

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FEELT – FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VITOR MACEDO PELLOSI

**Uma Análise da Proteção de Sobrecorrente com Restrição por Tensão (51V) no Contexto
da Minigeração Distribuída**

Uberlândia

2026

JOÃO VITOR MACEDO PELLOSI

Uma Análise da Proteção de Sobrecorrente com Restrição por Tensão (51V) no Contexto da Minigeração Distribuída

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Aquino Barra

Uberlândia

2026

JOÃO VITOR MACEDO PELLOSI

Uma Análise da Proteção de Sobrecorrente com Restrição por Tensão (51V) no Contexto da Minigeração Distribuída

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Aquino Barra

Uberlândia, 06 de agosto de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Henrique Aquino Barra (UFU)

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim (UFU)

Prof. Me. Luiz Arthur Tarralo Passatuto (UFU)

Dedico este trabalho a todos que
tomaram uma cerveja comigo no **Arq.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelo dom da vida, que me proporcionou a oportunidade de realizar o curso com o qual sempre almejei, na universidade em que sempre sonhei estudar.

Aos meus pais, que plantaram a árvore para que eu pudesse estudar à sombra. À minha mãe, Jaine Lemes Pellosi Macedo, que sempre esteve ao meu lado, desde os momentos mais difíceis da pandemia até a minha formação, sendo minha cúmplice, apoiadora e fiel escudeira. Ao meu pai, José Macedo Júnior, que, durante todos esses anos, viajou inúmeras vezes para me buscar em Uberlândia. Agradeço também à minha família, especialmente às tias Beatriz e Divina, por todo o apoio oferecido.

À CONSELT – Empresa Júnior de Engenharia Elétrica, por ter me proporcionado a primeira oportunidade de conhecer o mundo profissional e despertado em mim o desejo de buscar um crescimento contínuo. Por meio dela, conheci a Extensão na UFU.

À disciplina de Sinais e Sistemas, pois a decisão de desistir dela, em agosto de 2022, permitiu que eu desse um passo para trás, me preparasse e, posteriormente, desse um grande salto para superar os desafios da vida universitária. Naquele momento, eu ainda não compreendia, mas, anos depois, percebi que a experiência mais desafiadora de toda a minha trajetória na UFU se tornou uma das principais razões da minha vitória.

Agradeço ao professor Gustavo Brito pela oportunidade de atuar como monitor. Por meio dessa experiência, conheci o Ensino na UFU.

Sou infinitamente grato ao professor José Rubens Macedo, que, na manhã de 9 de maio de 2023, convidou-me para fazer parte do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE), o que considero minha maior conquista dentro da Universidade. Por meio dessa oportunidade, conheci a Pesquisa na UFU.

Agradeço também pelos frutos que esse laboratório me proporcionou, especialmente pela amizade de Laila, Juliana, Pedro, Isabela e Leonardo.

Ao meu orientador, Pedro Henrique Aquino Barra, que, nos últimos meses, acompanhou o fim do meu estágio, dezenas de incertezas e, finalmente, a alegria de me ver ser contratado por uma multinacional ainda durante o período universitário.

A todos os bons momentos que vivi com a Associação Atlética Acadêmica das Engenharias da UFU (AAAE) e a todas as pessoas que conheci por meio dela.

Ao Arquibancada Sports Bar, por cada sentimento.

Aos meus amigos Lucas Pacheco, Guilherme Guido e Bruno Mendes, pela amizade e irmandade.

Por fim, registro todo o meu amor e carinho pela Universidade Federal de Uberlândia. Foi nela que, ao longo desses anos, **a vida aconteceu**.

João 16:33 – “Tenho-vos dito isto, para que em mim tenhais paz; no mundo tereis aflições, mas tende bom ânimo, **eu venci o mundo**”

RESUMO

A crescente inserção da minigeração distribuída nas redes de distribuição modifica o comportamento dos sistemas elétricos durante faltas e impõe novos desafios à proteção de sobrecorrente. Em instalações com fontes baseadas em inversores, a limitação da corrente fornecida pelos conversores pode dificultar a sensibilização das funções convencionais, tornando necessária a avaliação de alternativas que considerem outras grandezas elétricas. Nesse contexto, este trabalho analisa a aplicação da função ANSI 51V, proteção de sobrecorrente com restrição por tensão, em redes com geração distribuída conectada em média tensão. O estudo compreende a apresentação dos fundamentos das funções de proteção relacionadas ao acesso de centrais geradoras, a revisão da literatura sobre a utilização da 51V e a análise de documentos técnicos adotados por distribuidoras brasileiras. Além disso, foram realizadas simulações no MATLAB/Simulink para avaliar o comportamento da tensão e da corrente considerando diferentes condições faltosas, bem como a sensibilidade das funções 51 e 51V. Os resultados evidenciaram que a análise conjunta dessas grandezas permite caracterizar de forma mais abrangente as condições de falta. Nos casos em que a contribuição de corrente da geração permaneceu limitada, a função 51 convencional apresentou dificuldade de sensibilização, enquanto a restrição por tensão reduziu o limiar de atuação da 51V e possibilitou a identificação de condições não reconhecidas apenas pela sobrecorrente. Entretanto, sua resposta permaneceu dependente da intensidade do afundamento de tensão, das características da falta e dos ajustes adotados. Dessa forma, a função 51V mostrou-se uma alternativa complementar para aumentar a sensibilidade da proteção em redes com geração baseada em inversores, especialmente quando a corrente de falta é limitada pelos conversores. Entretanto, sua aplicação requer estudos específicos e coordenação com outras funções de proteção.

Palavras-chave: Proteção de sistemas elétricos; função ANSI 51V; minigeração distribuída; proteção de sobrecorrente; fontes baseadas em inversores.

ABSTRACT

The increasing integration of distributed minigeneration into distribution networks changes the behavior of power systems during faults and creates new challenges for overcurrent protection. In installations with inverter-based sources, the limitation of the current supplied by power converters may hinder the operation of conventional protection functions, requiring the assessment of alternatives that consider additional electrical quantities. In this context, this study analyzes the application of ANSI function 51V, voltage-restrained overcurrent protection, in networks with distributed generation connected at medium voltage. The study comprises an overview of the protection functions associated with the connection of generating facilities, a literature review concerning the application of function 51V, and an analysis of the technical documents adopted by Brazilian distribution utilities. Additionally, simulations were performed in MATLAB/Simulink to evaluate voltage and current behavior under different fault conditions, as well as the sensitivity of functions 51 and 51V. The results showed that the combined analysis of these quantities provides a more comprehensive characterization of fault conditions. In cases where the current contribution from the generating facility remained limited, conventional function 51 showed difficulty in reaching its operating threshold, whereas voltage restraint reduced the operating threshold of function 51V and enabled the identification of conditions not detected through overcurrent alone. Nevertheless, its response remained dependent on voltage-sag severity, fault characteristics, and the selected settings. Accordingly, function 51V proved to be a complementary alternative for improving protection sensitivity in networks with inverter-based generation, especially when fault current is limited by power converters. However, its application requires system-specific studies and coordination with other protection functions.

