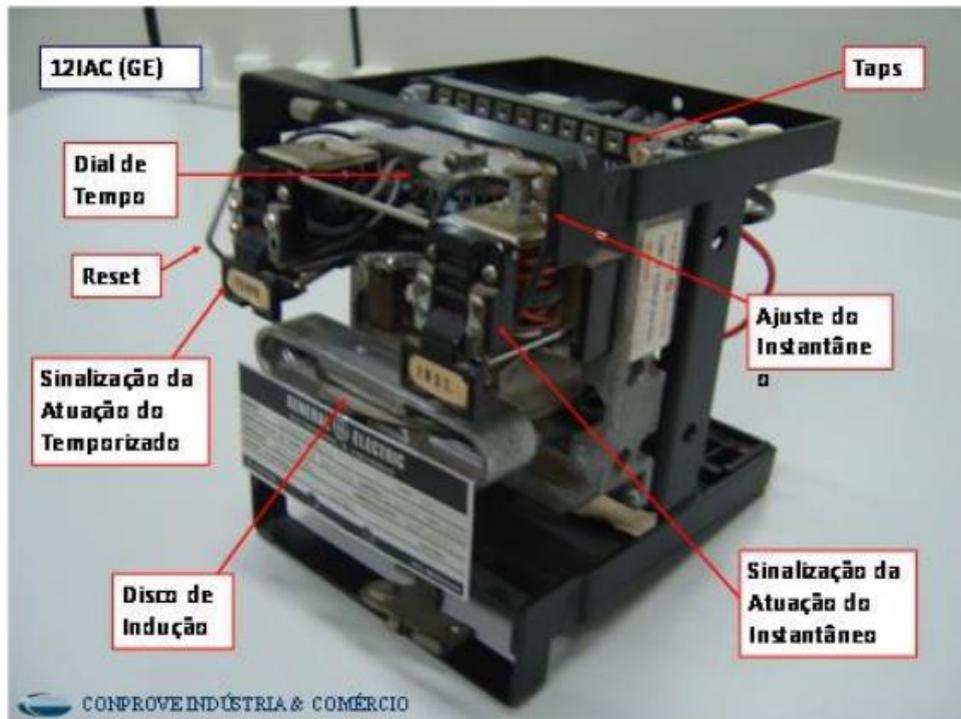
3.5.1 Relés Eletromecânicos de Indução

Os tradicionais relés eletromecânicos, pioneiros da proteção, foram elaborados, projetados e construídos considerando a predominância dos mecanismos de acoplamentos magnéticos e elétricos. Sua forma de atuação pode ser de dois modos: atração eletromagnética ou indução eletromagnética. De modo geral, a passagem de corrente elétrica por um condutor gera um campo eletromagnético que é induzido e pode movimentar discos, êmbolos ou alavancas. (KINDERMANN, 2005)

Construtivamente, são dotados de bobinas, discos de indução, contatos fixos e molas que lhe atribuem grande robustez. São de fácil manutenção e ajuste dos parâmetros elétricos, além de poderem ser trocados facilmente no painel por um relé de outro fabricante. (FILHO e MAMEDE, 2013)

No caso específico dos relés eletromecânicos de indução, sua atuação baseia-se no princípio de campos magnéticos alternados que interagem com discos metálicos, geralmente de alumínio, provocando seu movimento até o fechamento ou abertura de contatos. Esse mecanismo permite a detecção de grandezas elétricas como corrente e tensão, sendo amplamente utilizado em funções de sobrecorrente e de tempo inverso. Apesar das limitações frente às tecnologias digitais atuais, esses dispositivos foram fundamentais na consolidação dos sistemas de proteção, oferecendo confiabilidade e simplicidade operacional durante décadas.

Figura 20: Relé Eletromecânico da General Electric



Fonte: (COMPROVE INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2016)

3.5.2 Relés Estáticos

Os relés estáticos ou eletrônicos, comparativamente aos relés eletromecânicos, têm dimensões reduzidas e são mais modernos. São construídos com dispositivos eletrônicos e, segundo Mamede (2021), possuem circuitos integrados para cada função realizada e seus ajustes são realizados manualmente por meio de discos giratórios, também chamado *dials*, fixados na frontal do relé. Cada um deles consegue ajustar uma determinada característica da função, como: a corrente, a tensão, o tempo, tape etc. São econômicos, precisos e simplificados, além de velozes durante a operação.

Nestes relés, justificando serem chamados de estáticos, não existe nenhum movimento de qualquer dispositivo mecânico, sendo todas as operações e comandos feitos eletronicamente. Inicialmente, foram causadores de muitos desligamentos indevidos devido à sua sensibilidade apurada, podendo ser ativados por qualquer pequeno distúrbio ou transitório, comuns no SEP. Embora isto foi adequadamente corrigido por filtros, a era dos relés estáticos cessou rapidamente com o avanço da

tecnologia e desenvolvimento de relés digitais microprocessados. (KINDERMANN, 2005)

Figura 21: Relé estático de função de sobrecorrente de neutro



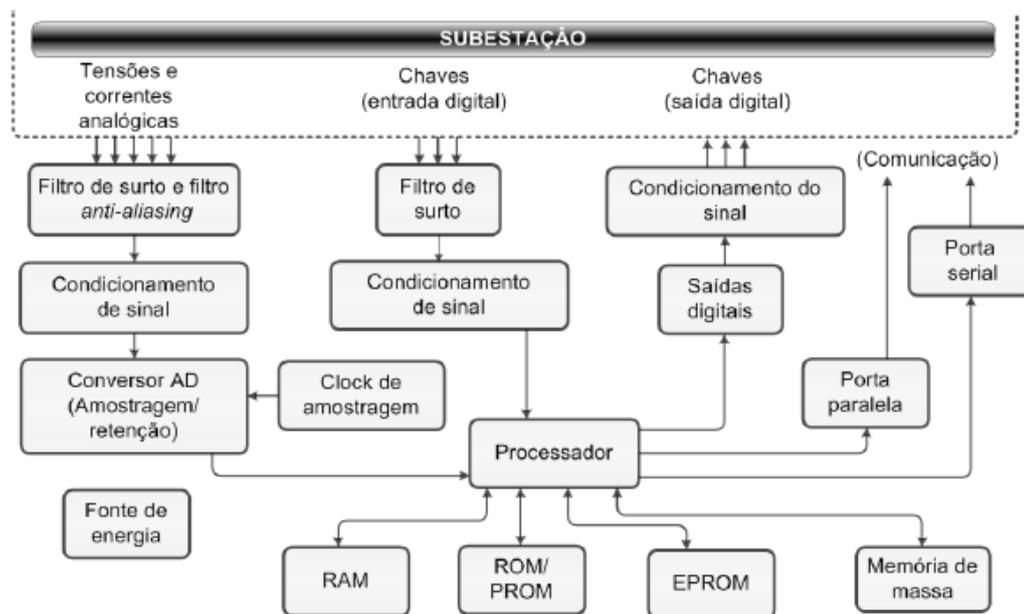
Fonte: O Autor

3.5.3 Relés Digitais

Representando grande avanço tecnológico nos sistemas de proteção, os relés digitais ou *IEDs*, surgiram trazendo grande capacidade de processamento de informação, através de seus microprocessadores e microcontroladores, se tornando o tipo de relé mais utilizado atualmente nas subestações de todo o mundo. (HORNUNG e MARCOS, 2017)

O processador, elemento central da arquitetura, é responsável por executar os algoritmos e se comunicar com dispositivos adicionais externos. Além disso, os relés digitais possuem memória, conversores analógico/digitais, portas seriais de comunicação (como portas ópticas e RJ45) e vários tipos de entradas e saídas digitais e analógicas, conforme pode ser visto na Figura 22. (FRAZÃO, 2019)

Figura 22: Componentes da arquitetura do relé digital



Fonte: (FRAZÃO, 2019)

A Figura 22 explica o funcionamento básico do processamento de sinais nos relés digitais. No circuito de armazenamento de informações existem alguns elementos, segundo Frazão (2019) a memória RAM (do inglês, *Random-Access Memory*) guarda dados temporários como valores analógicos e estados de entradas e saídas binárias em tempo real, enquanto a memória ROM (do inglês, *Read-Only Memory*), PROM (do inglês, *Programmable Read-Only Memory*) e EPROM (do inglês, *Erasable Programmable Read-Only Memory*) armazenam configurações e instruções que não se perdem mesmo se a fonte de alimentação do relé cesse, como exemplo o *firmware* do IED, diagramas lógicos e ajustes de função de proteção. A memória de massa armazena uma grande quantidade de dados e é útil, por exemplo, quando deseja-se armazenar registros de oscilografias, eventos, dados de falha etc.

O relé digital é designado multifunção, pois pode compreender e simular vários relés existentes em um só equipamento. Segundo Kindermann (2005), o caminho percorrido pelos sinais analógicos de correntes via TC e tensões via TP passa por um:

- Bloco redutor de sinais, que adapta os sinais de entrada ao circuito do relé digital.
- Filtro analógico, realizado de acordo com a necessidade da função requerida para filtragem de sinais indesejáveis.
- “Multiplex”, que realiza a multiplexação destes sinais de entrada.
- Amostragem e Sustentador (do inglês, *Sample and Hold*), que prepara os sinais analógicos em sinais de amostragem por ciclo para a conversão em sinais digitais
- Conversão A/D (analógico/digital), que transforma os sinais amostrados em sinais digitais.
- Filtro digital, que estabiliza os sinais digitais.

E por fim, é processado pelo bloco lógico do relé, sendo feita toda a lógica pré-programada pelo fabricante de acordo com a função de proteção escolhida. De modo geral, realizam técnicas de: aproximações de funções, transformadas de *Fourier* ou *Wavelet* para decompor os sinais analógicos em componentes de frequência, amplitude e fase, detectando eventos transitórios curtos ou faltas reais.

Além de todas essas funcionalidades, os relés digitais se destacam também pela capacidade de integração com sistemas supervisórios e protocolos de comunicação, como a IEC 61850, permitindo maior interoperabilidade entre diferentes fabricantes e aumentando a eficiência na operação de subestações modernas. Essa característica reforça a importância do IED como elemento central não apenas da proteção, mas também do monitoramento e automação do sistema elétrico.

Na Figura 23 é mostrado o relé digital de proteção da SIEMENS modelo 7SJ85, referência de IED em que será estudada a configuração das proteções neste trabalho.

Figura 23: Relé digital de proteção Siemens 7SJ85



Fonte: (SIEMENS)

3.6 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Um fornecimento de energia elétrica confiável é essencial para sustentar o funcionamento e avanço tecnológico da sociedade moderna. Por isto, garantir a integridade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de eletricidade é uma tarefa indispensável dentro da engenharia elétrica. Nesse contexto, a proteção dos sistemas elétricos é uma área dedicada voltada para estudar, detectar e isolar falhas elétricas do sistema, como o curto-circuito, antes de comprometer o sistema como um todo.

O “cérebro” do sistema de proteção da subestação é formado por relés eletromecânicos ou digitais, sensores que vigiam as condições de operação do sistema elétrico, que ao serem sensibilizados por uma corrente de curto-circuito, por exemplo, devem atuar de forma coordenada e seletiva para isolar completamente o local da falta, enviando um sinal para abertura do disjuntor, desconectando o trecho defeituoso do sistema e protegendo os equipamentos elétricos acometidos pelo distúrbio. (KINDERMANN, 2005)

3.6.1 Filosofia da Proteção

A filosofia de proteção tem como principal objetivo garantir a confiabilidade, segurança e continuidade do fornecimento de energia.

Segundo Frazão (2019), a proteção deve atender a requisitos básicos como:

- Sensibilidade — deve ser sensível para detectar faltas no menor nível possível de corrente de curto-circuito ou sobrecarga.
- Seletividade — deve ser capaz de operar apenas nos estados operativos que foi ajustado.
- Velocidade — deve ser rápido o suficiente para operar na velocidade esperada para a extinção da falta.
- Confiabilidade — deve ser funcionar corretamente e no momento certo, operando com eficiência segundo a sua finalidade.
- Disponibilidade — deve estar disponível para realizar a tarefa solicitada.
- Segurança — deve ser dito seguro se não operar indevidamente para qualquer distúrbio no sistema.

Desta forma, conceitos como estes estão intrinsecamente interligados e dependem de um bom projeto, estudos elétricos, desenvolvimento e planejamento dos esquemas de proteção. Adicionalmente, para garantir uma atuação eficaz, deve-se selecionar adequadamente e criteriosamente todos os componentes e equipamentos envolvidos, como os TC, TP, relé, disjuntor, sistema SCADA etc. (FRAZÃO, 2019)

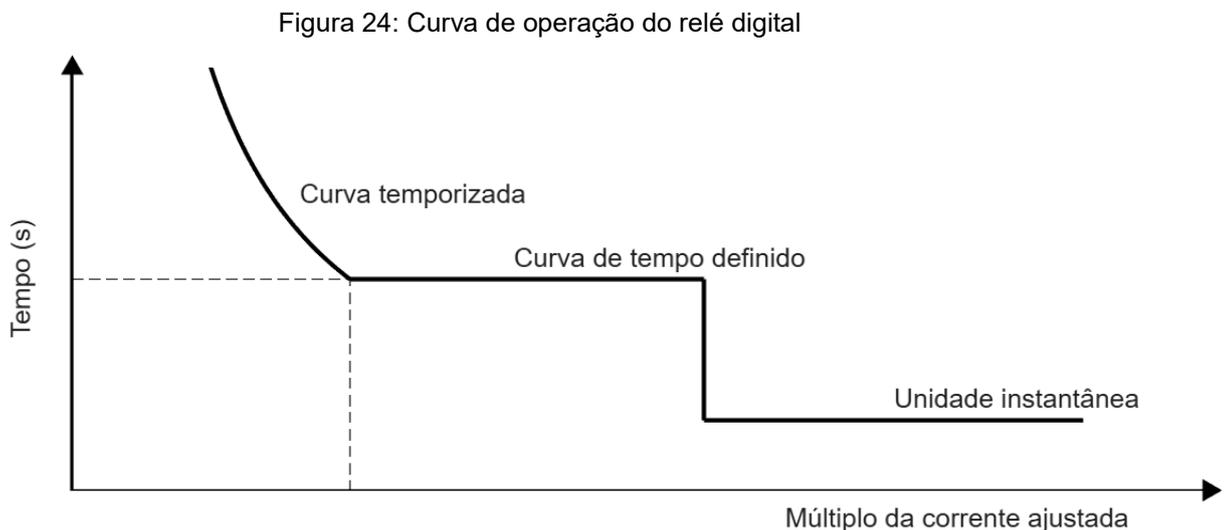
3.6.2 Proteção de Sobrecorrente por unidade de tempo definido

Nos relés digitais, a proteção de sobrecorrente permite ajustar múltiplos estágios, como: curva de tempo definido, temporizada e instantânea. Em alguns relés, a unidade instantânea é configurada separadamente da unidade de tempo definido, e em outros, como o SIEMENS SIPROTEC 5, estas unidades podem ser configuradas

em dois estágios de tempo definido, diferenciando-se apenas no ajuste do tempo de atraso de operação.

Na unidade de tempo definido existem temporizadores ajustáveis, dessa forma, quando a corrente medida supera a corrente de *pickup* (corrente de acionamento) ajustada na unidade de tempo definido, se inicia o contador do tempo programado e caso o *pickup* persista além deste tempo, o *trip* (operação) da função é disparado (FILHO e MAMEDE, 2013).

Conforme Figura 24, a depender do múltiplo da corrente, há inicialmente a partida do estágio temporizado, para que a corrente medida possa ser distinguida entre uma sobrecarga temporária ou um curto-circuito real. Em seguida inicia-se o estágio de tempo definido e por último a unidade instantânea da proteção, garantindo que de fato houve um curto-circuito.



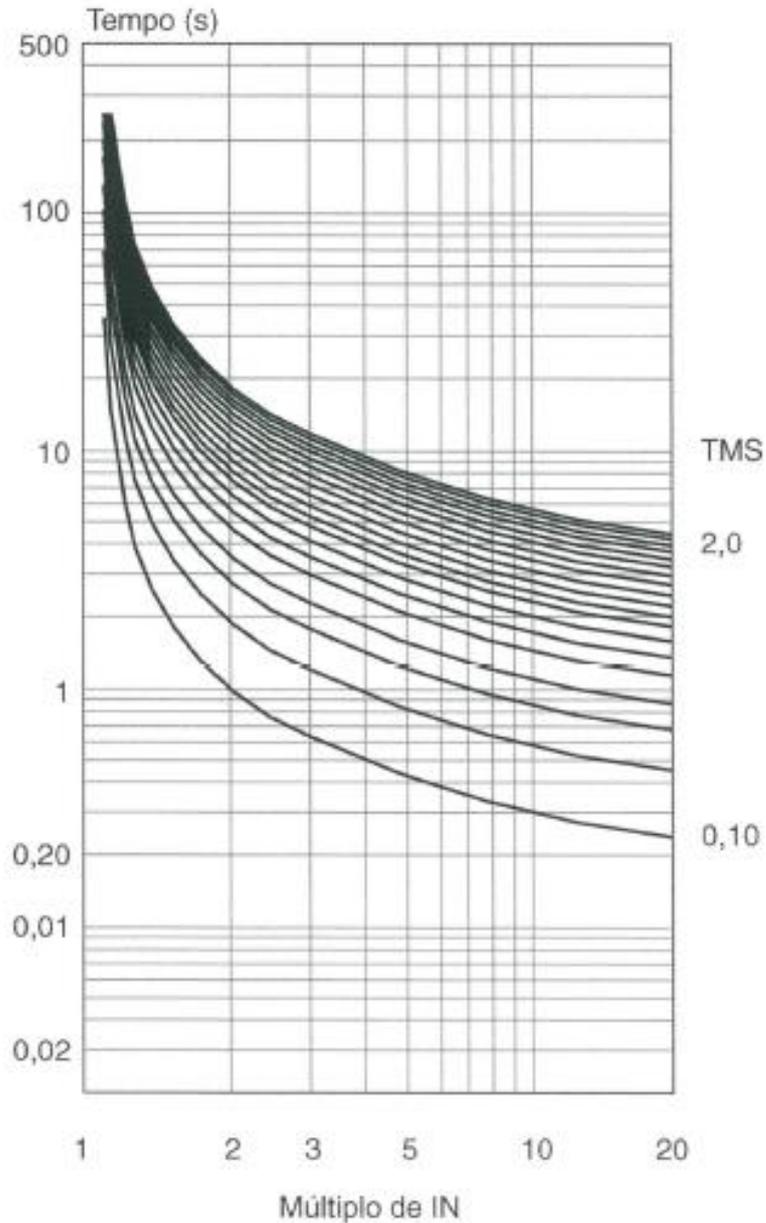
Fonte: adaptado de (FILHO e MAMEDE, 2013)

3.6.3 Proteção de Sobrecorrente por unidade temporizada

A unidade temporizada da proteção de sobrecorrente tem sua temporização obtida por meio de curvas características de tempo x corrente, como as curvas: normalmente inversa (NI), muito inversa (MI), extremamente inversa (EI), inversa longa (IL) ou inversa curta (IC), cujos tempos diminuem conforme aumento do múltiplo da corrente e diminuição do ajuste de multiplicador de tempo TMS (do inglês, *Time*

Multiplier Setting), conforme exemplo da curva normalmente inversa mostrada na Figura 25. (FILHO e MAMEDE, 2013)

Figura 25: Curva normalmente inversa



Fonte: (FILHO e MAMEDE, 2013)

As curvas características de tempo são dadas por meio de equações teóricas já definidas. Conforme Mamede Filho e Mamede (2013), as equações para as curvas NI, MI, EI, LI e IC são as (3), (4), (5), (6) e (7), respectivamente.