Keywords: Power system protection; ANSI function 51V; distributed minigeneration; overcurrent protection; inverter-based sources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva Função 50 – Sobrecorrente Instantânea	25
Figura 2 - Curvas IEC para a Função 51	28
Figura 3 - Curva Função 27 – Subtensão	35
Figura 4 - Curva Função 59 – Sobretensão	37
Figura 5 - Curva Função 81 – Frequência.....	39
Figura 6 - Curva Função 67 – Sobrecorrente Direcional	42
Figura 7 – Curva Função 51V – Restrição por Tensão.....	50
Figura 8 – Sistema fotovoltaico modelado.....	61
Figura 9 – Magnitude da tensão no PAC durante a falta trifásica temporária.....	64
Figura 10 – Tensões trifásicas instantâneas no PAC durante a falta trifásica.....	65
Figura 11 – Magnitude da corrente no PAC durante a falta temporária	66
Figura 12 – Correntes trifásicas no PAC durante a falta temporária	67
Figura 13 – Frequência no PAC durante a falta trifásica temporária	68
Figura 14 – Comportamento conjunto da tensão e da corrente no PAC.....	69
Figura 15 – Sistema equivalente de minigeração distribuída desenvolvido no MATLAB/Simulink ...	73
Figura 16 – Tensão RMS no PAC durante a falta trifásica.....	79
Figura 17 – Corrente RMS fornecida pela minigeração durante a falta trifásica	79
Figura 18 – Correntes instantâneas trifásicas fornecidas pela minigeração	80
Figura 19 – Tensões RMS no PAC durante a falta bifásica B–C	81
Figura 20 – Correntes RMS da minigeração durante a falta bifásica B–C	81
Figura 21 – Comparação das margens das funções 51 e 51V na falta bifásica	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constante das Curvas IEC para Relés de Sobrecorrente	27
Tabela 2 – Análise da citação da função 51V em normas técnicas de MMGD.....	31
Tabela 3 – Glossário (Proteção x Numeração ANSI).....	33
Tabela 4 – Parâmetros do sistema elétrico 1	62
Tabela 5 – Indicadores da resposta da tensão e da corrente	70
Tabela 6 – Sensibilidade da função 51 no Sistema elétrico 1.....	70
Tabela 7 – Principais parâmetros do sistema elétrico 2.....	74
Tabela 8 – Casos de faltas analisados no Sistema elétrico 2	75
Tabela 9 – Ajustes adotados para a avaliação das funções ANSI 51 e ANSI 51V	75
Tabela 10 – Avaliação das funções ANSI 51 e ANSI 51V nas faltas trifásicas	78
Tabela 11 – Avaliação das funções ANSI 51 e ANSI 51V nas faltas monofásicas	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
AMT	Ângulo de Máximo Torque
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
DT	Dial de Tempo
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
M	Múltiplo de Corrente
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ROCOF	<i>Rate of Change of Frequency</i>
SAEB	Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias
SI	Sistema Internacional de Unidades
TC	Transformador de Corrente
TMS	<i>Time Multiplier Setting</i>
TP	Transformador de Potencial
UC	Unidade Consumidora
var	<i>Volt-ampere reativo</i>
VR-OCR	<i>Voltage-Restrained Overcurrent Relay</i>
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Motivação e Justificativa	13
1.3	Objetivo	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Circuitos Elétricos de Potência e Proteção	15
2.1.1	Conceito	15
2.2	Relés de Proteção	15
2.2.1	Conceito	15
2.2.2	Fundamentos Matemáticos.....	16
2.2.3	Transformadores de Medição.....	17
2.3	Proteção de Sobrecorrente	17
2.3.1	Conceitos	17
2.3.2	Fundamentos Matemáticos.....	18
2.4	Classificação dos Relés de Sobrecorrente quanto à Grandeza Monitorada.....	19
2.4.1	Sobrecorrente de Fase (50/51)	20
2.4.2	Sobrecorrente de Neutro (50N/51N)	20
2.5	Função 50 – Sobrecorrente Instantânea	21
2.5.1	Conceito.....	21
2.5.2	Fundamentos Matemáticos.....	22
2.5.3	Análise da Função 50	22
2.5.4	Considerações Operacionais.....	23
2.6	Função 51 – Sobrecorrente Temporizada	25
2.6.1	Conceito.....	25
2.6.2	Fundamentos Matemáticos.....	25
2.6.3	Curvas Padronizadas – Ênfase no padrão IEC	26
2.6.4	Tipos de Curvas IEC	27
2.6.5	Considerações Operacionais.....	28
2.7	Panorama normativo: exigência da função 51V em documentos de acesso à GD/MMGD	30
2.7.1	Metodologia do Levantamento.....	30
2.7.2	Resultados do Levantamento.....	31
2.7.3	Discussão e implicação para o estudo da Proteção 51V	33

2.8	Funções de proteção recorrentes em pareceres de acesso	34
2.8.1	Função 27 – Subtensão.....	34
2.8.2	Função 59 – Sobretensão.....	36
2.8.3	Função 81 – Proteção de Frequência	37
2.8.4	Função 67 – Sobrecorrente Direcional	40
2.9	Função 51V – Sobrecorrente com Restrição por Tensão.....	44
2.9.1	Conceito.....	44
2.9.2	Modalidades clássicas associadas à função: 51C e 51V.....	44
2.9.3	Fundamentos Matemáticos.....	47
2.9.4	Análise da função 51V.....	50
2.9.5	Considerações Operacionais.....	51
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	52
3.1	Considerações Iniciais	52
3.2	Função 51V: fundamentos e aplicações gerais	52
3.3	Aplicações da função 51V em geradores síncronos	53
3.4	Aplicações da função 51V em sistemas com geração distribuída.....	54
3.5	Coordenação de proteção em sistemas com GD e MMGD	56
3.6	Análise crítica da literatura	57
3.7	Considerações finais do capítulo	58
4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO	59
4.1	Considerações iniciais.....	59
4.2	Organização das simulações computacionais.....	60
4.3	Sistema elétrico 1 — modelo adaptado da MathWorks	60
4.3.1	Modelagem do sistema elétrico 1.....	60
4.3.2	Parâmetros do sistema elétrico 1.....	62
4.3.3	Casos de faltas analisados.....	63
4.3.4	Resultados e avaliação das funções 51 e 51V	63
4.4	Sistema elétrico 2 — modelo equivalente de minigeração distribuída	72
4.4.1	Desenvolvimento e modelagem do sistema elétrico 2	72
4.4.2	Parâmetros do sistema elétrico 2.....	73
4.4.3	Casos de faltas analisados.....	74
4.4.4	Resultados e avaliação das funções 51 e 51V	75
4.5	Análise comparativa dos sistemas elétricos.....	83
4.6	Considerações finais do capítulo	85
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87

REFERÊNCIAS 89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os circuitos elétricos de média tensão desempenham papel fundamental na distribuição de energia elétrica, sendo responsáveis por interligar as subestações aos consumidores finais do setor industrial, comercial ou residencial. Para garantir a continuidade do fornecimento, a integridade dos equipamentos e a segurança da população, torna-se indispensável a aplicação de esquemas de proteção adequados, capazes de identificar e isolar defeitos de forma rápida, seletiva e confiável.

Historicamente, a proteção de sistemas elétricos foi desenvolvida predominantemente com base na medição da corrente elétrica, uma vez que os defeitos estão diretamente associados ao aumento significativo dessa grandeza. Funções de sobrecorrente, como as proteções instantâneas e temporizadas, consolidaram-se como soluções amplamente difundidas devido à sua simplicidade, robustez e eficiência em sistemas radiais convencionais. Nesse contexto, critérios como seletividade, velocidade, confiabilidade e coordenação passaram a nortear o projeto e a operação dos esquemas de proteção ao longo da cadeia de distribuição.

Entretanto, nas últimas décadas, os circuitos elétricos de distribuição têm se tornado progressivamente mais complexos. A expansão da carga, a diversificação dos perfis de consumo e, sobretudo, a crescente inserção de fontes de micro e minigeração distribuída vêm alterando de forma significativa o comportamento elétrico das redes. Impulsionado por avanços tecnológicos, pela redução dos custos das fontes renováveis e por incentivos regulatórios, esse crescimento tem modificado o modelo tradicional de operação das redes de distribuição, historicamente caracterizadas por fluxo de potência unidirecional e geração centralizada.

A presença de unidades geradoras distribuídas introduz novos desafios técnicos à operação dos circuitos de média tensão, especialmente no que se refere à coordenação e à seletividade das proteções. A coexistência de múltiplas fontes de curto-circuito, as variações nos níveis de tensão durante contingências e a possibilidade de fluxos reversos de potência impactam diretamente o desempenho dos esquemas clássicos de proteção baseados exclusivamente em sobrecorrente, como as funções 50 e 51, originalmente concebidas para circuitos com fonte única de suprimento.

Diante desse novo cenário operacional, as concessionárias de distribuição passaram a adotar critérios mais rigorosos nos processos de análise e emissão dos Pareceres de Acesso, visando assegurar a confiabilidade do circuito, a segurança das instalações e a qualidade do

fornecimento de energia elétrica. Esses processos demandam estudos cada vez mais aprofundados de curto-circuito, coordenação de proteção e avaliação do comportamento do circuito frente à conexão de novas fontes de geração distribuída. Em adição, verifica-se que as distribuidoras de energia elétrica exigem funções variadas de proteção de modo a garantir que todas as possibilidades de falta estejam cobertas pela proteção.

Nesse contexto, compreender os princípios fundamentais da proteção de circuitos elétricos, bem como os principais tipos de defeitos e seus impactos sobre as grandezas elétricas envolvidas, torna-se essencial para a análise crítica dos esquemas atualmente empregados. Essa compreensão fornece a base necessária para a identificação das limitações das proteções convencionais e para o estudo de soluções mais adequadas às exigências impostas pelos circuitos elétricos modernos. Entre essas soluções, **destaca-se a proteção de sobrecorrente com restrição por tensão, conhecida como função 51V**, cuja aplicação pode ampliar a sensibilidade da proteção em situações específicas envolvendo minigeração distribuída baseada em inversores e conectada aos circuitos de média tensão.

1.2 Motivação e Justificativa

O crescimento da minigeração distribuída no Brasil tem imposto novos desafios técnicos aos circuitos elétricos de média tensão, especialmente no que se refere à proteção e à coordenação seletiva dos dispositivos. Nesse contexto, os processos de análise e emissão dos Pareceres de Acesso pelas concessionárias passaram a demandar estudos mais detalhados, destinados a avaliar os impactos da conexão de novas fontes de geração sobre a segurança, a confiabilidade e a seletividade dos sistemas de proteção.

Historicamente, as funções de sobrecorrente foram amplamente empregadas em circuitos radiais convencionais, caracterizados por uma única fonte de suprimento e pelo fluxo predominantemente unidirecional de potência. Na maioria das aplicações, essas funções permanecem suficientes, além de apresentarem como vantagem a possibilidade de operação sem a utilização de transformadores de potencial. Entretanto, a inserção de fontes de minigeração distribuída baseadas em inversores pode alterar o comportamento das grandezas elétricas durante determinadas condições de falta. Nesses casos, a contribuição de corrente da unidade geradora pode permanecer limitada a valores próximos de sua corrente nominal, reduzindo a sensibilidade da função 51 convencional, mesmo diante de um afundamento significativo de tensão.

Para essas aplicações específicas, a função de sobrecorrente com restrição por tensão (51V) pode ser empregada de maneira complementar à proteção de sobrecorrente convencional. Ao considerar simultaneamente a corrente e a tensão, a função reduz seu limiar efetivo de atuação durante afundamentos de tensão, aumentando a possibilidade de identificação de condições faltosas nas quais somente a corrente não seria suficiente para sensibilizar a proteção. Sua aplicação, contudo, não representa uma evolução ou substituição generalizada da função 51, mas uma alternativa adicional para situações em que as características da geração e da rede justificam maior sensibilidade.