- Característica de tempo NI

$$T = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} * T_{ms} \quad (3)$$

- Característica de tempo MI

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} * T_{ms} \quad (4)$$

- Característica de tempo EI

$$T = \frac{80}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^2 - 1} * T_{ms} \quad (5)$$

- Característica de tempo LI

$$T = \frac{120}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} * T_{ms} \quad (6)$$

- Característica de tempo LC

$$T = \frac{0,05}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,04} - 1} * T_{ms} \quad (7)$$

Onde:

- T – Resultado de tempo esperado
- I_{ac} – Corrente de acionamento
- T_{ms} – Multiplicador de tempo
- I_{ma} – Máxima corrente admitida

3.7 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO EM IED SIEMENS 7SJ85

Os IED SIEMENS 7SJ85 fazem parte da quinta geração da linha de relés de proteção digital desenvolvida pela Siemens, os SIPROTEC 5 (nome comercial, sigla

sem definição formal). Estes IEDs são amplamente utilizados em sistemas de energia para monitoramento, controle e proteção de redes elétricas, como: alimentadores, linhas de transmissão e distribuição e banco de capacitores.

Todas as informações contidas nesta seção 3.7 foram retiradas do manual do IED disponibilizada pela fabricante no site oficial, sob a fonte (SIEMENS, 2024).

Esta linha possui características como:

- **Proteção avançada:** dispõe de várias funções de proteção embarcadas, como proteção contra sobrecorrente de fase, faltas à terra, sobretensão, subtensão, sobrecorrente direcional, falha disjuntor etc.
- **Processamento de dados e controle:** processam e controlam dados de valores medidos totalmente digitais, desde a aquisição das medições até as decisões de fechamento e desarme do disjuntor.
- **Isolamento:** isolamento galvânico completo e livre de interferências entre os circuitos internos de processamento e medição, controle e suprimento.
- **Armazenamento e sincronismo:** possuem relógio interno com bateria de backup e são sincronizáveis via sinal de GPS (do inglês, *Global Positioning System*), essencial para manter o registro temporal e preciso dos dados de processo.
- **Modularidade:** possui *hardware* modularizável, ou seja, capaz de ser montado com mais ou menos módulos de funções auxiliares (entradas e saídas binárias, módulos de entradas analógicas ou comunicação, por exemplo), conforme necessidade do cliente.
- **Comunicação:** suporte a protocolos de comunicação, como IEC (do inglês, *International Electrotechnical Commission*) 61850 e valores digitais amostrados (SV, do inglês *Sampled Values*), para integração com sistemas supervisórios e automação de SE.
- **Interface e Configuração:** configuração via *software* do fabricante, DIGSI 5, com estrutura hierárquica para parâmetros e indicações.

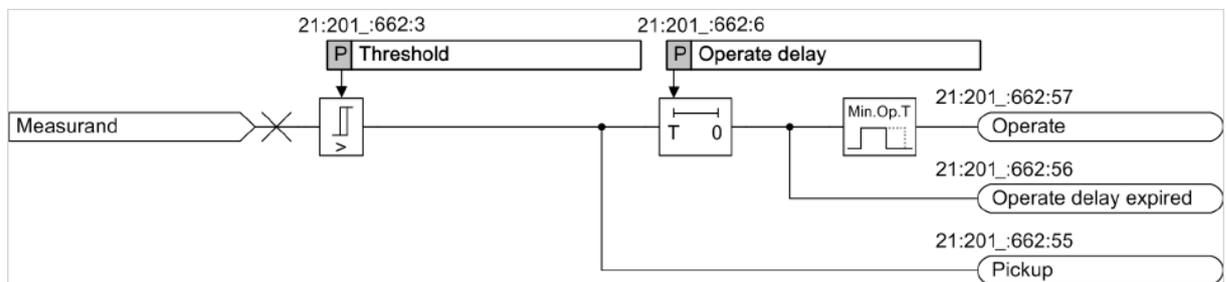
As funções de proteção em relés digitais, sobretudo em IEDs SIEMENS 7SJ85, desenhados para proteção de alimentadores, são interpretadas com características

semelhante aos relés eletromecânicos, como *pickup* (partida da função de proteção) e *trip* (operação da função), contudo utilizam processamento digital de dados através de diagramas lógicos de bloco.

3.7.1 Estrutura de texto e números de referência para configurações

Os relés digitais da linha SIPROTEC organizam suas configurações e indicações em uma estrutura hierárquica. Isso significa que cada função é dividida em subníveis, incluindo grupos de funções, funções específicas e instâncias, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26: Representação simplificada de estágio da função de proteção contra sobrecorrente trifásica



Fonte: (SIEMENS, 2024)

Com o objetivo de formar textos únicos e números de referências, cada grupo de função, estágio ou bloqueio de função e indicação ou parâmetro possuem um texto e um número associado. O dois-pontos serve como elemento estrutural que separa os níveis de hierarquia e nem todos os níveis de hierarquia estão sempre disponíveis, dependendo da funcionalidade.

Como algumas funções e seus estágios podem ser adicionados mais de uma vez ao grupo de funções de proteção do IED, um número de instância é adicionado a esses elementos.

Por exemplo, as referências para o *threshold* (limiar de operação) e *pickup* vistas na Figura 26 podem ser melhor entendidas destrinchando cada grupo de números, explicado melhor na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Resumo dos textos e números dos elementos hierárquicos

	Name	Number of the Type	Instance Number
Protection Function Group	Line	2	1
Function	Overcurrent 3ph	20	1
Stage	Definite-time overcurrent protection	66	2
Settings	Threshold value	3	-
Indication	Pickup	55	-

Fonte: (SIEMENS, 2024)

O parâmetro “*number of the type*” da Tabela 1 é um número fixo e predefinido pelo fabricante para um determinado tipo de grupo de função ou estágio e identifica qual é o tipo de função ou elemento independentemente de quantas vezes ele seja utilizado (instanciado).

Por outro lado, o número da instância ou *instance number* é usado para diferenciar múltiplas ocorrências do mesmo tipo de grupo de função, função ou estágio da seguinte maneira:

- Grupo de função – Linhas
1 instância, porque apenas um grupo de função de **linhas** existe no dispositivo.
- Função – Sobrecorrente trifásica
1 instância, porque apenas uma função de **sobrecorrente trifásica** existe no grupo de função de **linhas**.
- Estágio – Tempo definido da proteção de sobrecorrente
2 instâncias, porque dois estágios de tempo definido existem na função de sobrecorrente trifásica.

Por exemplo, se houver dois estágios de proteção de sobrecorrente de tempo definido, ambos têm o mesmo *number of the type* (66), mas são diferenciados pelos seus *instance numbers* (1 ou 2).

Tabela 2: Parâmetros, indicações e números associados a função de sobrecorrente

Parameter	Number
Line 1: Overcurrent 3-ph 1: Definite-time overcurrent protection 2:Threshold value	21:201:662:3
Indication	Number
Line 1: Overcurrent 3-ph 1: Definite-time overcurrent protection 2:Pickup	21:201:662:55

Fonte: (SIEMENS, 2024)

Observada a Tabela 2, a explicação sobre o número do tipo e a variação das instâncias, pode-se concluir como atribuiu-se o número **21:201_:662:55** à referência da **configuração** *threshold value* (3) ou **indicação** *pickup* (55) do segundo **estágio** de tempo definido (66-2) da **função** de proteção de sobrecorrente (20-1) e do **grupo de função de proteção** de Linhas (2-1).

3.7.2 Função de sobrecorrente de fases

A função de sobrecorrente de fases tem como principal função detectar sobrecarga de corrente ou curto-circuito nos equipamentos elétricos conectados ao IED. Ela monitora continuamente os valores de corrente nas fases do circuito e caso haja algum distúrbio que leve ao *pickup* e *operate* (operação) da função, envia sinal de abertura via BO (saída binária, do inglês *binary output*) para o disjuntor do sistema associado.

Nesta função de proteção, dois tipos de funções estão disponíveis:

- Proteção de Sobrecorrente, fases – avançado (50/51 OC-3ph-A)
- Proteção de Sobrecorrente, fases – básico (50/51 OC-3ph-B)

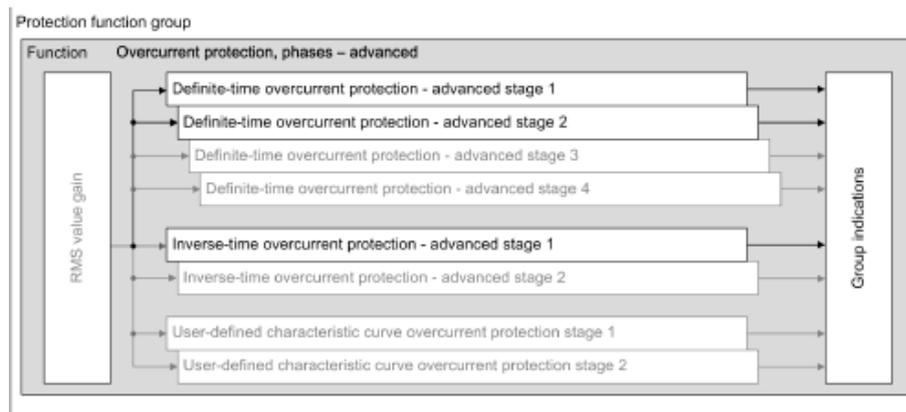
Onde: OC – *Overcurrent*, gnd – *ground*, A – *advanced* e B - *basic*

Ambas as funções vêm pré configuradas pelo fabricante com **2 estágios de tempo definido** e **1 estágio de tempo inverso** para a função de sobrecorrente, podendo ser excluídos ou adicionais mais estágios conforme necessidade, contando

até com a possibilidade de o usuário definir sua própria curva. A função básica é indicada para aplicações padrão e o tipo de função avançada oferece mais funcionalidades, indicada para aplicações mais complexas, quando se necessita de mais estágios de tempo definido ou inverso, por exemplo. Para efeito demonstrativo, será utilizado o modo avançado da função.

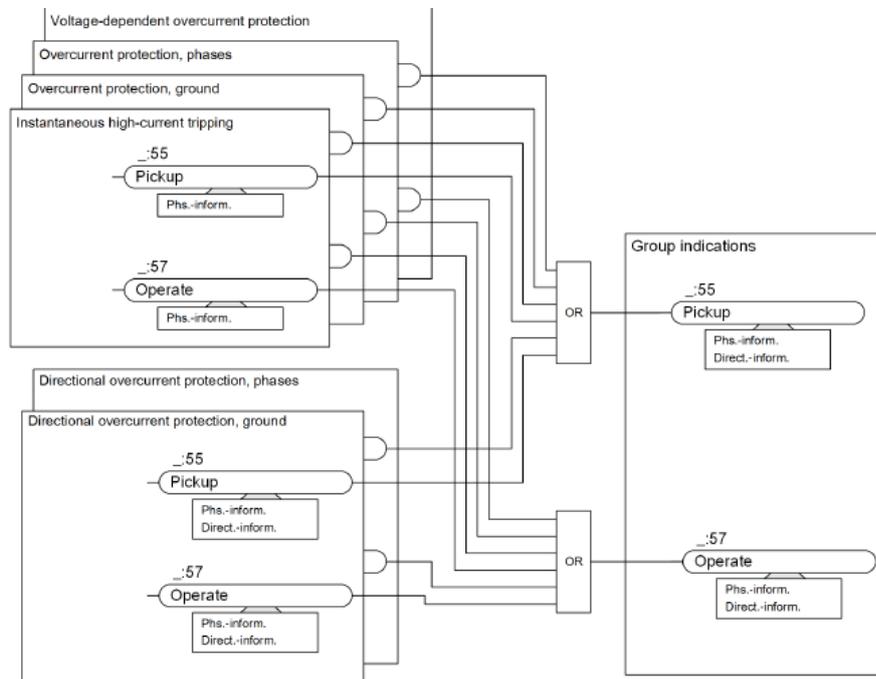
As saídas lógicas dos grupos de indicação são: ***pickup*** e ***operate*** geradas pela lógica OU das indicações seletivas do estágio, conforme Figura 27 e Figura 28.

Figura 27: Estrutura embarcada da função de proteção de sobrecorrente de fase, avançada



Fonte: (SIEMENS, 2024)

Figura 28: Diagrama lógico das indicações do grupo de proteção de sobrecorrente



Fonte: (SIEMENS, 2024)

Nota-se pela Figura 28 que o grupo de proteção de sobrecorrente engloba vários tipos de proteções, são elas: proteção de sobrecorrente dependente de tensão (51V), proteção de sobrecorrente de fases (50/51), proteção de sobrecorrente de neutro (50N/51N), Trip instantâneo por alta corrente (50) e o grupo de sobrecorrente direcional de fases e neutro (ANSI 67/67N).

Nas Figura 29 e Figura 30, pode-se compreender melhor e de forma lógica quais são as variáveis lógicas de entrada e saída que o IED processa antes de disparar as saídas lógicas como *pickup*, *operate* ou *operate delay expired* (atraso de operação expirado) de acordo com o estágio analisado, tempo definido ou curva característica de tempo inverso.

Figura 29: Diagrama lógico do estágio de tempo definido da função de sobrecorrente de fase, avançado

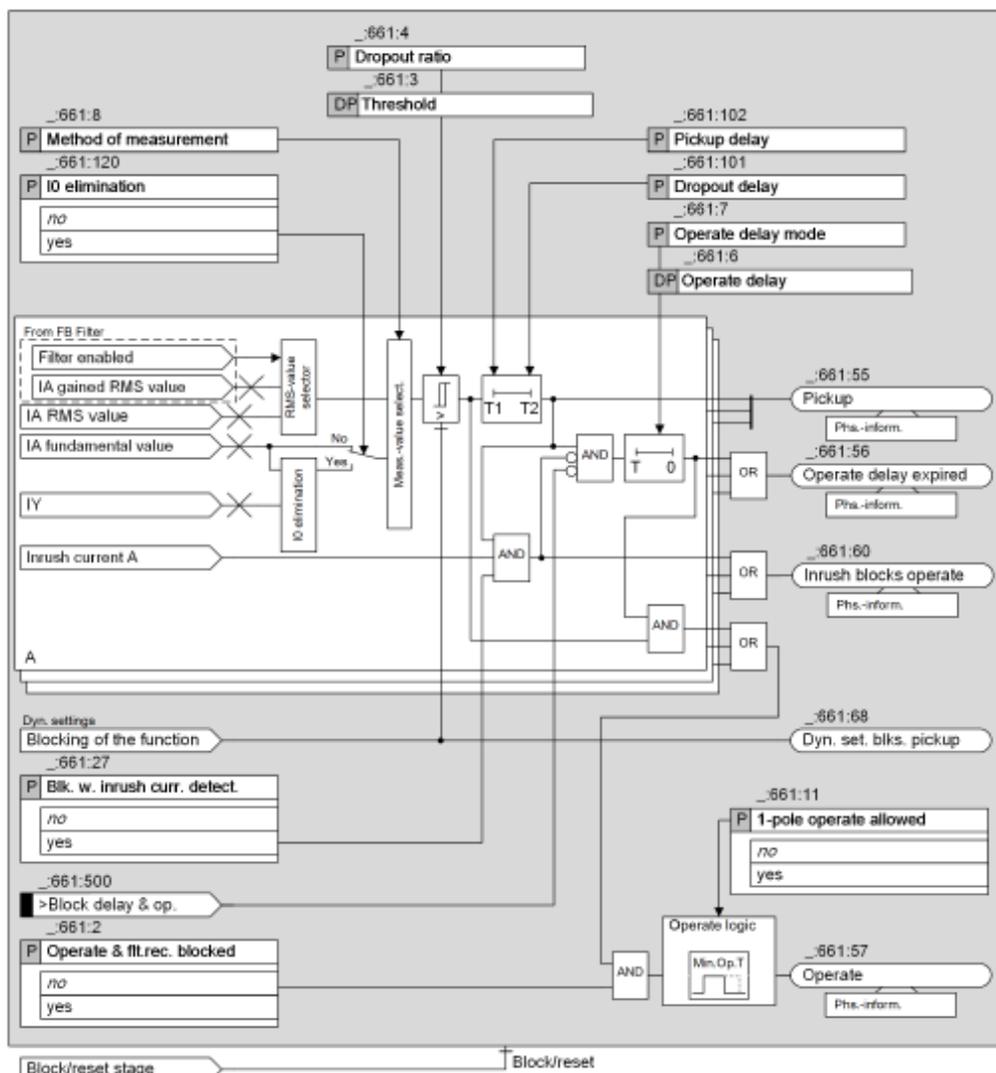
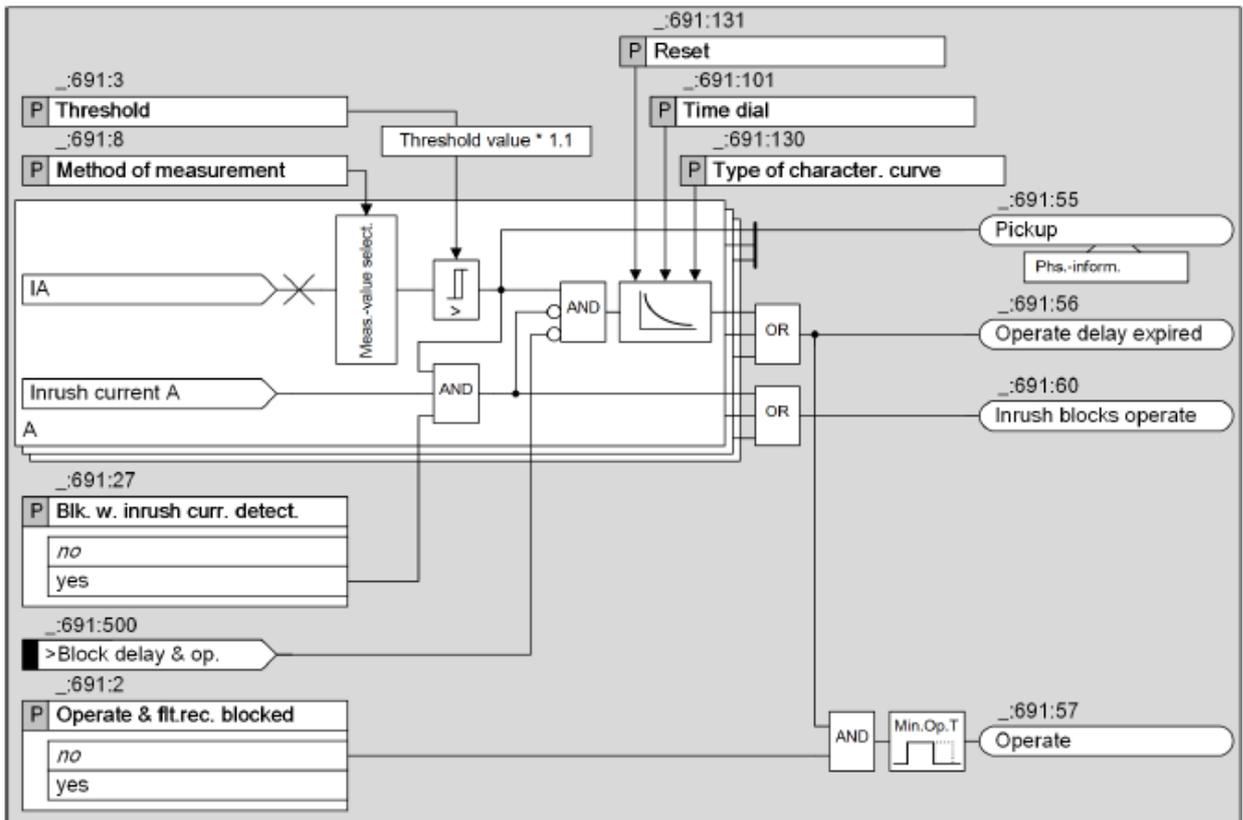


Figura 30: Diagrama lógico do estágio com curva característica de tempo inverso da função de sobrecorrente de fase, avançado



Fonte: (SIEMENS, 2024)

3.7.2.1 Ajustes parametrizáveis para os estágios de tempo definido e curva de tempo inverso da função de sobrecorrente de fases

Para estes estágios desta e de outras funções, alguns ajustes podem ser configurados. Como exemplo: o modo da função, atuação seletiva por fase, bloqueio por detecção de corrente de *inrush*, método de medição dos valores analógicos etc.