Sob o ponto de vista normativo, os requisitos aplicáveis à conexão da minigeração distribuída são estabelecidos pelos procedimentos regulatórios do setor e complementados pelas normas técnicas das concessionárias. A análise desses documentos demonstra que a adoção da função 51V não ocorre de maneira uniforme, podendo variar de acordo com as características da instalação, a potência da geração, o nível de tensão e os critérios próprios de cada distribuidora. Essa diversidade reforça a necessidade de compreender os fundamentos técnicos que justificam sua solicitação, evitando que a função seja incorporada aos projetos apenas como uma exigência formal.

Dessa forma, este trabalho é motivado e justificado pela necessidade de aprofundar o estudo da função 51V no contexto da minigeração distribuída conectada aos circuitos de média tensão, considerando seus fundamentos, critérios de ajuste e desempenho diante de diferentes condições de falta. Busca-se, assim, contribuir para uma compreensão mais clara das situações em que a proteção de sobrecorrente convencional é suficiente, daquelas em que a 51V pode ampliar sua sensibilidade e, também, dos casos em que a restrição por tensão não assegura a sensibilização da proteção.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar, sob os pontos de vista técnico, normativo e aplicado, a utilização da proteção de sobrecorrente com restrição por tensão (função 51V) em circuitos elétricos de média tensão com presença de minigeração distribuída baseada em inversores. Busca-se avaliar as condições em que essa função pode complementar a proteção de sobrecorrente convencional, considerando seus fundamentos, critérios de ajuste, desempenho diante de diferentes condições de falta e presença nos documentos técnicos das concessionárias de distribuição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Circuitos Elétricos de Potência e Proteção

2.1.1 Conceito

Os circuitos elétricos de potência são responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo projetados para operar dentro de limites técnicos definidos pela tensão, corrente e frequência. Para garantir a segurança operacional, a continuidade do fornecimento e a integridade dos equipamentos, esses circuitos devem ser protegidos contra condições anormais de operação, como curtos-circuitos, sobrecargas e faltas.

A proteção elétrica consiste em um conjunto coordenado de dispositivos capazes de detectar falhas, isolar o trecho defeituoso e minimizar os impactos sobre o restante do circuito. Em redes de distribuição, historicamente radiais, a proteção de sobrecorrente sempre foi amplamente utilizada devido à sua simplicidade, robustez e custo reduzido.

2.2 Relés de Proteção

2.2.1 Conceito

Os relés de proteção são dispositivos responsáveis por monitorar continuamente grandezas elétricas do circuito, como corrente, tensão, frequência, potência e seus respectivos ângulos de fase, com o objetivo de identificar condições anormais de operação e atuar de forma seletiva e coordenada. Sua função principal é detectar faltas ou distúrbios elétricos e emitir comandos de abertura aos disjuntores associados, isolando o trecho defeituoso e preservando a integridade dos demais elementos do circuito.

Sob o ponto de vista funcional, o relé de proteção pode ser interpretado como um sistema de decisão automática baseado na comparação entre grandezas medidas e valores de referência previamente ajustados. Quando a condição de disparo é satisfeita, seja por ultrapassagem de corrente, queda de tensão ou desvio de frequência, o relé envia um sinal elétrico ao circuito de comando do disjuntor, promovendo a interrupção da corrente de falta em tempos compatíveis com os limites térmicos e estruturais dos equipamentos envolvidos.

Além da função de desligamento, os relés modernos desempenham papel fundamental na supervisão do circuito, registrando eventos, armazenando formas de onda e permitindo análises pós-falta. Essa capacidade contribui significativamente para estudos de coordenação e avaliação do desempenho da proteção.

Historicamente, os primeiros relés eram do tipo eletromecânico, baseados em princípios magnéticos e mecânicos, como discos de indução e bobinas móveis. Posteriormente, surgiram os relés estáticos, que utilizavam componentes eletrônicos analógicos. Atualmente, predominam os relés digitais, que realizam a aquisição das grandezas por meio de conversores analógico-digitais (A/D) e executam algoritmos matemáticos para cálculo de valores eficazes, ângulos e componentes simétricas.

2.2.2 Fundamentos Matemáticos

O relé executa uma função de decisão baseada na comparação entre grandezas medidas e valores de referência previamente ajustados.

De forma geral, a lógica de atuação pode ser representada por:

$$\text{Atuação} = \begin{cases} 1, & \text{se } F(X_{\text{medido}}) \geq X_{\text{ajuste}} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- $F(x)$ = Função característica do relé;
- X_{ajuste} = Valor de pick-up configurado;
- X_{medido} = Grandeza monitorada.

No caso dos relés de sobrecorrente, que serão abordados posteriormente, a variável monitorada é a corrente eficaz (RMS), calculada a partir da forma de onda instantânea:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2)$$

Onde:

- I_{rms} = Valor eficaz (RMS) da corrente no intervalo de análise (A);
- T = Período de Integração (s);
- $i(t)$ = Corrente Instantânea (A).

2.2.3 Transformadores de Medição

As medições realizadas nos relés de proteção são obtidas por meio dos transformadores de corrente (TCs), cuja relação de transformação é dada por:

$$I_s = \frac{I_p}{RTC} \quad (3)$$

Onde:

- I_p = Corrente Primária (A);
- I_s = Corrente Secundária (A);
- RTC = Relação de Transformação do TC.

Assim, os ajustes do relé são feitos no lado secundário, mas referenciados à corrente primária equivalente.

2.3 Proteção de Sobrecorrente

2.3.1 Conceitos

Os relés de sobrecorrente constituem uma das formas mais tradicionais e amplamente empregadas de proteção em circuitos de distribuição e transmissão de energia elétrica. Seu princípio de funcionamento baseia-se na detecção de correntes superiores aos níveis normais de operação, assumindo que condições de falta resultam em elevação significativa da corrente elétrica.

Esses dispositivos são amplamente utilizados devido à sua simplicidade de aplicação, robustez operacional e facilidade de coordenação em circuitos radiais. Em sistemas convencionais de distribuição, onde o fluxo de potência é predominantemente unidirecional, os

relés de sobrecorrente apresentam desempenho satisfatório e permitem seletividade adequada por meio de ajustes temporais.

2.3.2 Fundamentos Matemáticos

O relé de sobrecorrente é um dispositivo cuja função é monitorar continuamente o valor eficaz da corrente elétrica e comparar esse valor com um nível de referência previamente ajustado, denominado corrente de pick-up ($I_{pick-up}$).

A lógica fundamental de operação pode ser expressa como:

$$\text{Atuação} = \begin{cases} 1, & \text{se } I \geq I_{pick-up} \\ 0, & \text{se } I < I_{pick-up} \end{cases} \quad (4)$$

Onde:

- I = Corrente medida pelo relé (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente de Ajuste (A).

Define-se ainda o múltiplo de corrente como:

$$M = \frac{I}{I_{PICKUP}} \quad (5)$$

Onde:

- M = Múltiplo de corrente;
- I = Corrente medida (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente de Ajuste (A).

O parâmetro M é essencial para a determinação do tempo de atuação nos relés temporizados. Os relés de sobrecorrente podem ser classificados, quanto ao modo de atuação, em Relés Instantâneos (Função 50 – ANSI) e Relés Temporizados (Função 51 – ANSI).

A operação do relé baseia-se na medição do valor eficaz (RMS), relacionado na Equação (2), o uso do valor RMS justifica-se pelo fato de que os efeitos térmicos e eletrodinâmicos das correntes de falta estão diretamente associados ao valor quadrático médio da corrente.

A partir da definição do múltiplo de corrente pode-se definir os diferentes comportamentos temporais do relé. De forma geral, o tempo de atuação pode ser descrito como uma função do múltiplo de corrente:

$$t = f(M) \quad (6)$$

Sendo que para relés instantâneos:

$$t \approx 0 \text{ se } M \geq 1$$

Para os relés temporizados de tempo inverso, tem-se:

$$t = TMS \cdot \frac{\beta}{M^\alpha - 1} \quad (7)$$

Onde:

- t = Tempo de atuação (s);
- TMS = Time multiplier setting (Dial de Tempo);
- β e α = Constantes da curva característica;
- M = Múltiplo de corrente.

Essa formulação matemática permite a coordenação seletiva entre dispositivos ao longo do circuito, uma vez que faltas mais severas (maior M) resultam em tempos de atuação menores.

2.4 Classificação dos Relés de Sobrecorrente quanto à Grandeza Monitorada

Os relés de sobrecorrente podem ser classificados, além do modo de atuação (instantâneo ou temporizado), de acordo com a grandeza elétrica supervisionada. Em circuitos trifásicos, essa classificação assume especial relevância, uma vez que as faltas podem envolver condutores de fase ou o caminho de retorno à terra.

Assim, distinguem-se duas categorias principais de proteção de sobrecorrente: a proteção de fase e a proteção de neutro. Essa diferenciação é fundamental para a adequada detecção de faltas assimétricas, especialmente em circuitos de distribuição, onde predominam faltas monofásicas à terra.

2.4.1 Sobrecorrente de Fase (50/51)

A proteção de fase é responsável por monitorar individualmente as correntes das três fases do circuito, representadas por I_a , I_b e I_c . Sua atuação ocorre quando a corrente de qualquer uma das fases ultrapassa o valor de pick-up ajustado.

A condição de atuação pode ser representada por:

$$I_{fase} \geq I_{pick-up}$$

Onde:

- I_{fase} = Corrente eficaz de uma das fases do circuito (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente mínima ajustada para atuação da proteção (A).

Em termos operacionais:

$$Atuação = (I_A \geq I_{pick-up}) \vee (I_b \geq I_{pick-up}) \vee (I_c \geq I_{pick-up}) \quad (8)$$

2.4.2 Sobrecorrente de Neutro (50N/51N)

A proteção de neutro, também denominada proteção residual ou de terra, é responsável por detectar correntes de sequência zero associadas a faltas monofásicas à terra.

A corrente residual pode ser obtida pela soma fasorial das correntes de fase:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (9)$$

Em termos de componentes simétricas, tem-se:

$$I_N = 3I_0 \quad (10)$$

Onde:

- I_N = Corrente residual ou de neutro (A);
- I_0 = Componente de sequência zero da corrente (A).

Em condições normais de operação, em um circuito equilibrado, a soma vetorial das correntes de fase é aproximadamente nula, resultando em corrente residual desprezível. Contudo, na ocorrência de uma falta à terra, surge componente de sequência zero, elevando o valor de I_N e possibilitando a atuação da proteção.

A condição de atuação é dada por:

$$I_N \geq I_{pick-up,N}$$

Onde:

- I_N = Corrente residual ou de neutro (A);
- $I_{pick-up,N}$ = valor de pick-up ajustado para a proteção de neutro (A).

A distinção entre proteção de fase e proteção de neutro é particularmente relevante em redes de distribuição, nas quais as faltas monofásicas à terra representam a maior parcela dos eventos registrados. A proteção de neutro permite maior sensibilidade para esse tipo de ocorrência, uma vez que a corrente residual pode ser significativamente inferior às correntes de fase observadas em faltas trifásicas.

Além disso, em circuitos com presença de geração distribuída, a contribuição de corrente de sequência zero pode ser alterada em função do tipo de conexão dos geradores e do regime de aterramento do circuito, influenciando diretamente o desempenho das funções 50N e 51N.

2.5 Função 50 – Sobrecorrente Instantânea

2.5.1 Conceito

A função 50 corresponde à proteção de sobrecorrente instantânea, caracterizada pela ausência de temporização intencional. Sua atuação ocorre assim que a corrente medida ultrapassa o valor de pick-up previamente ajustado, sendo limitada apenas pelo tempo interno de processamento do relé e pelo tempo mecânico de abertura do disjuntor.

Diferentemente das funções temporizadas, a função 50 não estabelece relação funcional entre o tempo de atuação e a magnitude da corrente. Sua lógica é puramente comparativa.

2.5.2 Fundamentos Matemáticos

A condição fundamental de atuação é dada por:

$$I \geq I_{pick-up}$$

Onde:

- I = Corrente eficaz medida pelo relé (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente mínima ajustada para atuação (A).

O tempo de operação pode ser representado por:

$$t_{50} = \begin{cases} t_{proc} + t_{abertura}, & \text{se } I \geq I_{pick-up} \\ \infty, & \text{se } I < I_{pick-up} \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

- t_{proc} = Tempo interno de processamento do relé (s);
- t_{abert} = Tempo mecânico de abertura do disjuntor (s).
- ∞ = Condição de não-atuação.

Na prática, o tempo total de eliminação da falta é:

$$t_{eliminação} = t_{detecção} + t_{proc} + t_{abertura}$$

Como não há multiplicador de tempo nem curva inversa associada, o tempo de atuação permanece aproximadamente constante para qualquer valor de corrente acima do pick-up.