Além dos parâmetros básicos, é recomendável revisar as configurações de histerese, atraso de atuação (*operate delay*) e atraso de restauração (*dropout delay*), especialmente em sistemas onde há variações bruscas de carga.

Estas configurações são indispensáveis para um bom funcionamento e ajuste do estágio analisado. Na Figura 31 e Figura 32 estão dispostos quais valores são configuráveis via *software*:

Figura 31: Ajustes parametrizáveis do estágio de tempo definido da função de sobrecorrente de fases, avançada

821.201.661.1	Mode:	<input type="text" value="on"/>	▼
821.201.661.2	Operate & fit.rec. blocked:	<input type="text" value="no"/>	▼
821.201.661.11	1-pole operate allowed:	<input type="text" value="no"/>	▼
821.201.661.26	Dynamic settings:	<input type="text" value="no"/>	▼
821.201.661.27	Blk. w. inrush curr. detect.:	<input type="text" value="yes"/>	▼
821.201.661.8	Method of measurement:	<input type="text" value="fundamental comp."/>	▼
821.201.661.3	Threshold:	<input type="text" value="12.90"/>	A
821.201.661.4	Dropout ratio:	<input type="text" value="0.95"/>	
821.201.661.102	Pickup delay:	<input type="text" value="0.00"/>	s
821.201.661.101	Dropout delay:	<input type="text" value="0.00"/>	s
821.201.661.6	Operate delay:	<input type="text" value="0.00"/>	s
821.201.661.7	Operate delay mode:	<input type="text" value="Running dur. DO-delay"/>	▼

Fonte: (SIEMENS, 2024)

Figura 32: Ajustes parametrizáveis do estágio da curva característica de tempo inverso da função de sobrecorrente de fases, avançada

821.201.691.1	Mode:	<input type="text" value="on"/>	▼
821.201.691.2	Operate & fit.rec. blocked:	<input type="text" value="no"/>	▼
821.201.691.11	1-pole operate allowed:	<input type="text" value="no"/>	▼
821.201.691.26	Dynamic settings:	<input type="text" value="no"/>	▼
821.201.691.27	Blk. w. inrush curr. detect.:	<input type="text" value="yes"/>	▼
821.201.691.8	Method of measurement:	<input type="text" value="fundamental comp."/>	▼
821.201.691.3	Threshold:	<input type="text" value="1.00"/>	A
821.201.691.108	Pickup delay:	<input type="text" value="0.00"/>	s
821.201.691.130	Type of character. curve:	<input type="text" value="IEC normal inverse"/>	▼
821.201.691.113	Min. time of the curve:	<input type="text" value="0.00"/>	s
821.201.691.131	Reset:	<input type="text" value="instantaneous"/>	▼
821.201.691.101	Time dial:	<input type="text" value="0.05"/>	
821.201.691.115	Additional time delay:	<input type="text" value="0.00"/>	s

Fonte: (SIEMENS, 2024)

Onde:

1. **Mode:** define o estado operacional da curva de proteção em:
 - **Off:** desativada.
 - **On:** ativa.
 - **Test:** modo de teste, sem atuação real no disjuntor.
2. **Operate & flt.rec. blocked:** bloqueia a indicação de operação, gravação e registro de falta.
3. **1-pole operate allowed:** permite atuação seletiva por fase (1 polo), mas o disparo físico ainda será trifásico, pois este relé não suporta abertura seletiva de polos.
4. **Dynamic settings:** habilita ajustes dinâmicos de parâmetros como “Threshold” e “Operate delay” com base em outras funções internas (ex: religamento automático)
5. **Blk. w. inrush curr. Detect:** bloqueia a atuação da etapa de proteção caso um valor de corrente alto seja identificado como corrente de energização (inrush), evitando disparos indevidos.
6. **Method of measurement:** define o método de medição dos valores analógicos.
 - **Fundamental comp.:** usa apenas o componente fundamental da corrente (rejeitando harmônicas)
 - **RMS value:** considera o valor eficaz total, incluindo harmônicas.
7. **Threshold:** valor de partida da proteção, em ampères. Acima deste valor, a proteção considera que há um problema no sistema e inicia o temporizador ou atua de imediato, conforme a curva.
8. **Type of Character. Curve:** este parâmetro permite selecionar a curva característica necessária para a aplicação específica, usualmente: IEC normal inversa, muito inversa, extremamente inversa etc.

9. **Min. Time of the curve:** este parâmetro define um tempo mínimo para o *delay* de operação. O tempo para o atraso de operação da curva característica de tempo inverso nunca será menor que este valor.
10. **Reset:** é dividido entre **disk emulation** e **instantaneous**. Este parâmetro define se o estágio de proteção desliga de acordo com a curva característica de desligamento ou instantaneamente. Em caso de escolha do **disk emulation**, o dispositivo aceita uma curva de desligamento configurada pelo usuário. E em caso de escolha do **instantaneous**, o desligamento é feito instantaneamente.
11. **Time dial:** multiplicador de tempo. Este parâmetro é utilizado para deslocar a curva característica no eixo do tempo. Este parâmetro é derivado dos estudos elétricos para o sistema em questão e influencia no tempo de operação da função de acordo com a curva de tempo inverso.
12. **Additional time delay:** Com este parâmetro, define-se um atraso de tempo definido, além do atraso de tempo inverso. Ou seja, toda a curva é deslocada no eixo do tempo por este ajuste de tempo adicional.
13. **Dropout ratio:** razão entre o valor de *pickup* e o valor de queda (*dropout*). Controla a histerese da proteção, evitando oscilações entre atuação e desligamento em situações de valores instáveis. Ex: se o *dropout ratio* = 0,95, a etapa só vai "desligar" se a corrente cair abaixo de 95% do valor de *pickup*.
14. **Pickup delay:** tempo de espera (em segundos) entre a ultrapassagem do valor de *pickup* e o início da atuação. Serve para evitar atuações por distúrbios passageiros.
15. **Dropout delay:** tempo entre a queda do valor abaixo do *threshold* e o desligamento da atuação. Útil para manter o sinal de atuação por um tempo mesmo após o fim da anomalia. É comum em relés modernos e segue o mesmo princípio de *pickup delay*, porém invertido.
16. **Operate delay:** tempo de atuação da proteção após detectada a condição de operação ou *trip* da função. É o tempo que define o atraso entre detectar a falta e enviar o comando de *trip*. No estágio de curva

característica com tempo inverso, o *operate delay* é a soma do atraso causado pela curva inversa e o *additional time delay*.

17. **Operate delay mode:** define como o tempo de retardo é tratado.

1. **Running dur. DO-delay** (padrão): durante o tempo de *dropout delay*, o cronômetro de *operate delay* continua contando normalmente. Isso significa que mesmo que a corrente caia temporariamente abaixo do *threshold* (mas o *dropout delay* ainda estiver rolando), o tempo de atuação continua.
2. **Frozen dur. DO-delay:** durante o *dropout delay*, o cronômetro do *operate delay* é pausado(congelado). Se a corrente voltar a ultrapassar o *threshold*, o tempo continua de onde parou. Isto evita que quedas momentâneas de corrente “resetem” o tempo. É útil para cenários com corrente oscilante (ex: motores ou cargas intermitentes)

3.7.3 Função de Sobrecorrente de Neutro

A função de sobrecorrente de neutro tem como principal função detectar curto-circuito envolvendo a terra nos equipamentos elétricos conectados ao IED. Ela monitora continuamente: os valores de corrente nas fases do circuito, calculando a corrente de neutro por soma vetorial das correntes de fase ou mede o valor de corrente diretamente na quarta entrada de corrente do IED, destinada ao enrolamento de neutro, cuja seleção é vista na Figura 34. Igualmente às outras funções, caso haja algum distúrbio que leve ao *pickup* e *operate* (partida ou trip) da função, envia sinal de abertura via BO para o disjuntor do sistema associado.

Nesta função de proteção, dois tipos de funções estão disponíveis:

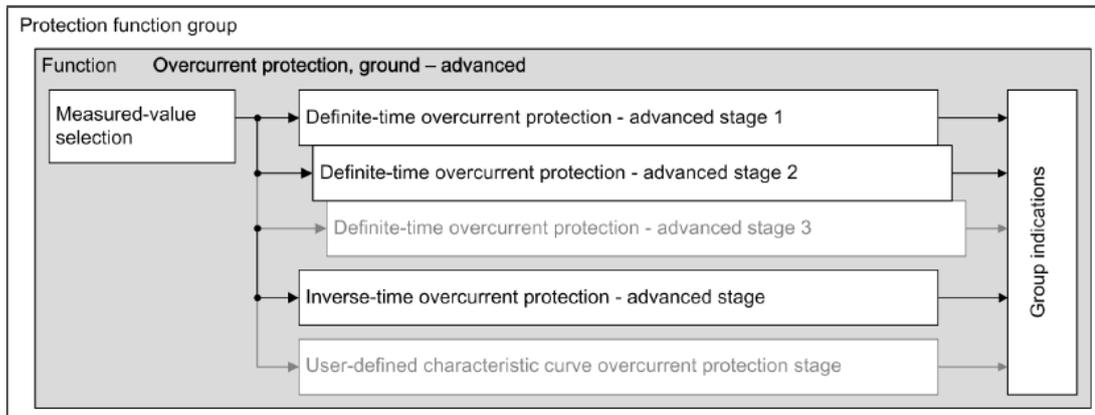
- Proteção de Sobrecorrente, neutro – avançado (50N/51N OC-gnd-A)
- Proteção de Sobrecorrente, neutro– básico (50N/51N OC-gnd-B)

Onde: OC – *Overcurrent*, gnd – *ground*, A – *advanced* e B – *basic*

No tipo de função avançado, os seguintes estágios poderão operar simultaneamente: máximo de 3 estágios de tempo definido e 1 estágio de tempo

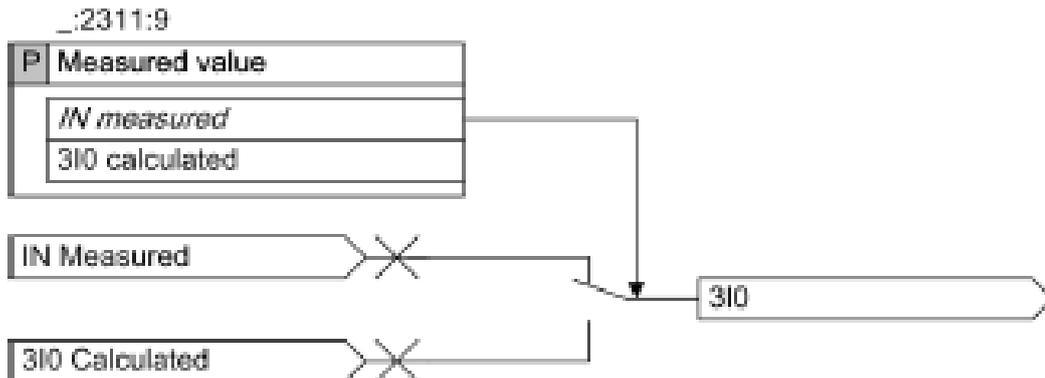
inverso, também com a possibilidade de o usuário definir sua própria curva, conforme Figura 33.

Figura 33: Estrutura embarcada da função de proteção de sobrecorrente de neutro, avançada



Fonte: (SIEMENS, 2024)

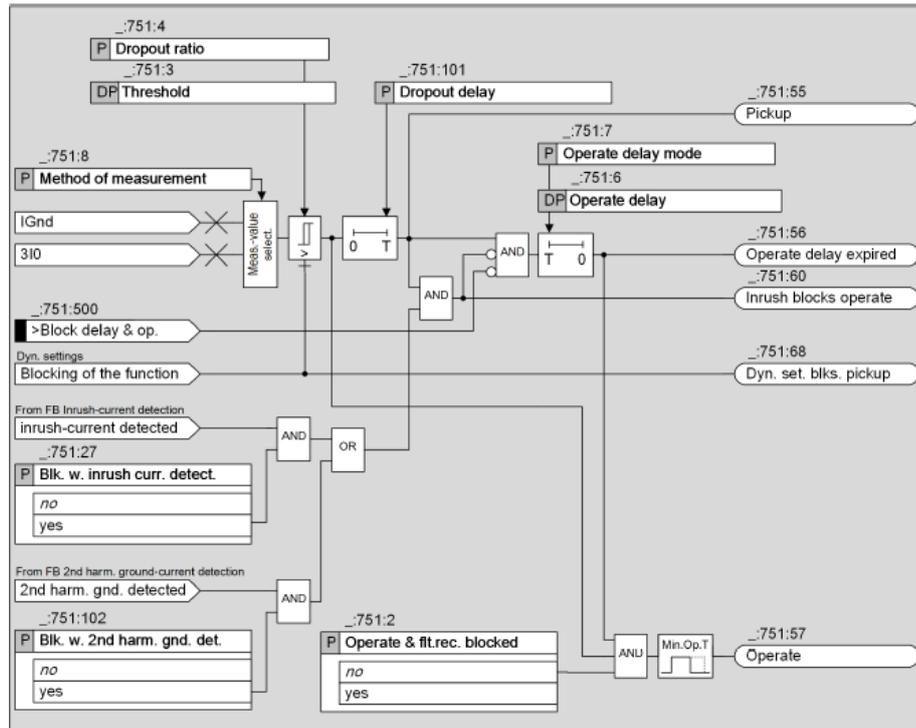
Figura 34: Diagrama lógico da seleção de medição de valor



Fonte: (SIEMENS, 2024)

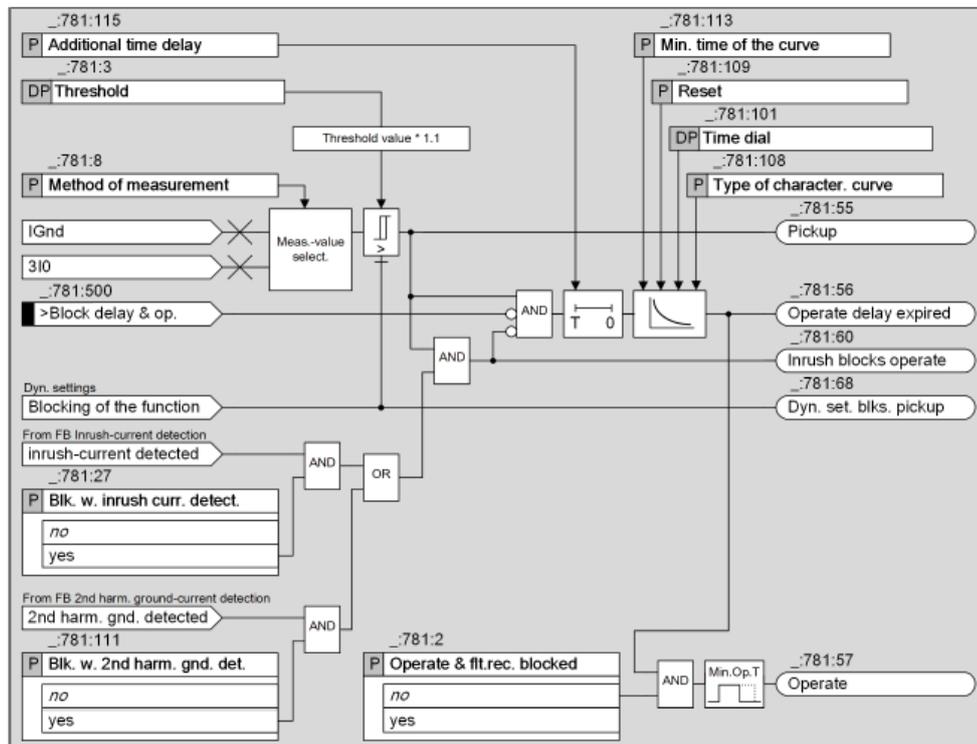
Na Figura 35 e Figura 36, pode-se compreender melhor e de forma lógica quais são as variáveis lógicas de entrada e saída que o IED processa antes de disparar as saídas lógicas como *pickup*, *operate* ou *operate delay expired* de acordo com o estágio analisado, tempo definido ou curva característica de tempo inverso. Na Figura 37, pode-se entender como é escolhido o modo de medição do valor da corrente de neutro, em duas possibilidades: calculada ou medida.