2.5.3 Análise da Função 50

A função 50 apresenta maior efetividade em faltas localizadas próximas à fonte de alimentação, onde a impedância equivalente do circuito até o ponto de falta é reduzida. Nessas

condições, a corrente de curto-circuito assume valores elevados, aumentando significativamente o múltiplo de corrente em relação ao valor de pick-up ajustado, que deve satisfazer duas condições fundamentais:

Não atuar para correntes de carga máxima:

$$I_{pick-up} > I_{carga_máx}$$

Atuar para a menor corrente de curto-circuito interno prevista:

$$I_{pick-up} < I_{cc_mín_interno}$$

Portanto, o ajuste ideal deve obedecer:

$$I_{carga_máx} < I_{pick-up} < I_{cc_mín_interno}$$

Essa condição garante segurança operacional e sensibilidade adequada. Considerando a corrente de curto-circuito trifásico aproximada por:

$$I_{cc} = \frac{V_{pré-falta}}{Z_{eq}} \quad (12)$$

Onde:

- I_{cc} = Corrente de Curto-Circuito (A);
- Z_{eq} = Impedância equivalente vista do ponto de falta (Ω);
- $V_{pré-falta}$ = Tensão no instante imediatamente anterior à falta (V).

Verifica-se que, quanto menor a impedância do circuito até o ponto de ocorrência da falta, maior será a corrente resultante. Em situações nas quais $I_{cc} \gg I_{pick-up}$, a atuação da função 50 ocorre praticamente de forma imediata, limitando os esforços térmicos nos condutores e os esforços eletrodinâmicos nos equipamentos de manobra.

2.5.4 Considerações Operacionais

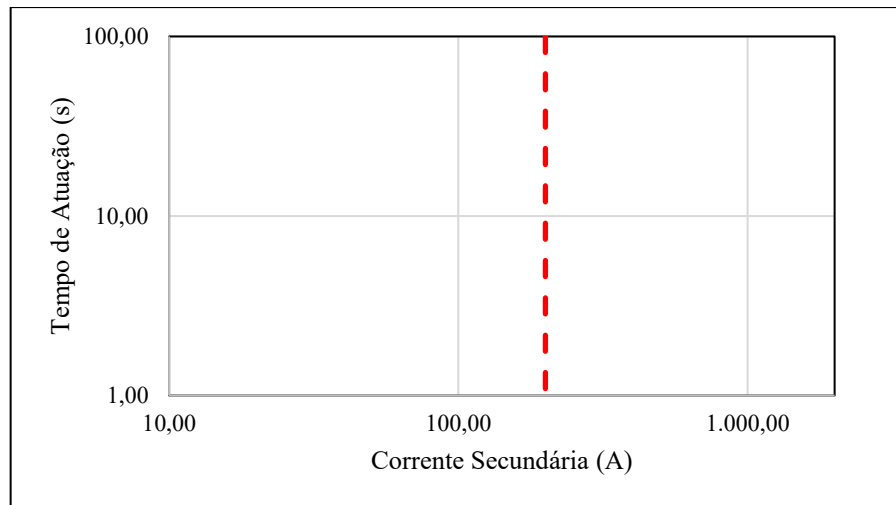
A principal característica da função 50 é sua elevada rapidez de atuação, o que a torna particularmente eficiente na eliminação de faltas severas e próximas ao ponto de instalação do relé. Ao interromper a corrente em intervalos muito curtos, reduz-se significativamente o aquecimento dos condutores e os esforços mecânicos nos enrolamentos de transformadores e máquinas elétricas, contribuindo para o aumento da vida útil dos equipamentos.

Entretanto, essa mesma característica implica limitações relevantes sob o ponto de vista da coordenação seletiva. Como não há temporização intencional associada à magnitude da corrente, a função 50 não permite gradação temporal entre dispositivos em série ao longo do circuito. Assim, seu ajuste deve ser cuidadosamente definido para que o valor de pick-up seja superior à corrente máxima de carga e inferior à menor corrente de curto-circuito interna prevista, evitando tanto atuações indevidas quanto falhas na detecção de faltas reais.

Além disso, em circuitos extensos ou com elevada impedância equivalente, as correntes de curto-circuito podem assumir valores reduzidos, aproximando-se da corrente de carga. Nesses casos, a margem de ajuste do pick-up torna-se limitada, comprometendo a sensibilidade da função 50. Essa situação é ainda mais crítica em circuitos com inserção de geração distribuída, nos quais os níveis de curto-circuito podem ser alterados em função da contribuição dos geradores conectados. A redução da corrente de falta percebida pelo relé pode inviabilizar a atuação da função 50 para determinadas condições, exigindo a utilização de estratégias complementares de proteção, como funções temporizadas ou supervisionadas por tensão.

A função de sobrecorrente instantânea possui um comportamento típico apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Curva Função 50 – Sobrecorrente Instantânea



Fonte: Elaborado pelo autor.

No exemplo foi selecionado o parâmetro para corrente de pick-up (I_{pickup}) de 200 A. É possível observar no eixo das abscissas que para valores maiores que o ajustado existe uma atuação constante, respeitando a equação (11).

2.6 Função 51 – Sobrecorrente Temporizada

2.6.1 Conceito

A função 51 corresponde à proteção de sobrecorrente temporizada, caracterizada pela introdução de uma temporização intencional associada à magnitude da corrente medida. Diferentemente da função 50, cuja atuação ocorre de forma praticamente instantânea após a superação do valor de pick-up, a função 51 estabelece uma relação funcional entre o tempo de atuação e o múltiplo de corrente. Essa característica permite a coordenação seletiva entre dispositivos de proteção instalados ao longo do circuito, sendo amplamente empregada em circuitos radiais de distribuição.

2.6.2 Fundamentos Matemáticos

A função 51 baseia-se na comparação entre a corrente eficaz medida e o valor de pick-up ajustado, tal como na função 50. Entretanto, a atuação não ocorre imediatamente após a

superação do limite, sendo introduzido um tempo de retardo calculado em função do múltiplo de corrente.

Define-se o múltiplo de corrente como:

$$M = \frac{I}{I_{PI CKUP}} \quad (5)$$

Onde:

- M = Múltiplo de corrente;
- I = Corrente medida (A);
- $I_{pi ckup}$ = Corrente de Ajuste (A).

A condição básica de atuação é:

$$M \geq 1$$

Entretanto, o tempo de disparo será determinado por uma curva característica inversa.

2.6.3 Curvas Padronizadas – Ênfase no padrão IEC

As características dos relés de sobrecorrente temporizados são definidas por normas técnicas internacionais, sendo as mais utilizadas os padrões IEC (International Electrotechnical Commission) e ANSI/IEEE (American National Standards Institute / Institute of Electrical and Electronics Engineers).