Figura 35: Diagrama lógico do estágio de tempo definido da função de sobrecorrente de neutro, avançado



Fonte: (SIEMENS, 2024)

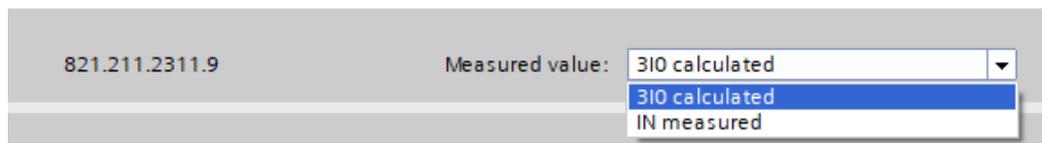
Figura 36: Diagrama lógico do estágio com curva característica de tempo inverso da função de sobrecorrente de neutro, avançado



Fonte: (SIEMENS, 2024)

Os ajustes parametrizáveis desta função, bem como suas definições, seguem o mesmo disposto no item 3.7.2.1, com adição da caixa de seleção do valor medido, conforme Figura 37, e com exceção do *1-pole operate allowed* (devido à faltas de terra serem tipicamente unipolares, este IED não suportar abertura seletiva por fase e nem conseguir identificar claramente pelo grupo da função qual fase gerou o *pickup*) e do *pickup delay*, este último sem razões explícitas informadas no manual do IED.

Figura 37: Caixa de seleção de medição do valor de corrente da função de sobrecorrente de neutro



Fonte: (SIEMENS, 2024)

3.8 GRAVAÇÃO DE OSCILOGRAFIAS

A gravação de oscilografias ou falhas, frequentemente referida no manual como “*Fault Recording*” ou “Registros de Falha”, é mais uma funcionalidade dos dispositivos SIPROTEC 5, que registra dados da partida e operações de funções de proteção e as respostas dos dispositivos a esses eventos no sistema de energia.

Um registro de falha contém valores amostrados dos canais de entrada analógicos do dispositivo (correntes e tensões), valores medidos calculados internamente (como a corrente de neutro), sinais digitais: *pickup* e *trip* de funções de proteção e sinais binários (ex: *status* da posição de disjuntores).

Além disso, é importante garantir que o tempo de pré-falha e pós-falha esteja devidamente configurado para que o registro contenha dados suficientes para análise. Esses tempos permitem capturar o comportamento do sistema antes, durante e após o distúrbio, o que é essencial para entender a sequência dos eventos e validar a atuação das proteções. A correta parametrização desses intervalos contribui significativamente para diagnósticos mais precisos e para a confiabilidade da operação da subestação.

Para realizar os ajustes gerais e específicos do gravador de oscilografias no DIGSI 5, conforme Figura 38 deve-se acessar o menu de **Configurações** (*Settings*) do IED cadastrado, em seguida acessar o menu **Gravação** (*Recording*).

Figura 38: Ajustes gerais da gravação de oscilografias

81.2701.175	Scaling COMTRADE:	Secondary values
81.2701.176	COMTRADE revision year:	COMTRADE 1999
81.2701.1	Mode:	on

Fonte: (SIEMENS, 2024)

Como pode ser visto na Figura 38, as oscilografias podem estar ativas ou não e serem salvas em: valores secundários ou primários (referindo-se aos enrolamentos primários e secundários de TPs e TCs) e nos formatos COMTRADE (do inglês *Common Format for Transient Data Exchange*): padrão estabelecido pela norma C37.111 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), facilitando a interpretação e permitindo o compartilhamento de arquivos de dados entre diferentes plataformas e dispositivos. (PRONEXT ENGENHARIA, 2024)

Outros parâmetros configuráveis para a gravação de oscilografias também incluem: frequência de amostragem, duração do registro, critério de partida, critério de salvamento, dentre outros, conforme Figura 39.

Figura 39: Ajustes específicos da gravação de oscilografias

81.791.2761.130	Fault recording:	with pickup
81.791.2761.131	Storage:	with trip
81.791.2761.111	Maximum record time:	5.00 s
81.791.2761.112	Pre-trigger time:	0.50 s
81.791.2761.113	Post-trigger time:	0.50 s
81.791.2761.116	Manual record time:	0.50 s
81.791.2761.140	Sampling frequency:	2 kHz
81.791.2761.141	Sampl. freq. IEC 61850 rec.:	1 kHz
81.791.2761.129	Cal.zero.seq.cur.channel:	310
81.791.2761.132	Cal.zero.seq.volt.channel:	V0

Fonte: (SIEMENS, 2024)

Onde:

1. **Fault Recording:** Define o critério de início da gravação de falhas. pode ser definido pelo usuário (**user defined**) ou mantido o padrão **with pickup**, que significa que a gravação é acionada quando uma função de proteção detecta uma condição e entra em estado de partida.
2. **Storage:** este parâmetro especifica o critério para salvar o registro de falha. Está disponível a configuração **always** e **with trip**. Com a configuração **Always** o registro será salvo sempre, e com a configuração **with trip**, o registro será salvo apenas se uma função de proteção emitir um comando de desarme para o disjuntor.
3. **Maximum record time:** este parâmetro define a máxima duração total, em segundos, de um único processo de gravação de falhas. A duração total do registro é composta pelo tempo do pré-gatilho (*pre-trigger time*) + pós-gatilho (*post-trigger time*) + duração do próprio critério de gravação.
4. **Pre-trigger time:** este parâmetro define o período tempo a ser gravado **antes** do evento que disparou a gravação. No exemplo da Figura 39, meio segundo de dados anteriores ao momento de disparo da oscilografia serão incluídos no registro. Isso é fundamental para analisar as condições do sistema imediatamente antes da falha.
5. **Post-trigger time:** este parâmetro define o período tempo a ser gravado **após** do evento que disparou a gravação. No exemplo da Figura 39, meio segundo de dados posteriores ao momento de disparo da oscilografia serão incluídos no registro. Isso é fundamental para analisar as condições do sistema imediatamente após a falha.
6. **Manual record time:** este parâmetro determina a duração de uma gravação acionada manualmente, é um bom recurso para fins de teste ou diagnóstico, permitindo a captura de um instantâneo do sistema por um certo período.
7. **Sampling Frequency:** taxa de amostragem dos canais de medição analógicos para a gravação de falhas. Esta taxa é exclusiva para a gravação de falhas e não afeta as funções de proteção nem os valores medidos calculados. Para a maioria dos dispositivos, as frequências

selecionáveis são 1 kHz, 2 kHz, 4kHz e 8kHz, podendo chegar até 16 kHz em registradores digitais de perturbação. No exemplo, 2 kHz indica que 2000 amostras por segundo serão coletadas para cada canal analógico.

8. **Sampl. Freq. IEC 61850 rec.:** este parâmetro define a frequência de amostragem para o registro de falhas que será baixado usando o protocolo de comunicação IEC 61850. Este valor não pode ser maior do que a frequência de amostragem definida no parâmetro anterior.
9. **Cal.zero.seq.cur.channel:** este parâmetro permite determinar se a corrente de sequência zero calculada (3I0 ou -3I0) será incluída como um canal distinto na oscilografia.
10. **Cal.zero seq volt. Channel:** similarmente ao anterior, permite determinar se a tensão de sequência zero calculada (V0 ou 3V0) será gravada em um canal separado no registro de falha.

Todos os registros salvos são automaticamente numerados em ordem crescente, limitados a 128 registros, recebem um carimbo de data/ hora em tempo real para o início do evento. Cada registro de oscilografia tem um *log* de eventos correspondente com o mesmo número, garantindo associação única entre os dois registros.

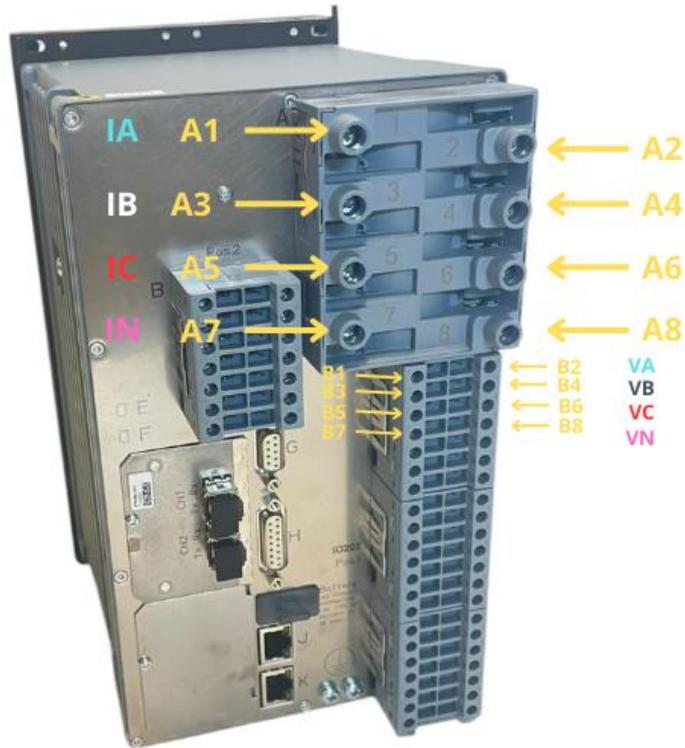
3.9 CONEXÕES DE ENTRADAS ANALÓGICAS DO IED

Conforme mencionado anteriormente, os IEDs da SIEMENS são modularizados e flexíveis em sua configuração de *hardware*, portanto, existem vários módulos de conexões analógicas, digitais, comunicação que podem ser adquiridos ou montados de acordo com a necessidade do sistema elétrico monitorado e do cliente. Neste subitem 3.9, é abordada a conexão de TCs e TPs ao IED SIEMENS 7SJ85, que possui quatro canais de corrente e quatro canais de tensão.

Todo o conjunto contém 17 BI (entradas binárias, do inglês *binary inputs*), 16 saídas binárias, 4 canais para transformadores de corrente de proteção e 4 canais para transformadores de potencial padrão. Possui 16 LED (do inglês, *Light Emitting Diode*), 3 canais de comunicação, sendo: 2 para cordões ópticos e 1 porta ethernet e

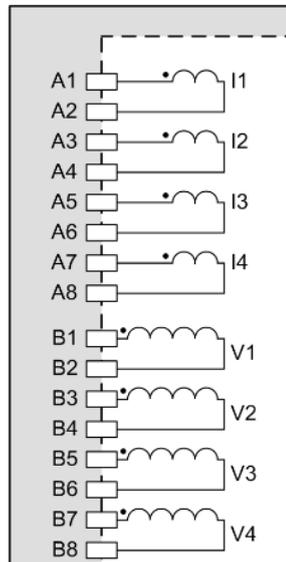
tensão de alimentação CC 60V-250V / CA 100V-230V. A traseira do módulo base pode ser vista na Figura 40.

Figura 40: Traseira do módulo base do IED SIEMENS 7SJ85 utilizado no projeto



Fonte: adaptado de (INDUSTRIE24)

Figura 41: Diagramas de circuitos analógicos do módulo IO202



Fonte: Adaptado de (SIEMENS)

Como mostrado na Figura 41, o diagrama indica com clareza qual a localização de cada entrada ou saída binária ou entradas analógicas, referindo-se à posição de cada uma nos módulos do IED. Os canais de corrente são identificados por I1 a I4 e estão localizados na posição A1 a A8 do módulo IO202, sendo A1 e A2 a polaridade e não polaridade do canal I1 de corrente, respectivamente, e assim sucessivamente. Isso vale também para os canais de tensão, identificados por V1 a V4 e estão localizados na posição B1 a B8 do módulo IO202, sendo B1 e B2 a polaridade e não polaridade do canal V1 de tensão, respectivamente, e assim sucessivamente.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O cubículo de média tensão e seus equipamentos elétricos associados, cujas configuração e testes das proteções são objeto de estudo deste trabalho, está inserido numa planta híbrida real de um parque eólico localizado no estado da Bahia.

Esta SE contém como fontes primárias de energia um aerogerador, uma usina solar e um BESS. Devido à presença do BESS, pode operar em modo *on-grid* ou *off-grid*, evidenciando o melhor uso da infraestrutura de linhas de transmissão ao redor dos parques. Deseja-se manter as LT sempre em uso durante o dia todo.

Na operação diurna, há geração originada da conexão do parque solar e eólico à subestação, armazenando energia no BESS.

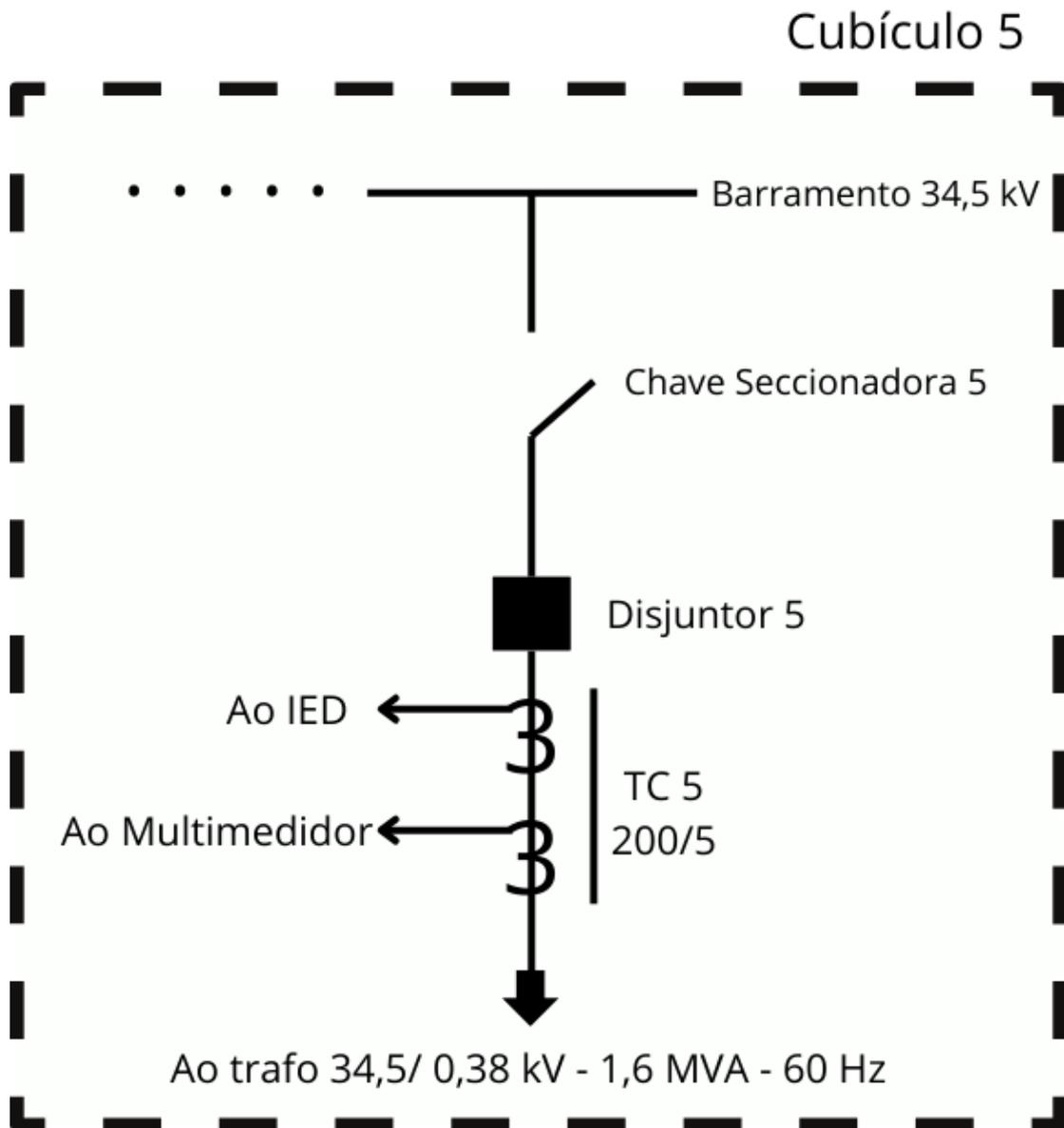
Na operação noturna, há primordialmente apenas o parque eólico com ou sem utilização da energia armazenada pelo BESS. Ambas as operações colaboram para a suavização da curva de injeção de energia neste barramento.

O cubículo em estudo é o quinto cubículo que compõe o barramento em 34,5 kV da subestação híbrida, que é do tipo abrigada. Três cubículos estão associados a uma fonte primária de energia, sendo o cubículo em estudo associado a uma carga RLC de testes de 1,6 MVA e o primeiro cubículo possibilita a exportação da energia gerada neste barramento.

Cada cubículo compreende um painel de média tensão blindado, contendo: um barramento de força, TC, TP (em alguns casos), um disjuntor, uma chave seccionadora, o IED e duas chaves de aferição: uma para a medição e outra para a proteção.

O diagrama unifilar do cubículo é representado na Figura 42, indicando como estão conectados os equipamentos elétricos ao barramento de 36 kV (classe de isolamento) da subestação abrigada.

Figura 42: Diagrama unifilar do cubículo cinco da planta híbrida



Fonte: O Autor

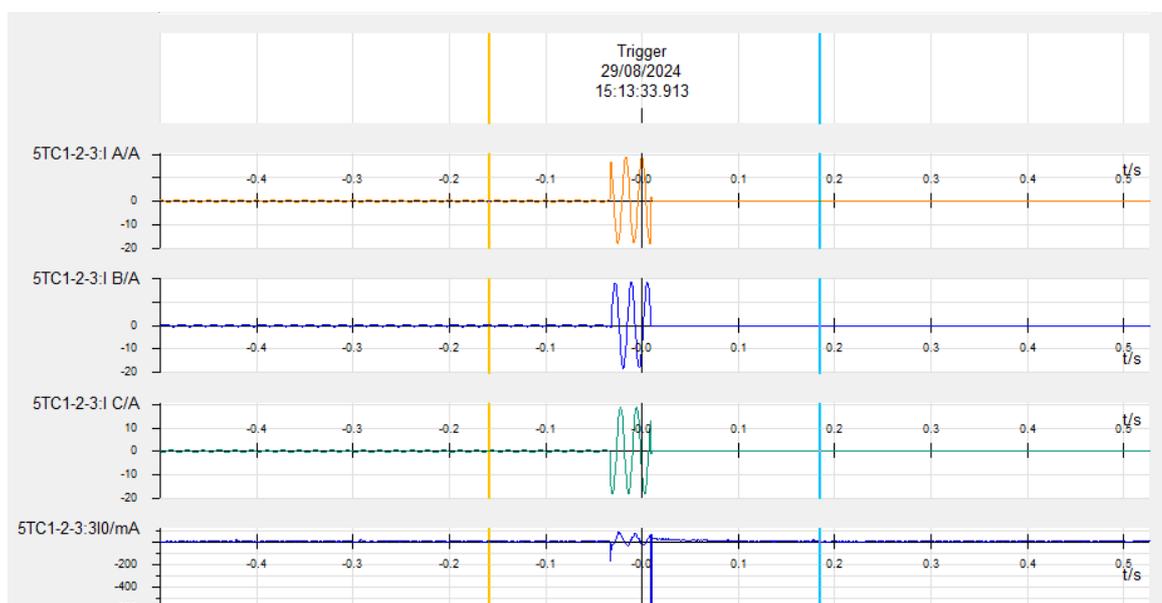
4.2 METODOLOGIA DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados se deu no período de comissionamento e testes das proteções durante a etapa do TAC da planta híbrida. As proteções foram testadas com valores e ajustes aleatórios antes da ordem de ajustes enviada pela companhia dona do empreendimento. Por questão de confidencialidade, não será tratado neste trabalho os estudos elétricos realizados para a planta, seus níveis de curto-circuito, quais proteções ficaram ativas na SE nem a graduação de suas proteções.

Nesta etapa, foram testadas as proteções de sobrecorrente de fases (50/51), sobrecorrente de neutro (50N/51N), sobretensão de fase (59), subtensão (27), sobretensão de neutro (59N) e falha disjuntor (50BF). Contudo, neste estudo apenas será mostrado os resultados dos testes das funções de sobrecorrente de fase e neutro.

Os dados foram analisados após simulação de faltas reais através da injeção de corrente, observando a correta abertura do disjuntor, correta sequência de eventos nos *logs* e oscilografias geradas após cada teste. Após cada evento registrado, as oscilografias podem ser acessadas nos dados de processo do IED (do inglês *process data*) no *software* DIGSI 5 e visualizadas no *software* SIGRA, conforme mostrado na Figura 43.

Figura 43: Exemplo de visualização no DIGSI 5 de oscilografia gravada



Fonte: O Autor

4.2.1 Roteiro de Testes de Proteção

Os testes de proteção são realizados simulando os circuitos secundários de corrente e tensão advindos dos TC e TP associados ao evento em questão, realizando uma injeção de carga diretamente no IED ou na chave de aferição do painel.

Para isto, devem ser feitas as conexões para injeção de carga na chave de aferição, seccionando o circuito analógico entre o TC, TP e IED, e injetando na parte superior da chave de aferição ligada diretamente ao IED, utilizando um equipamento de teste de relé (também chamado de caixa de testes) de fabricantes conhecidos como: DOBLE, OMICRON, CONPROVE etc. Na aplicação do estudo de caso a ser apresentado na seção 4, foi utilizada a caixa de teste da fabricante OMICRON CMC 356 (conforme Figura 44) e o software da fabricante Test Universe.

Figura 44: Equipamento de teste de relés CMC356 da OMICRON



Fonte: (OMICRON)

4.3 MONTAGEM DA INFRAESTRUTURA PARA INJEÇÃO DE CARGA

A injeção de carga ou corrente, neste caso, foi realizada com uma caixa de testes da *OMICRON* modelo CMC 356. Para isto, “abriu-se” os blocos de corrente da chave de aferição para curto-circuitar o secundário do TC, e foram injetadas correntes trifásicas na parte que é conectada diretamente às entradas analógicas de corrente do IED SIEMENS 7SJ85, conforme esquema mostrado na Figura 45.

Para configurar a parada da injeção de corrente, configurou-se uma BO reserva do IED e conectou-a à uma BI configurável da caixa de testes. Dessa forma, havendo uma atuação de qualquer proteção detectada pela lógica interna do IED, a BO será comutada e atuará a entrada binária configurada na caixa de testes, parando a injeção de corrente e o teste.

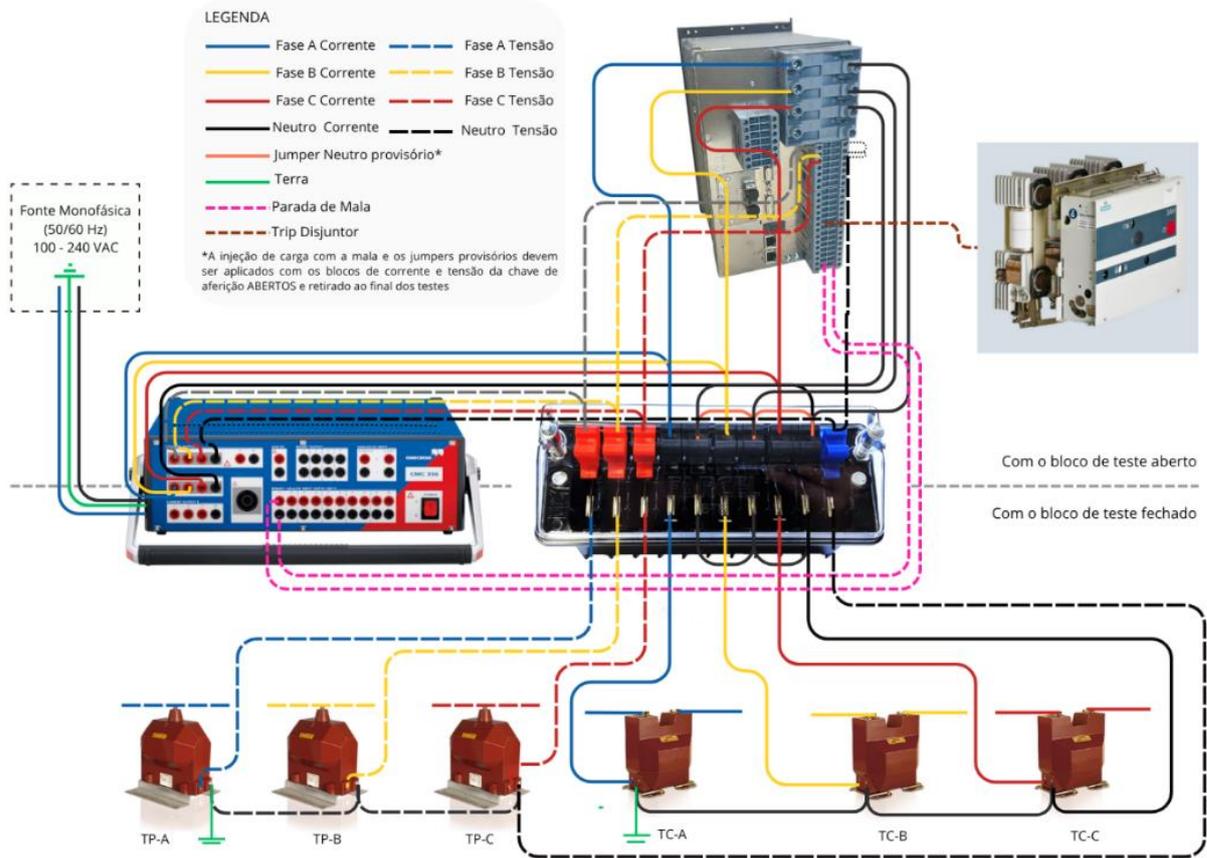
A *OMICRON* disponibiliza em seu *software Test Universe* vários módulos de testes, a depender da licença adquirida com o equipamento, dentre eles o módulo *State Sequencer*. Este módulo permite simular uma sequência de estados, ou seja, eventos configuráveis temporalmente, com tensões, correntes e sinais variando conforme definição do usuário.

A ideia por trás disto é montar um roteiro completo e testar o comportamento dinâmico do relé frente a situações reais de casos de falta, simulando-se estados de pré-falta, falta e pós falta, configurando em cada estado: nome, duração (tempo em segundos ou ciclos), valores de corrente/ tensão, sinais binários, condições de transição (por tempo ou disparo de proteção), conforme Figura 46. A este pacote de configurações, no setor atribui-se o nome de macro de teste.

Durante a montagem, é fundamental garantir que todos os caminhos de sinais analógicos e digitais estejam corretamente conectados, respeitando as polaridades dos TC e TP, e que as fontes de tensão estejam devidamente referenciadas. Pequenos erros na fiação ou configuração podem comprometer a validade do teste, tornando indispensável uma verificação prévia do sistema antes de iniciar as injeções de carga.

Após a verificação, pode-se então injetar corrente ou tensão em uma fase por vez, comparando o valor injetado e o valor lido no IED ou sistema supervisorio, atestando que a ligação está correta e as polaridades respeitadas.

Figura 45: Exemplo de infraestrutura de montagem para injeção de carga no IED



Fonte: O Autor

Figura 46: Exemplo de simulação de falta na fase A no *State Sequencer*

Nome	PRÉ FALTA	1	2	3	PÓS FALTA				
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	2.500 A	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active		0 output(s) active		0 output(s) active		0 output(s) active		0 output(s) active
Trigger			100.0 ms						

Fonte: O Autor

As correntes e tensões aplicadas são por fase, compreendendo valores de 0 A até 32 A e de 0 a 300 V, respectivamente, sendo os valores de tensão normalmente aplicados 66,40 V, conforme equação $V_{fase} = \frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66,40 V$ (8).

$$V_{fase} = \frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66,40 V \quad (8)$$

4.4 CONFIGURAÇÃO DA MACRO DE TESTE

Para todos os testes, são utilizadas três sequências de teste ou estados conforme mencionados no item 4.3, são eles: a pré-falta, falta e pós falta.

O estado de pré-falta representa o sistema elétrico estável e em regime permanente. Ele contém valores de tensão e corrente em valores típicos de secundário iguais ou próximos aos valores nominais do sistema e ao dar partida no teste, a caixa de testes injeta os valores cadastrados na macro e aguarda por um gatilho (do inglês, *trigger*), que pode ser de vários tipos, como exemplo: por tempo, por entrada binária ou entrada manual.

O estado de falta em si representa o sistema elétrico em condição de curto-circuito. Ele contém uma fase com o valor ajustado maior que o limiar de corrente configurado no IED e as outras fases mantêm-se no valor nominal ou em zero, enquanto a caixa de testes aguarda um *trigger* binário enviado por uma BO do IED para parar o teste.

O estado de pós falta representa o estado do sistema elétrico imediatamente após uma condição de curto-circuito, se não houver religamento automático configurado, espera-se que o disjuntor do circuito abra, isolando a falta e zerando as correntes do sistema elétrico.

Além disso, o *software Test Universe* oferece uma funcionalidade de avaliação de tempo, configurável de acordo com definição do usuário, geralmente utilizada para medir o tempo desde a injeção de carga até o disparo ou parada da caixa. Uma breve explicação dos parâmetros configuráveis são:

1. **Nome:** nome do estado de avaliação de tempo.
2. **Ignorar Antes:** estados que devem ser ignorados antes desta avaliação do tempo.
3. **Iniciar:** estado que se deve iniciar a avaliação de tempo.
4. **Parar:** estado que se deve parar a avaliação de tempo.
5. **Tnom:** tempo estimado para duração da falta.
6. **Tdesv-:** mínimo desvio de tempo admissível para a falta.
7. **Tdesv+:** máximo desvio de tempo admissível para a falta.

8. **Tatual:** tempo real aferido desde o estado “Iniciar” até o gatilho configurado em “Parar”.
9. **Tdesv:** desvio de tempo calculado entre “Tatual” e “Tnom”, deve variar entre Tdesv- e Tdesv+.
10. **Avaliação:** se positivo (+) ou ✓, o Tdesv se manteve dentro dos parâmetros esperados e o teste foi aprovado. Se negativo (-) ou X, o Tdesv não se manteve dentro dos parâmetros esperados e o teste foi reprovado.

Todos os parâmetros explicitados e configurados na avaliação de tempo podem ser visualizados na Figura 47.

Figura 47: Avaliação de tempo do *State Sequencer*

Avaliação do Tempo										
	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
1	51N FA	51N FA	51N FA	Disparo 0>1	1.000 s	200.0 ms	200.0 ms	1.019 s	19.10 ms	✓
2	51N FB	51N FB	51N FB	Disparo 0>1	1.000 s	200.0 ms	200.0 ms	1.019 s	19.30 ms	✓
3	51N FC	51N FC	51N FC	Disparo 0>1	1.000 s	200.0 ms	200.0 ms	1.032 s	32.20 ms	✓
4										●

Fonte: O Autor

5 RESULTADOS

Nesta seção, serão mostrados os resultados dos testes de sobrecorrente de fase e neutro, os valores com os quais a função de proteção foi ajustada temporariamente e as oscilografias gravadas após as atuações. Ambas as funções de proteção contém apenas os estágios de: tempo definido 1 e característica de tempo inverso ativos.

5.1 RESULTADOS ESPERADOS

Como nos testes não há ajuste do *pickup delay*, *dropout delay* nem do *operate delay*, os resultados esperados para os testes de proteção de sobrecorrente de fase e neutro por tempo definido seguem o esperado de uma proteção de sobrecorrente instantânea, ou seja, um tempo de atuação próximo a zero segundos. Todavia, como

existem limitações físicas e erros de medição associados, admite-se um tempo esperado de 50 ms (cinquenta milissegundos) com tolerância de desvio de ± 50 ms.

Para os testes de sobrecorrente por tempo inverso, os tempos esperados são calculados a cada caso conforme os ajustes do estágio. Como é utilizada a curva NI para todos os testes, os tempos seguiram a equação da curva exposta no item 3.6.3. Os resultados esperados para os estágios temporizado e tempo definido podem ser vistos na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3: Resultados esperados para o estágio temporizado dos testes de sobrecorrente

Característica de tempo normalmente inverso (NI)									
Função	I_{ac} (A)	I_{ma} (A)	T_{ms}	T (s)	<i>pickup delay</i> (s)	<i>Min. Time of the curve</i> (s)	<i>Additional time delay</i> (s)	Tempo total esperado (s)	Desvio admitido (ms)
51 Fases	1	1.2	0.05	1.92	0	0	0 s	1.92	50
51 Neutro	0.07	0.1	0.05	0.98	N/A	0	0 s	0.98	50

Fonte: O Autor

Tabela 4: Resultados esperados para o estágio de tempo definido dos testes de sobrecorrente

Característica de tempo definido 1					
Função	I_{ac} (A)	<i>Pickup delay</i> (s)	<i>Operate delay</i> (s)	Tempo esperado real (ms)	Desvio admitido (ms)
50 Fases	12.9	0	0	50	50
50 Neutro	0.35	-	0	50	50

Fonte: O Autor

Onde:

- O tempo total esperado é a soma de T, *pickup delay*, *Min. Time of the curve* e *Additional time delay*, caso aplicáveis.
- Tempo esperado real é a soma de *pickup delay* e *operate delay*, caso aplicáveis.
- Desvio admitido é o desvio máximo admitido inserido manualmente na avaliação da macro de testes.
- N/A significa não se aplica.
- Demais termos já foram definidos nos itens 3.7.2.1 e 3.6.3.

5.2 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE FASE POR TEMPO DEFINIDO (50)

Por simplificação dos testes, apenas esta função e este estágio da função foram deixados ativo, visando evitar atuação indevida das funções de neutro e do estágio de tempo inverso da proteção de sobrecorrente de fase.

Os ajustes das proteções no DIGSI 5, software da fabricante SIEMENS, foram parametrizados conforme Figura 48.

Figura 48: Ajustes da proteção de sobrecorrente de fase no estágio de tempo definido 1

821.201.661.1	Mode:	on	
821.201.661.2	Operate & fit.rec. blocked:	no	
821.201.661.11	1-pole operate allowed:	no	
821.201.661.26	Dynamic settings:	no	
821.201.661.27	Blk. w. inrush curr. detect.:	yes	
821.201.661.8	Method of measurement:	fundamental comp.	
821.201.661.3	Threshold:	12.90	A
821.201.661.4	Dropout ratio:	0.95	
821.201.661.102	Pickup delay:	0.00	s
821.201.661.101	Dropout delay:	0.00	s
821.201.661.6	Operate delay:	0.00	s
821.201.661.7	Operate delay mode:	Running dur. DO-delay	

Fonte: O Autor

Todo ajuste é importante quando se trata de proteção digital, mas em linhas gerais, os ajustes vistos na imagem significam dizer que:

- o estágio da função está **ativo**
- o bloqueio de operação e de gravação de oscilografia **não** está ativo
- o estágio pode ser bloqueado com a **detecção de corrente de inrush**,
- o método de medição é pela **componente fundamental**, o limiar de corrente ajustado é de **12,90 A**
- não há atrasos de tempo após o *pickup* ou *operate* da função por atuação deste estágio.

5.2.1 Fase A

Conforme Figura 49, para os testes da fase A, o estado de falta da macro foi ajustado com um valor de corrente na fase A que ultrapassasse o ajuste do limiar de corrente (*threshold*) indicado na Figura 48, dando condições para a identificação do estágio de tempo definido 1.

Figura 49: Sequência de estados para atuação da função 50TD fase A

	1			2			3		
Nome	pre falta			50 FA			pos falta A		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	13.00 A	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 50TD fase A, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 42,30 ms, conforme Tabela 5, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 4.

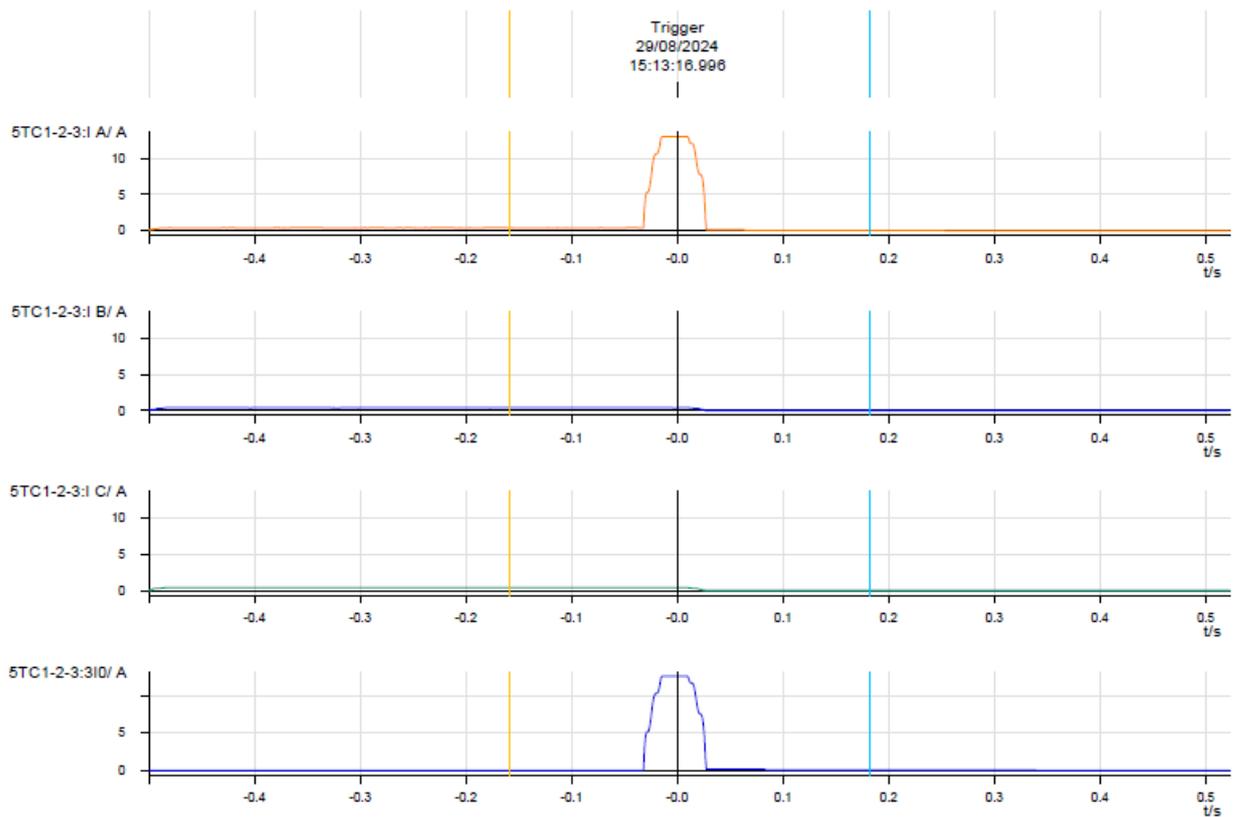
Tabela 5: Avaliação de tempo para atuação da função 50TD fase A

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
50FA	50FA	50FA	Disparo 0>1	50,00 ms	50,00 ms	50,00 ms	42,30 ms	-7,70 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 50, demonstra o gatilho e as variações temporais do canal de corrente A (5TC1-2-3: I A/A) e da corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/A), como esperado.