O padrão IEC 60255 define curvas matemáticas com expressão analítica explícita, permitindo que o tempo de atuação seja determinado diretamente por equação. Essa abordagem facilita estudos de coordenação e implementação computacional em softwares de análise de proteção.

Em sistemas de distribuição brasileiros, observa-se predominância da padronização IEC, especialmente em estudos acadêmicos e projetos recentes de concessionárias.

No padrão IEC, o tempo de atuação da função 51 é definido por:

$$t = TMS \cdot \frac{\beta}{M^\alpha - 1} \quad (13)$$

Onde:

- t = Tempo de atuação (s);
- TMS = Time multiplier setting (Dial de Tempo);
- β e α = Constantes da curva característica;
- M = Múltiplo de corrente = $\frac{I}{I_{pick-up}}$.

2.6.4 Tipos de Curvas IEC

A norma IEC estabelece diferentes níveis de inversão temporal, permitindo adequação às características do circuito protegido.

Tabela 1 – Constante das Curvas IEC para Relés de Sobrecorrente

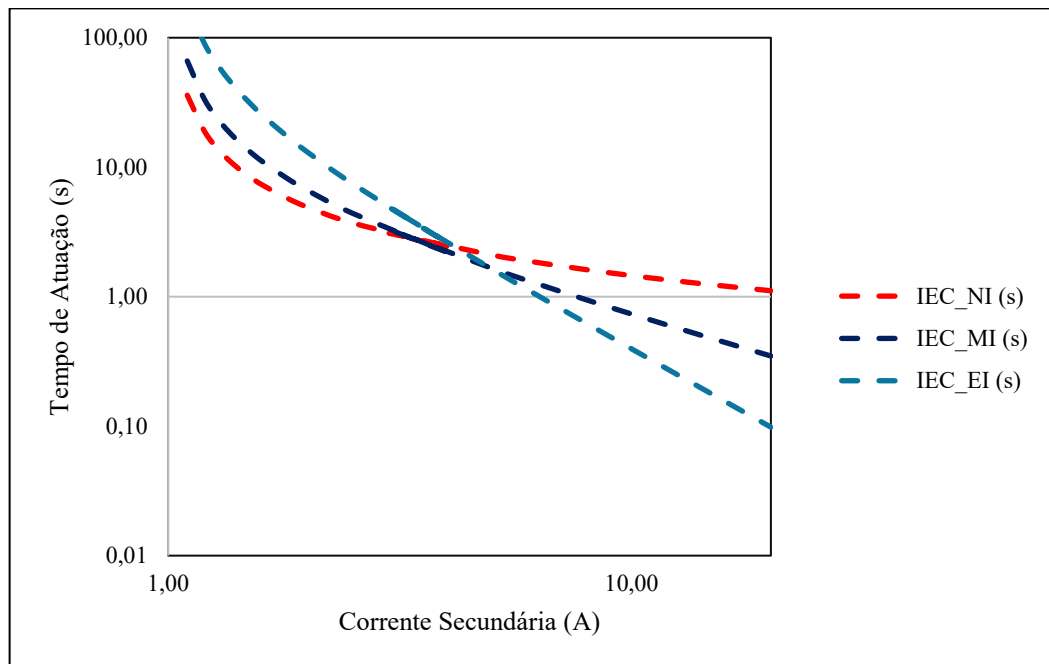
Tipo de Curva	β	α
Normalmente Inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,5	1
Extremamente Inversa	80	2

Fonte: IEC 60255-151 (2009)

A escolha da curva depende da característica do circuito e do comportamento esperado das correntes de falta. Em circuitos com forte variação entre corrente mínima e máxima de curto-circuito, curvas mais inversas podem proporcionar melhor coordenação seletiva. Já em circuitos com menor variação de corrente, curvas normalmente inversas tendem a oferecer desempenho satisfatório. A correta seleção da curva IEC é etapa essencial no estudo de coordenação e será particularmente relevante na análise da função 51V, na qual o valor efetivo de pick-up pode variar em função da tensão medida.

A função de sobrecorrente temporizada possui um comportamento como ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Curvas IEC para a Função 51



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- IEC_{NI} = Curva Normalmente Inversa;
- IEC_{MI} = Curva Muito Inversa;
- IEC_{EI} = Curva Extremamente Inversa.

Observa-se que as curvas apresentam comportamento inverso em função da corrente, de modo que o tempo de atuação decresce à medida que M aumenta. Nota-se ainda que as curvas com maior grau de inversão reduzem o tempo de atuação mais acentuadamente para elevados múltiplos de corrente, característica que influencia diretamente a coordenação e a seletividade entre dispositivos a montante e a jusante no circuito.

2.6.5 Considerações Operacionais

A aplicação da função 51 em circuitos de distribuição exige atenção especial aos critérios de ajuste, pois a atuação temporizada deve conciliar simultaneamente sensibilidade, seletividade e robustez frente às variações operacionais do circuito. Em termos práticos, os dois parâmetros centrais do ajuste são a corrente de pick-up, responsável por definir o patamar mínimo a partir do qual a proteção passa a supervisionar a condição de sobrecorrente, e o

parâmetro temporal (TMS), responsável por deslocar a curva característica no eixo do tempo, definindo a rapidez relativa de atuação.

O valor de pick-up deve ser definido de modo a evitar atuações indevidas em regime normal e, ao mesmo tempo, garantir sensibilidade suficiente para faltas internas relevantes. Assim, é comum que o ajuste seja escolhido acima das correntes máximas de carga e de eventuais transitórios esperados, preservando margem operacional. Entretanto, em alimentadores extensos ou com variação significativa do nível de curto-circuito ao longo do sistema, a corrente mínima de falta pode se aproximar de valores relativamente baixos, reduzindo a margem disponível para ajuste e tornando o compromisso entre segurança e sensibilidade mais crítico.

Além disso, o ajuste do TMS atua como um fator de ponderação temporal, permitindo que curvas de mesmo tipo (por exemplo, IEC normalmente inversa, destacada em vermelho na Figura 2 - Curvas IEC para a Função 51) apresentem atuações mais rápidas ou mais lentas sem alterar o patamar de pick-up. Esse recurso é essencial para coordenação seletiva entre dispositivos em série, pois possibilita estabelecer uma hierarquia de tempo ao longo do circuito: dispositivos a jusante devem atuar primeiro para faltas próximas a suas zonas de proteção, enquanto dispositivos a montante devem possuir tempos maiores, operando como retaguarda. Novamente, a *Figura 2* ilustra o comportamento típico das curvas IEC, evidenciando que o tempo de atuação decresce com o aumento do múltiplo de corrente, característica fundamental para seletividade em sistemas radiais.