Figura 50: Oscilografia gravada da atuação da função 50TD fase A



Fonte: O Autor

5.2.2 Fase B

Conforme Figura 51, para os testes da fase B, o estado de falta da macro foi ajustado com um valor de corrente na fase B que ultrapassasse o ajuste do limiar de corrente (*threshold*) indicado na Figura 48, dando condições para a identificação do estágio de tempo definido 1.

Figura 51: Sequência de estados para atuação da função 50TD fase B

Nome	pre falta B			50 FB			pos falta B		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	13.00 A	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 50TD fase B, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 43,90 ms, conforme Tabela 6, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 4.

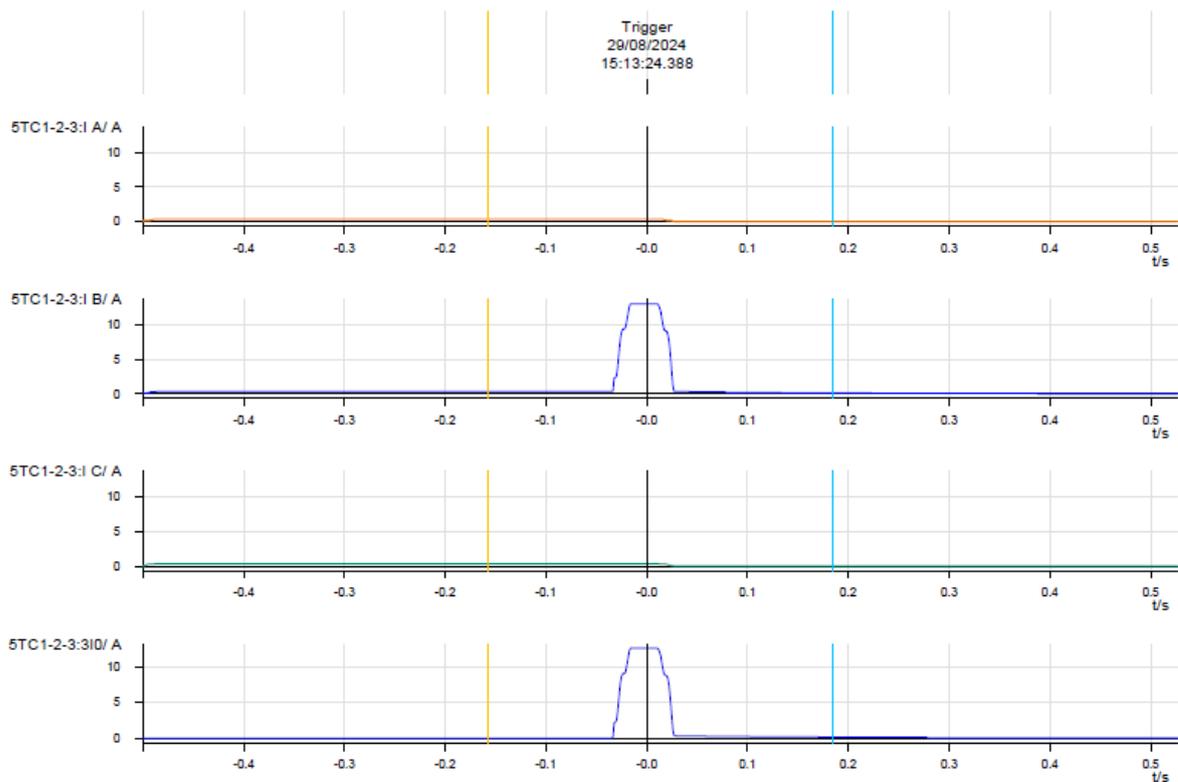
Tabela 6: Avaliação de tempo para atuação da função 50TD fase B

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
50FB	50FB	50FB	Disparo 0>1	50,00 ms	50,00 ms	50,00 ms	43,90 ms	-6,10 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 52, demonstra o gatilho e as variações temporais do canal de corrente B (5TC1-2-3: I B/A) e da corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/A), como esperado.

Figura 52: Oscilografia gravada da atuação da função 50TD fase B



Fonte: O Autor

5.2.3 Fase C

Conforme Figura 53, para os testes da fase C, o estado de falta da macro foi ajustado com um valor de corrente na fase C que ultrapassasse o ajuste do limiar de corrente (*threshold*) indicado na Figura 48, dando condições para a identificação do estágio de tempo definido 1.

Figura 53: Sequência de estados para atuação da função 50TD fase C

Nome	pre falta C			50 FC			pos falta C		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	13.00 A	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 50TD fase C, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 37 ms, conforme Tabela 7, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 4.

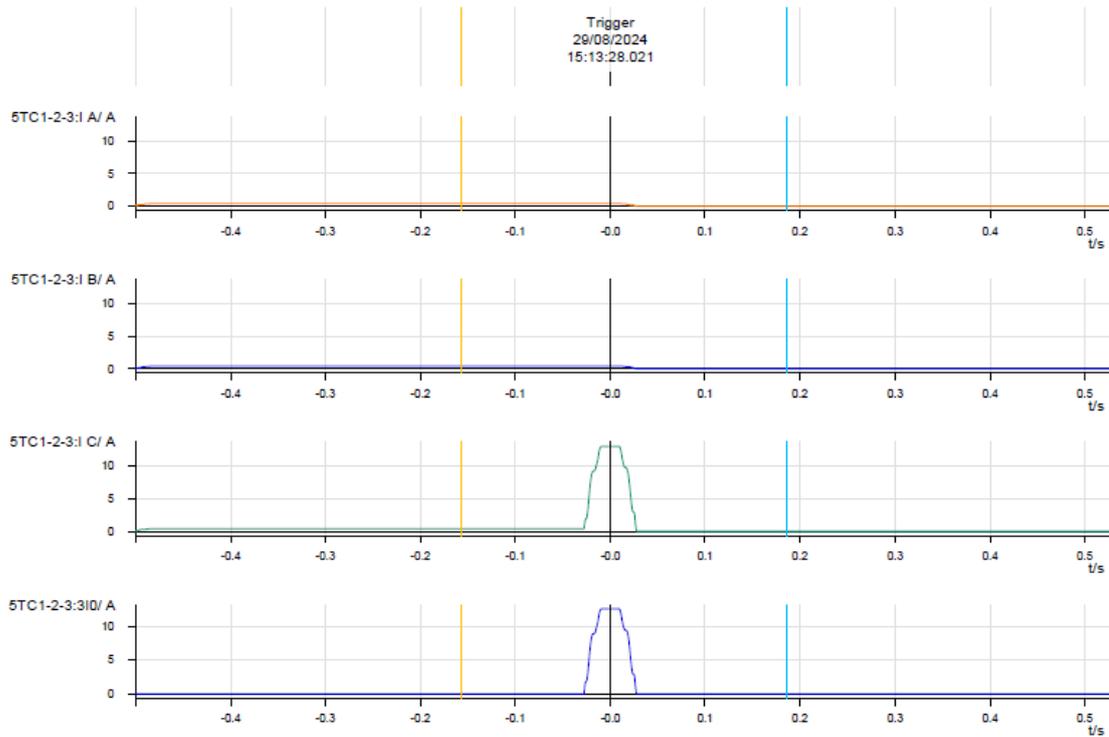
Tabela 7: Avaliação de tempo para atuação da função 50TD fase C

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
50FC	50FC	50FC	Disparo 0>1	50,00 ms	50,00 ms	50,00 ms	37 ms	-13 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 54, demonstra o gatilho e as variações temporais do canal de corrente C (5TC1-2-3: I C/A) e da corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/A), como esperado.

Figura 54: Oscilografia gravada da atuação da função 50TD fase C



Fonte: O Autor

5.2.4 Trifásica

Conforme Figura 55, para o teste trifásico, o estado de falta da macro foi ajustado com valores de corrente nas três fases que ultrapassassem o ajuste do limiar de corrente (*threshold*) indicado na Figura 48, dando condições para a identificação do estágio de tempo definido 1.

Figura 55: Sequência de estados para atuação da função 50TD trifásica

10			11			12		
pre falta 3F			50 3F			pos falta 3F		
66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	13.00 A	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	13.00 A	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	13.00 A	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 50TD trifásica, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 41,70 ms, conforme Tabela 8, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 4.

Tabela 8: Avaliação de tempo para atuação função 50TD trifásica

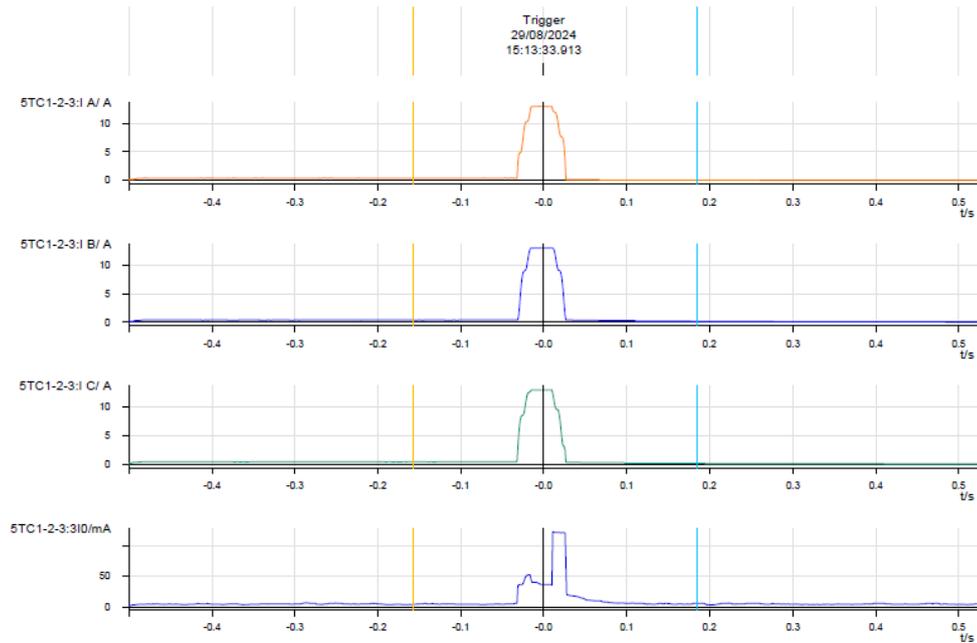
Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
50FC	50FC	50FC	Disparo 0>1	50,00 ms	50,00 ms	50,00 ms	41,70 ms	-8,30 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 56, demonstra o gatilho e as variações temporais dos três canais de corrente (5TC1-2-3: IA, B e C/A) e da ausência de corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/mA), como esperado. Quando há pequenas variações nas magnitudes das correntes na injeção trifásica, é possível que haja um cálculo de corrente 3I0 (em pequenas quantidades, escala em mA) de modo que apareça na oscilografia como ruídos ou pequenas variações no canal 3I0. Por isto, deve-se estar atento à escala do canal de oscilografia 3I0 que poderá aparecer em A, mA, kA etc.

Além disso, a análise detalhada da forma de onda permite identificar não apenas o instante exato de atuação, mas também eventuais atrasos ou oscilações no sinal que possam indicar limitações na instrumentação ou na parametrização do IED. O fato de a oscilografia registrar até mesmo correntes residuais muito pequenas comprova a sensibilidade do equipamento e reforça a necessidade de uma interpretação criteriosa dos dados. Assim, cada registro obtido contribui como evidência prática para validar a lógica de proteção e confirmar se os valores de ajuste definidos anteriormente estão condizentes com o desempenho real do sistema.

Figura 56: Oscilografia gravada da atuação função 50TD trifásica



Fonte: O Autor

5.3 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE FASE POR TEMPO INVERSO (51)

Por simplificação dos testes e visando evitar atuação indevida, foram desativadas temporariamente as funções de neutro. Os ajustes das proteções no DIGSI 5, software da fabricante SIEMENS, foram parametrizados conforme Figura 57.

Figura 57: Ajustes da proteção de sobrecorrente de fase no estágio de tempo inverso

821.201.691.1	Mode:	on	A
821.201.691.2	Operate & ft.rec. blocked:	no	
821.201.691.11	1-pole operate allowed:	no	
821.201.691.26	Dynamic settings:	no	
821.201.691.27	Blk. w. inrush curr. detect.:	yes	
821.201.691.8	Method of measurement:	fundamental comp.	
821.201.691.3	Threshold:	1.00	A
821.201.691.108	Pickup delay:	0.00	s
821.201.691.130	Type of character. curve:	IEC normal inverse	
821.201.691.113	Min. time of the curve:	0.00	s
821.201.691.131	Reset:	instantaneous	
821.201.691.101	Time dial:	0.05	
821.201.691.115	Additional time delay:	0.00	s

Fonte: O Autor

Os ajustes vistos na imagem significam dizer que:

- o estágio da função está **ativo**
- o bloqueio de operação e de gravação de oscilografia **não** está ativo
- o estágio pode ser bloqueado com a **detecção de corrente de inrush**
- o método de medição é pela **componente fundamental**
- o limiar de corrente ajustado é de **1,0 A**
- o tipo da curva característica é o **IEC normal inverso**
- o dial de tempo está ajustado em **0,05**
- não há atrasos adicionais de tempo após o *pickup* ou *operate* da função por atuação deste estágio.

5.3.1 Fase A

Conforme Figura 58, para os testes da fase A, o estado de falta da macro foi ajustado com um valor de corrente na fase A que ultrapassasse o ajuste do limiar de corrente (*Threshold*) indicado na Figura 57, dando condições para a identificação do estágio de tempo inverso.

Figura 58: Sequência de estados para atuação da função 51 fase A

Nome	pre falta			51 FA			pos falta A		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	1.200 A	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 51 fase A, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 1,957 s, conforme Tabela 9, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 3.

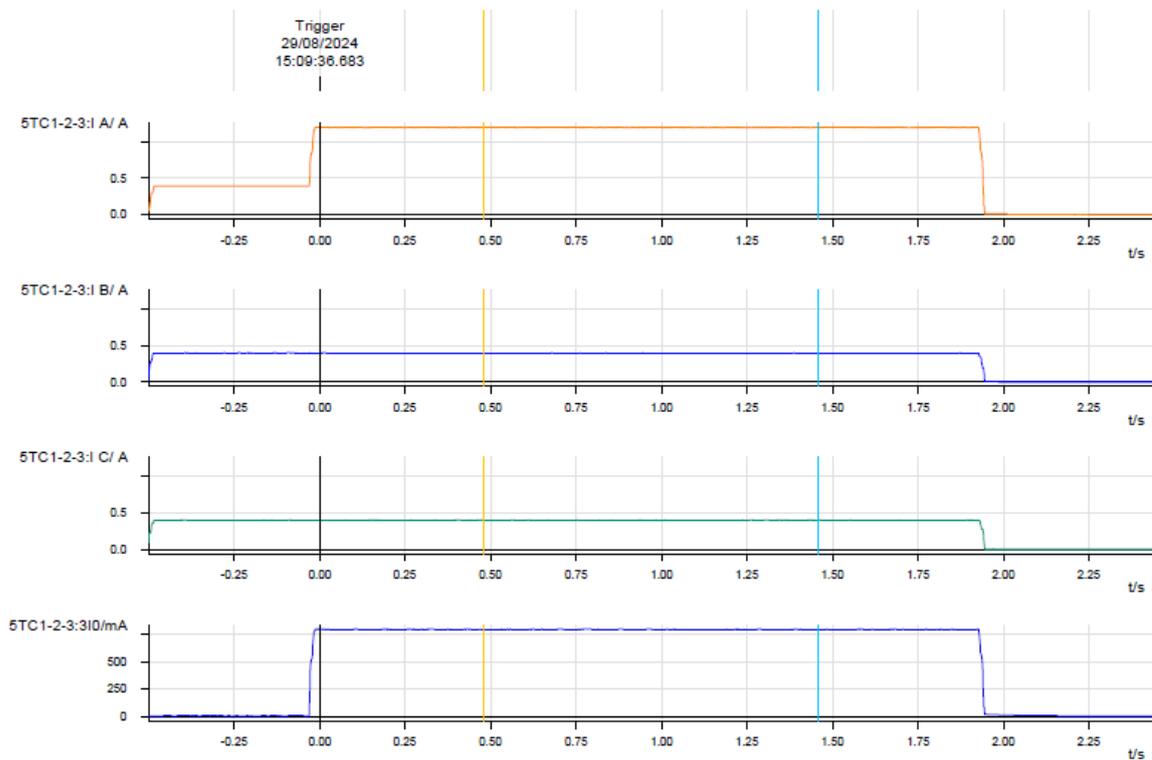
Tabela 9: Avaliação de tempo para atuação da função 51 fase A

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
51FA	51FA	51FA	Disparo 0>1	1,920 s	50,00 ms	50,00 ms	1,957 s	+37 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 59, demonstra o gatilho e as variações temporais do canal de corrente A (5TC1-2-3: I A/A) e da corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/A), como esperado.

Figura 59: Oscilografia gravada da atuação da função 51 fase A



Fonte: O Autor

5.3.2 Fase B

Conforme Figura 60, para os testes da fase B, o estado de falta da macro foi ajustado com um valor de corrente na fase B que ultrapassasse o ajuste do limiar de

corrente (*threshold*) indicado na Figura 57, dando condições para a identificação do estágio de tempo inverso.

Figura 60: Sequência de estados para atuação da função 51 fase B

Nome	pre falta B			51 FB			pos falta B		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	1.200 A	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 51 fase B, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 1,932 s, conforme Tabela 5, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 3.

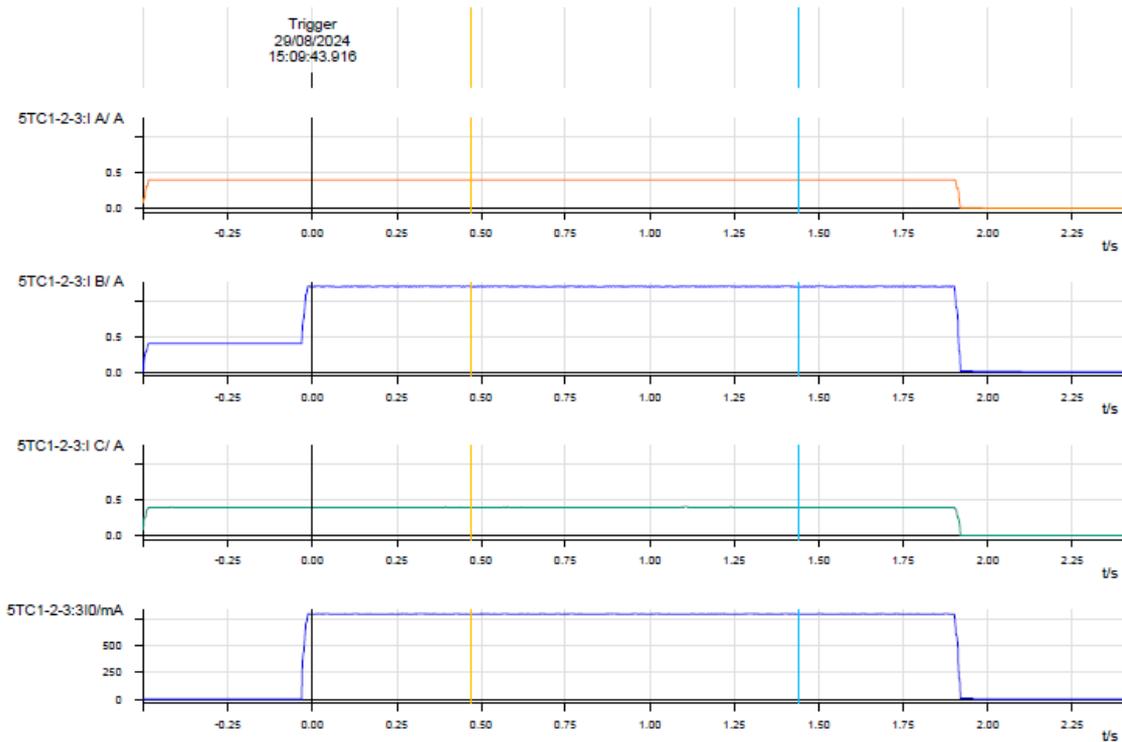
Tabela 10: Avaliação de tempo para atuação da função 51 fase B

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
51FB	51FB	51FB	Disparo 0>1	1,92 s	50,00 ms	50,00 ms	1,932 s	+12 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 61, demonstra o gatilho e as variações temporais do canal de corrente B (5TC1-2-3: I B/A) e da corrente de neutro (3I0) calculada (5TC1-2-3:3I0/A), como esperado.

Figura 61: Oscilografia gravada da atuação da função 51 fase B



Fonte: O Autor

5.3.3 Fase C

Conforme Figura 62, para os testes da fase C, o estado de falta da macro foi ajustado com um valor de corrente na fase C que ultrapassasse o ajuste do limiar de corrente (*Threshold*) indicado na Figura 57, dando condições para a identificação do estágio de tempo inverso.

Figura 62: Sequência de estados para atuação da função 51 fase C

Nome	pre falta C			51 FC			pos falta C		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	1.200 A	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 51 fase C, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 1,927 s, conforme Tabela 11, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 3.

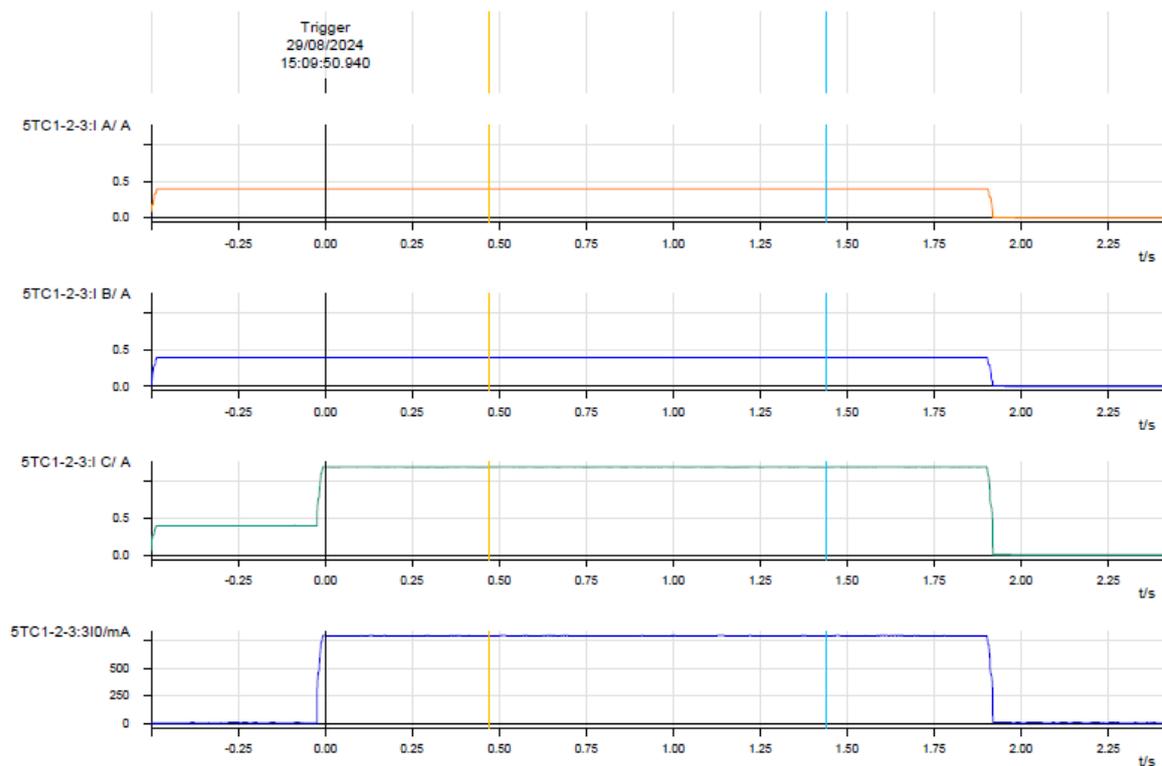
Tabela 11: Avaliação de tempo para atuação da função 51 fase C

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
51FC	51FC	51FC	Disparo 0>1	1,92 s	50,00 ms	50,00 ms	1,927 s	+7 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 63, demonstra o gatilho e as variações temporais do canal de corrente C (5TC1-2-3: I C/A) e da corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/A), como esperado.

Figura 63: Oscilografia gravada da atuação da função 51 fase C



Fonte: O Autor

5.3.4 Trifásica

Conforme Figura 64, para o teste trifásico, o estado de falta da macro foi ajustado com valores de corrente nas três fases que ultrapassasse o ajuste do limiar de

corrente (*Threshold*) indicado na Figura 57, dando condições para a identificação do estágio de tempo inverso.

Figura 64: Sequência de estados para atuação da função 51 trifásica

10			11			12		
pre falta 3F			51 3F			pos falta 3F		
66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	1.200 A	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	1.200 A	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	1.200 A	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
								

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 51 trifásica, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 1,929 s, conforme Tabela 12, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 3.

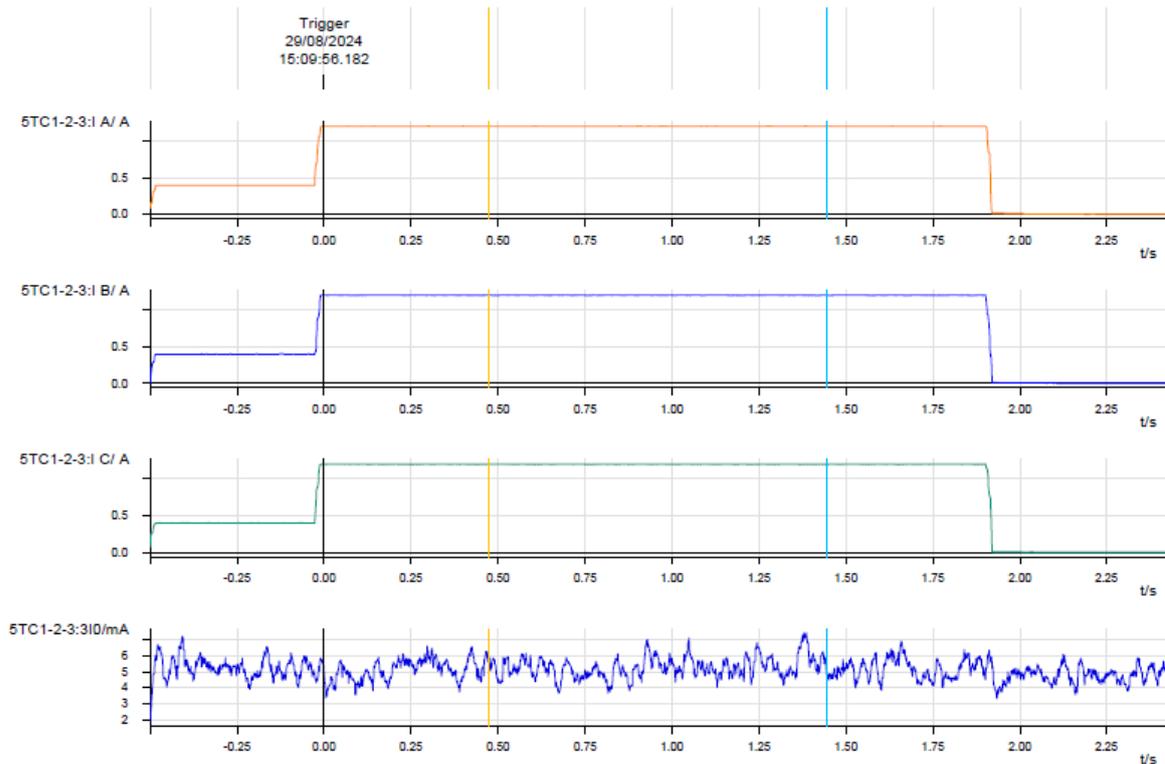
Tabela 12: Avaliação de tempo para atuação função 51 trifásica

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
513F	513F	513F	Disparo 0>1	1,920 s	50,00 ms	50,00 ms	1,929 ms	+9 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 65, demonstra o gatilho e as variações temporais dos três canais de corrente (5TC1-2-3: IA, B e C/A) e da ausência de corrente de neutro 3I0 (5TC1-2-3: 3I0/ mA) calculada, como esperado. Quando há pequenas variações nas magnitudes das correntes na injeção trifásica, é possível que haja um cálculo de corrente 3I0 (em pequenas quantidades, escala em mA) de modo que apareça na oscilografia como ruídos ou pequenas variações no canal 3I0. Por isto, deve-se estar atento à escala do canal de oscilografia 3I0 que poderá aparecer em A, mA, kA etc.

Figura 65: Oscilografia gravada da atuação função 51 trifásica



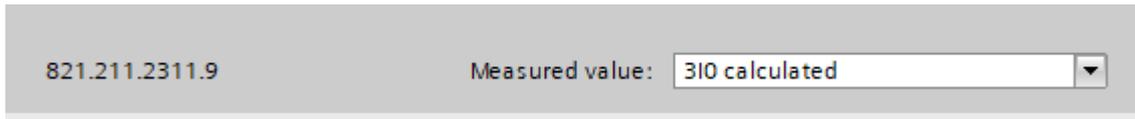
Fonte: O Autor

5.4 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO POR TEMPO DEFINIDO (50N)

Para visualizar a correta atuação da proteção de sobrecorrente de neutro por tempo definido, pode-se: simular uma atuação de falta monofásica com valores de fase igual ou superior ao ajuste da função de neutro ou provocar um desequilíbrio entre as fases, seja por magnitude, fase ou combinação dos dois, de modo que a corrente 3I0 calculada neste desequilíbrio seja superior ao limiar da função, que é de 0,35 A. Neste caso é produzido um desequilíbrio por magnitude das fases.

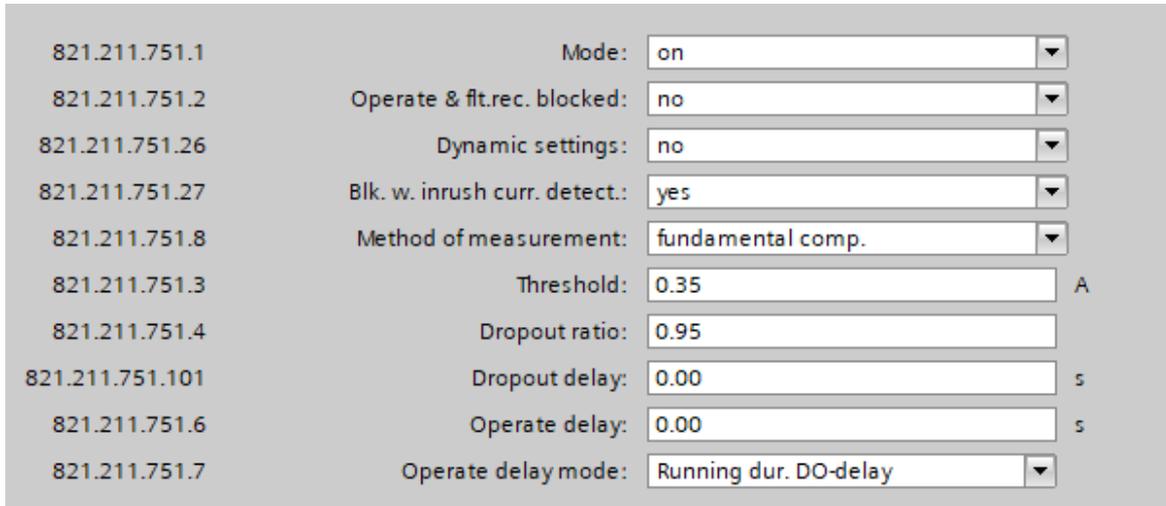
O parâmetro de valor medido escolhido para a corrente de neutro foi o 3I0 calculado (conforme Figura 66) devido à ausência de utilização do quarto canal de corrente do IED (conforme Figura 45), utilizado comumente para corrente de neutro medida. Os ajustes das proteções no DIGSI 5, software da fabricante SIEMENS, foram parametrizados conforme Figura 67.

Figura 66: Ajuste geral de valor medido para a função sobrecorrente de neutro



Fonte: O Autor

Figura 67: Ajustes da proteção de sobrecorrente de neutro por tempo definido



Fonte: O Autor

5.4.1 Falta por desequilíbrio de fases

Conforme Figura 68, para os testes da função de sobrecorrente de neutro, por atuação de desequilíbrio de correntes de fase, o estado de falta da macro foi ajustado com valores de corrente nas fases A,B e C de modo que a corrente 3I0 calculada ultrapasse o ajuste do limiar de corrente (*threshold*) indicado na Figura 67, dando condições para a identificação do estágio de tempo definido da função.

Figura 68: Sequência de estados para atuação da função 50N

	1			2			3		
Nome	pre falta			50N FA			pos falta A		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	400.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	300.0 mA	-30.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-30.00 °	60.000 Hz
I L2	400.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	700.0 mA	-150.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-150.00 °	60.000 Hz
I L3	400.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	700.0 mA	90.00 °	60.000 Hz	0.00 A	90.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 50N, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 32.70 ms, conforme Tabela 13, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 4.

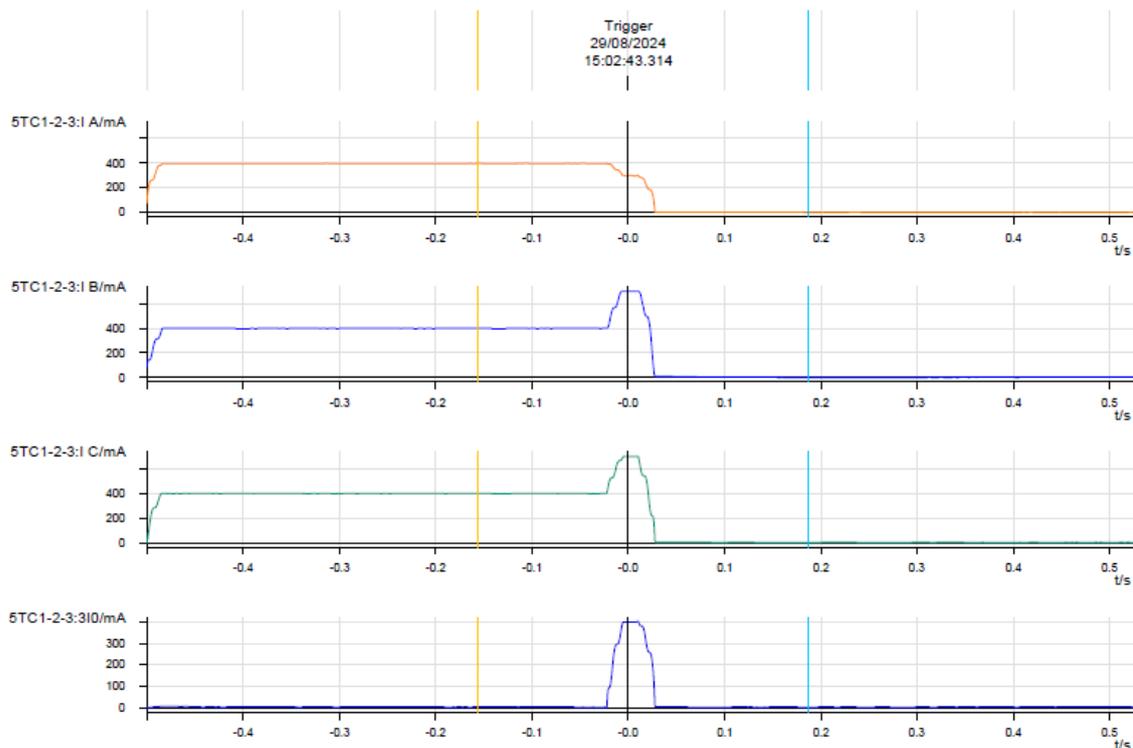
Tabela 13: Avaliação de tempo para atuação da função 50N

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
50N FA	50N FA	50N FA	Disparo 0>1	50 ms	50,00 ms	50,00 ms	32,70 ms	-17,30 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 69, demonstra o gatilho e as variações temporais dos canais de corrente A, B e C (5TC1-2-3: I A, B e C/ mA) e elevação da corrente de neutro 3I0 calculada (5TC1-2-3:3I0/mA) como esperado.

Figura 69: Oscilografia gravada da atuação da função 50N



Fonte: O Autor

5.5 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO POR TEMPO INVERSO (51N)

A visualização da correta atuação da proteção de sobrecorrente de neutro por tempo inverso é análoga à explicação do item 5.4, diferindo-se apenas do valor do ajuste da função, naturalmente mais sensível que o ajuste por tempo definido.

Dessa forma, pode-se: simular uma atuação de falta monofásica com valores de fase igual ou superior ao ajuste da função de neutro ou provocar um desequilíbrio entre as fases, seja por magnitude, fase ou combinação dos dois, de modo que a corrente 3I0 calculada neste desequilíbrio seja superior ao limiar da função, que é de 0,07 A. Neste caso, também é produzido um desequilíbrio por magnitude das fases.

Os ajustes deste estágio da proteção de sobrecorrente de neutro pode ser visto na Figura 70, conforme testado em campo.

Figura 70: Ajustes da proteção de sobrecorrente de neutro por tempo inverso

821.211.781.1	Mode:	on	A
821.211.781.2	Operate & flt.rec. blocked:	no	
821.211.781.26	Dynamic settings:	no	
821.211.781.27	Blk. w. inrush curr. detect.:	yes	
821.211.781.8	Method of measurement:	fundamental comp.	
821.211.781.3	Threshold:	0.07	A
821.211.781.108	Type of character. curve:	IEC normal inverse	
821.211.781.113	Min. time of the curve:	0.00	s
821.211.781.109	Reset:	instantaneous	
821.211.781.101	Time dial:	0.05	
821.211.781.115	Additional time delay:	0.00	s

Fonte: O Autor

5.5.1 Falta por desequilíbrio de fases

Conforme Figura 71, para os testes da função de sobrecorrente de neutro, por atuação de desequilíbrio de correntes de fase, o estado de falta da macro foi ajustado com valores de corrente nas fases A, B e C de modo que a corrente 3I0 calculada

ultrapasse o ajuste do limiar de corrente (*threshold*) indicado na Figura 70 , dando condições para a identificação do estágio de tempo inverso da função.

Figura 71: Sequência de estados para atuação da função 51N

	1			2			3		
Nome	pre falta			51N FA			pos falta FA		
V L1-E	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	66.40 V	0.00 °	60.000 Hz	0.00 V	0.00 °	60.000 Hz
V L2-E	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	-120.00 °	60.000 Hz	0.00 V	-120.00 °	60.000 Hz
V L3-E	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	66.40 V	120.00 °	60.000 Hz	0.00 V	120.00 °	60.000 Hz
I L1	700.0 mA	0.00 °	60.000 Hz	600.0 mA	0.00 °	60.000 Hz	0.00 A	0.00 °	60.000 Hz
I L2	700.0 mA	-120.00 °	60.000 Hz	700.0 mA	-120.00 °	60.000 Hz	0.00 A	-120.00 °	60.000 Hz
I L3	700.0 mA	120.00 °	60.000 Hz	700.0 mA	120.00 °	60.000 Hz	0.00 A	120.00 °	60.000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger									

Fonte: O Autor

Após detecção e atuação da função 51N, a caixa de teste foi interrompida via BO do IED durante o estado de falta e apresentou um resultado de tempo de 1,019 s, conforme Tabela 14, estando coerente com os resultados esperados da Tabela 3.

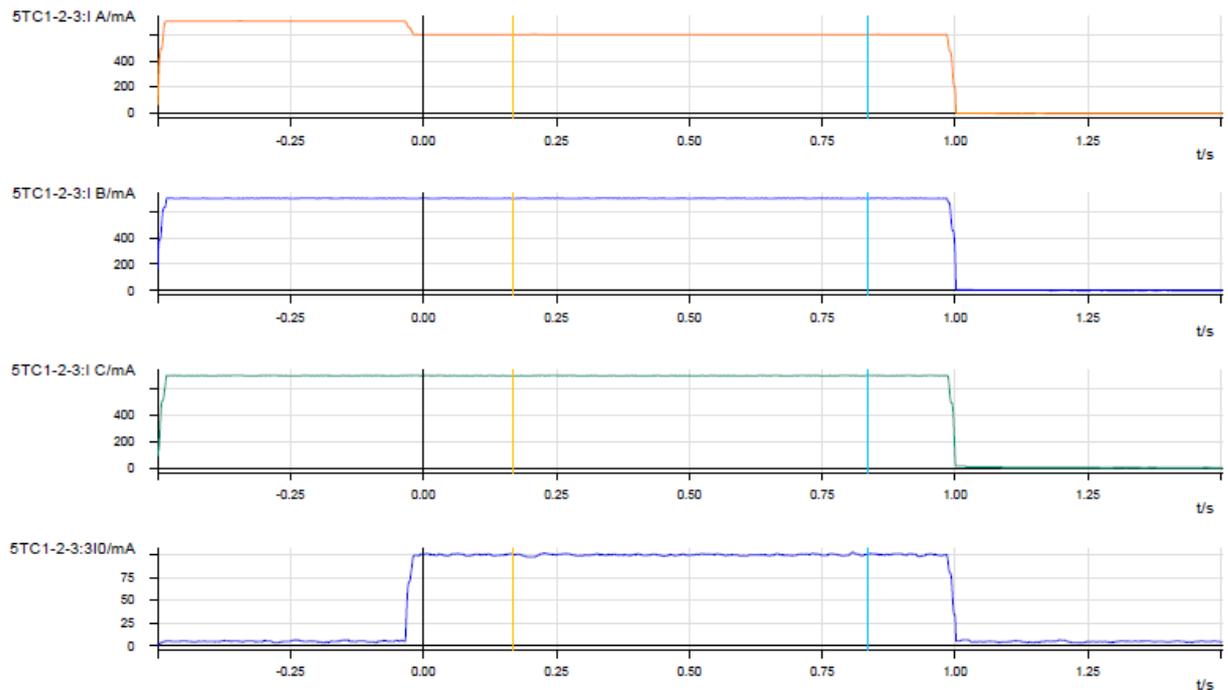
Tabela 14: Avaliação de tempo para atuação da função 51N

Nome	Ignorar Antes	Iniciar	Parar	Tnom	Tdesv-	Tdesv+	Tatual	Tdesv	Avaliação
51N FA	51N FA	51N FA	Disparo 0>1	0.98 s	50,00 ms	50,00 ms	1, 019 s	+19,12 ms	+

Fonte: O Autor

A oscilografia gravada pelo IED, apresentada na Figura 72, demonstra o gatilho e as variações temporais dos canais de corrente e elevação da corrente de neutro (3I0) calculada, como esperado.

Figura 72: Oscilografia gravada da atuação da função 51N



Fonte: O Autor

6 CONCLUSÕES

. Este trabalho evidencia que a correta parametrização das funções de proteção em relés digitais aliada a criteriosos testes de aceitação em campo, asseguram a seletividade e a velocidade de atuação esperadas das proteções mediante cálculo teórico, observando a abertura dos disjuntores do cubículo de média tensão 34,5 kV em estudo. As avaliações de tempo realizadas a cada teste mostraram desvios sempre dentro das margens definidas, confirmando a robustez e confiabilidade da lógica de proteção pré-configurada no IED SIEMENS 7SJ85. Analogamente, a análise de oscilografias atestam a fidelidade do processamento de sinais digitais, validando a coordenação entre os equipamentos de medição e proteção. Conclui-se, portanto, que todas as proteções obtiveram êxito nos testes realizados.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Integração com IEC61850: Estender este estudo para avaliar a comunicação em IEC61850 entre IEDs e entre IED e sistema supervisor.
2. Análise de faltas transitórias: Incluir testes de energização de transformadores, avaliando o comportamento do IED frente a correntes de *inrush*.
3. Otimização de macros: Realizar pesquisa e desenvolvimento de planilha que otimize os valores inseridos na macro de testes para evitar a desabilitação temporária de funções de proteção.
4. Expansão para outros tipos de proteção: Aplicar metodologia similar a funções de subtensão (27), sobretensão (59), sobretensão de neutro (59N), distância (21) e falha disjuntor (50BF), garantindo uma visão completa da proteção multifuncional do SIPROTEC 5.
5. Proteção em sistemas com linhas de transmissão CC: Avaliar a configuração e coordenação das proteções em sistemas com linhas em corrente contínua, considerando também a análise individual das fontes CA x CC.

7 REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 21 Maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020905_2_1.pdf>. Acesso em: 15 Junho 2025.

ALVES, MARLIANA D. O. L. **ENERGIA SOLAR: ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID.**

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Hidrogênio verde e armazenamento de energia elétrica:** novas fronteiras de desenvolvimento da fonte solar, 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/artigos/hidrogenio-verde-e-armazenamento-de-energia-eletrica-novas-fronteiras-de-desenvolvimento-da-fonte-solar/>>. Acesso em: 20 Maio 2025.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Mercado**, 2025. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 20 Maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5460:** Sistemas elétricos de potência.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações elétricas de baixa tensão.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039:** Instalações elétricas de média tensão de 1 kV a 36,2 kV.

BARBOSA, Claudomiro F. D. O. et al. CONCEITOS SOBRE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE. **VI Congresso Brasileiro de Energia Sola**, Belo Horizonte, Abril 2016.

BIOENERG Consultoria Ambiental. **O Sistema Elétrico.** Disponível em: <<https://bioenerg.com.br/blog-detalhes.php?id=2&titulo=O%2BSistema%2BEI%C3%A9trico>>. Acesso em: 15 Junho 2025.

BRASFORMER. **BPS 331**. Disponível em: <<https://brasformer.com.br/produto/bps-331/>>. Acesso em: 22 Junho 2025.

BRASFORMER. **BCS 34**. Disponível em: <<https://brasformer.com.br/produto/bcs-34/>>. Acesso em: 22 Junho 2025.

CAMPOS, Felipe M. et al. TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA SUPORTE À INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL. **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis, 23 a 27 maio 2022. 10.

CASARIN, Ricardo. Portal Solar. **Sistema BESS e o seu funcionamento junto à energia solar**, 2024. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/sistema-bess>>. Acesso em: 20 Maio 2025.

COMPROVE INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Tutorial de Teste de Relé de Proteção GE**.

DIAS, Hitchely G. Revista FT. **ANALISE COMPARATIVA ENTRE A TRANSMISSÃO EM CORRENTE ALTERNADA E CORRENTE CONTÍNUA**, 2023. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/analise-comparativa-entre-a-transmissao-em-corrente-alternada-e-corrente-continua/>>. Acesso em: 24 Agosto 2025.

ELÉTRICA BRASILTEC. Blco de Afericao para 3Tc. Disponível em: <<https://brasiltec.ind.br/oferta/1169301/bloco-de-afericao-para-3tc?srsId=AfmBOoq5HLlg5U7lyQMFprD5hEjHLSJYq-zjOmtauSpdT1y8UaBLfiKp>>. Acesso em: 09 Julho 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes de Energia**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#:~:text=S%C3%A3o%20exemplos%20de%20fontes%20renov%C3%A1veis,das%20mar%C3%A9s%20e%20das%20ondas>>. Acesso em: 21 Maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2024**. MME/EPE. Rio de Janeiro, p. 274. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. MME/EPE. Brasília, p. 579. 2024.

ENERGÊS. **Diferença entre Bateria e BESS**: Entenda de uma vez por todas, 2025. Disponível em: <https://energes.com.br/bateria-bess/?srsId=AfmBOoowhcajRCowd2Ja8F-gaObIS7_xuuRDIVA5wcweogIqc4oxRnud>. Acesso em: 22 Agosto 2025.

ENGEMAKRO. Cubículo de medição/proteção compartilhada de concessionárias. **Engemakro**, 2025. Disponível em: <https://engemakro.com.br/cubiculo_medicao_protecao_compartilhada.html>. Acesso em: 22 Junho 2025.

EPE. **Leilão dos Sistemas Isolados de 2025**: EPE publica Informe de Cadastramento dos Projetos, 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/leilao-dos-sistemas-isolados-de-2025-epe-publica-informe-de-cadastramento-dos-projetos>>. Acesso em: 11 Junho 2025.

FARCEL. Chave de Aferição de Embutir - BTE - 10 Polos. **Farcel**. Disponível em: <<https://www.farcel.com.br/bte/>>. Acesso em: 09 Julho 2025.

FILHO, João M. **Subestações de alta tensão**. 1ª. ed.

FILHO, João M.; MAMEDE, Daniel R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**.

FOLHA DE PERNAMBUCO. Chesf investe R\$ 33 milhões em subestação. **Folha de Pernambuco**, 2022. Disponível em: <<https://www.folhape.com.br/economia/chesf-investe-r-33-milhoes-em-subestacao/223263/>>. Acesso em: 16 Junho 2025.

FRAZÃO, Rodrigo J. A. **Proteção do sistema elétrico de potência**.

GANDRA, Gabriel. LinkedIn. **Eng. eletricista tem que saber: Quando se usa corrente contínua (HVDC) na transmissão?**, 2018. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/eng-eletricista-tem-que-saber-quando-se-usa-corrente-cont%C3%ADnua-gandra/>>. Acesso em: 24 Agosto 2025.

HISTÓRIA da eletricidade. **Mundo Educação**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/a-historia-eletricidade.htm>>. Acesso em: 17 Junho 2026.

HORNUNG, Felipe; MARCOS, Kussek. **ESTUDO E AJUSTES DO RELÉ DIGITAL PARA A PROTEÇÃO EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**.

IBERDROLA. **O que são sistemas de armazenamento de energia em bateria (BESS)?** Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/armazenamento-energia/bess>>. Acesso em: 10 Junho 2025.

INDUSTRIE24. Siemens 7SJ85 SIPROTEC 5 Überstromzeitschutz für industriellen Einsatz. Disponível em: <https://industrie24.com/products/siemens-7sj85-siprotec-5-uberstromzeitschutz-fur-industriellen-einsatz?srsId=AfmBOoqmw8ylcQe2TgVtgIWb_n_anMmqFcPgeOd5Hrcrfe3s5FGywu3y>. Acesso em: 09 Julho 2025.

JÚNIOR, Sebastião R. **Noções de Eletrotécnica - (TE039)**.

JURASZ, J. et al. **A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions**.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2ª. ed.

MAINFLAME Combustion Technology. **ENERGIAS RENOVÁVEIS; PRINCIPAIS BENEFÍCIOS PARA A INDÚSTRIA**. Disponível em: <<https://www.mainflame.com.br/blog/energias-renovaveis-principais-beneficios-para-industria/>>. Acesso em: 21 Maio 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. GOV BR. **Grande obra de tecnologia energética é destaque no Leilão de Transmissão**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/grande-obra-de-tecnologia-energetica-e-destaque-no-leilao-de-transmissao>>. Acesso em: 24 Agosto 2025.

MORAN ELÉTRICA LTDA. Seccionadoras Internas. Disponível em: <<https://www.moran.com.br/seccionadoras-internas-1.html>>. Acesso em: 22 Junho 2025.

NEOENERGIA. **Energia Eólica**. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/energia-eolica>>. Acesso em: 21 Maio 2025.

NOTÍCIAS Agrícolas. **Deputada federal propõe subcomissão sobre Transição Energética e COP 30 na Câmara**, 2025. Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/politica-agricola/400910-deputada-federal-propoe-subcomissao-sobre-transicao-energetica-e-cop-30-na-camara.html>>. Acesso em: 21 Maio 2025.

O que você Precisa Saber sobre subestações em Média Tensão. **Energês**, 2021. Disponível em: <<https://energes.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-subestacoes-em-media-tensao/>>. Acesso em: 03 Julho 2025.

OMICRON. CMC 356 - Equipamento de teste de relé e ferramenta de comissionamento universal. Disponível em: <<https://www.omicronenergy.com/pt/produtos/cmc-356/>>. Acesso em: 09 Julho 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **SOBRE O SIN - O SISTEMA EM NÚMEROS**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 15 Junho 2025.

PEREIRA, Enio B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2^a. ed.

PINHO, João T.; GALDINO, Marcos A. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**.

PORTAL Solar. **Entenda as diferenças entre GD compartilhada, remota, condominial e junto à carga**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/entenda-as-diferencas-entre-gd-compartilhada-remota-condominial-e-junto-a-carga>>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PRONEXT ENGENHARIA. Interpretação de Oscilografia – Análise de Perturbações. **LinkedIn**, 2024. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/interpreta%C3%A7%C3%A3o-de-oscilografia-an%C3%A1lise-perturba%C3%A7%C3%B5es-wxhvf/>>. Acesso em: 08 Julho 2025.

SANTOS, JOSÉ A. F. D. A.; TORRES, EDINILDO A. PANORAMA DAS USINAS HÍBRIDAS EÓLICO-SOLARES NO BRASIL, p. 5, Setembro 2021.

SIEMENS. **SIPROTEC 5 Overcurrent Protection 7SJ82/7SJ85 Manual**.

SIEMENS. Disjuntores à vácuo 3AH5. **SIEMENS**. Disponível em: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b49685e3-c378-44e0-9789-5304e8a92a96/catalogo-3ah5-pt.pdf>>. Acesso em: 22 Junho 2025.

SIEMENS. P1J874317. **Siemens**. Disponível em: <<https://mall.industry.siemens.com/mall/pt/pt/Catalog/Product/P1J874317>>. Acesso em: 01 Julho 2025.

SIEMENS. Siprotec Configurator. Disponível em: <<https://mall.industry.siemens.com/spicecad/sipom/#/spicecad/sipom/siprotecConfigurator>>. Acesso em: 09 Julho 2025.

SILVA, A. Subestação Abrigada: Conheça todos seus Aspectos mais Importantes. **PIXFORCE**, 2024. Disponível em: <<https://pixforce.ai/pt-br/subestacao-abrigada-conheca-caracteristicas/#:~:text=Disjuntores%20e%20seccionadores%20s%C3%A3o%20dispositivos,para%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20e%20outras%20opera%C3%A7%C3%B5es.>>>. Acesso em: 22 Junho 2025.

THÓRUS ENGENHARIA. Subestação de energia: como funciona e quando utilizar? **Thórus Blog**. Disponível em: <<https://thorusengenharia.com.br/subestacao-de-energia-como-funciona-e-quando-utilizar/>>. Acesso em: 22 Junho 2025.

TORRE de Iluminação Solar. **Sistema on-grid e off-grid**. Disponível em: <<https://torredeiluminacaosolar.com.br/wp-content/uploads/2024/02/sistema-on-grid-e-off-grid.webp>>. Acesso em: 10 jun. 2025.

WEG. Disjuntor a Vácuo de Média Tensão VBW. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-EI%C3%A9tricos/Disjuntores-a-V%C3%A1cuo/Disjuntor-a-V%C3%A1cuo-de-M%C3%A9dia-Tens%C3%A3o-VBW/Disjuntor-a-V%C3%A1cuo-de-M%C3%A9dia-Tens>>. Acesso em: 22 Junho 2025.