A escolha do tipo de curva IEC também influencia a coordenação. Curvas com maior grau de inversão tendem a reduzir mais rapidamente o tempo de atuação para múltiplos elevados de corrente, sendo frequentemente adequadas quando se deseja atuação mais rápida para faltas severas, mantendo seletividade para correntes mais próximas do pick-up. Em contrapartida, a seleção inadequada da curva pode prejudicar a coordenação com dispositivos a jusante, especialmente quando estes apresentam curvas ou tempos característicos diferentes (como os fusíveis e religadores), demandando avaliação criteriosa em estudos de coordenação.

Por fim, deve-se considerar que a eficácia da função 51 depende diretamente da magnitude da corrente de falta observada pelo relé, através dos instrumentos de medição, comentados no tópico 2.2.3 deste trabalho. Em condições em que a corrente de curto-circuito é reduzida, seja por elevada impedância até o ponto de falta ou algum outro motivo, a atuação pode tornar-se lenta ou até não ocorrer, dependendo do ajuste de pick-up. Esse aspecto torna-se ainda mais relevante em circuitos com presença de geração distribuída, nos quais os níveis de curto-circuito podem ser alterados e o perfil de correntes durante faltas pode se modificar.

Dessa forma, embora a função 51 permaneça amplamente utilizada pela sua capacidade de coordenação temporal, as limitações associadas à sensibilidade em cenários de correntes reduzidas justificam a adoção de técnicas complementares, justificando o avanço e desenvolvimento da função 51V, em que a tensão passa a atuar como variável auxiliar para aprimorar o desempenho da proteção.

2.7 Panorama normativo: exigência da função 51V em documentos de acesso à GD/MMGD

A inserção de MGD vem impondo desafios adicionais à proteção dos circuitos de distribuição, sobretudo em média tensão, devido à possibilidade de redução das correntes de falta percebidas por esquemas tradicionais de sobrecorrente. Nesse contexto, a função 51V (sobrecorrente temporizada com restrição por tensão) é frequentemente utilizada como estratégia para aumentar sensibilidade sob subtensão durante faltas. Assim, torna-se relevante avaliar como as distribuidoras tratam a função 51V em seus documentos normativos e requisitos de acesso.

2.7.1 Metodologia do Levantamento

Para caracterizar o panorama normativo, selecionaram-se as dez maiores distribuidoras do país por número de Unidades Consumidoras (UCs), utilizando-se ranking oficial publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Em seguida, foram consultados documentos técnicos públicos relacionados ao acesso de MGD, tais como normas técnicas e manuais de conexão, priorizando documentos com escopo explícito para micro e minigeração e conexão em média tensão.

A presença da função 51V foi verificada por leitura dirigida dos trechos técnicos como “51V” e descrições equivalentes associadas à sobrecorrente com restrição por tensão. Para organizar os resultados, adotou-se a seguinte classificação:

1. Explícita (prevista): quando a função 51V aparece de forma direta no documento, integrada à metodologia de proteção com diretrizes de aplicação.

2. Explícita (condicional): quando a função 51V aparece explicitamente, porém associada a condicionantes (porte da central, nível de tensão, arranjo de conexão, necessidade de estudo, caso a caso).
3. Não citada: quando não foi identificada menção à 51V no documento consultado.

2.7.2 Resultados do Levantamento

A Tabela 2 consolida os resultados para as dez maiores distribuidoras selecionadas por número de unidades consumidoras (UCs), apresentando o documento consultado, o escopo do documento e o status de exigência da função 51V. Observa-se que a presença da 51V nos documentos públicos não é uniforme. Em alguns casos, a função aparece de forma explícita e estruturada, enquanto em outros não é citada no normativo, mesmo quando há exigência de um conjunto robusto de funções de proteção. A Tabela 3, por sua vez, apresenta um glossário com os significados das proteções ANSI exigidas.

Tabela 2 – Análise da citação da função 51V em normas técnicas de MMDG

Ranking	Distribuidora	Documento (GD/MMDG)	Escopo do documento	Status 51V	Condição	Proteções exigidas (ANSI)
1	CEMIG-D	ND 5.31 – Conexão em MT (GD)	MT / acessante produtor	Explícita (Condicional)	Ajuste a ser definido por estudo.	25; 27; 59; 81U; 81O; 32; 46; 47; 67; 67N; 51V; 21/21N.
2	Enel SP (Eletropaulo)	Especificação Técnica nº 0005	Central geradora / requisitos mínimos por potência	Explícita (condicional)	“Sobrecorrente com restrição de tensão” = “Sim” apenas para “Maior que 500 kW”.	27; 59; 81U; 81O; 46; 47; 67; 51V
3	COELBA (BA)	DIS-NOR-033	MT / geradores em paralelo	Explícita (condicional)	Indicada como “necessário acima de 500 kW – se necessário e ajuste depende de estudo”.	50/51; 50N/51N; 51NS; 27; 27-0; 59; 59N; 67; 78; 81U; 81O; 81 df/dt; 32; 46; 47; 25; 50BF

4	COPEL-DIS	NTC 905200 – Acesso de micro e minigeração	BT/MT/AT (conforme seção)	Explícita (condicional)	A norma define “(51V)”, justificando sensibilidade e indicando uso “a critério do projeto”.	50/51; 50/51N; 67/67N; 50BF; 81U; 81O; 27; 59; 78; 81 df/dt; 46; 37; 59N; 32; 47; 62.
5	CPFL Paulista	GED-15303	Micro/mini no SCEE	Explícita (condicional)	“Sim” para potência instalada “> 75 kW”.	50/51; 50/51N; 67/67N; 50BF; 81U; 81O; 27; 59; 78; 81 df/dt; 46; 37; 59N; 32; 47; 62.
6	Neoenergia PE (Celpe)	DIS-NOR-033	MT / geradores em paralelo	Explícita (condicional)	Grupo Neoenergia inclui 51V e condiciona por estudo/porte (ex.: acima de 500 kW).	27; 59; 81U; 81O; 46; 47; 67; 51V.
7	Energisa	NDU – 015	Conexão em MT	Explícita (condicional)	Nos diagramas por faixa, para ≥ 501 kW a 51V aparece no conjunto de proteção do módulo (indicando aplicação típica nas faixas maiores).	27; 59; 81U; 81O; 46; 47; 67; 25; 78; 51V.
8	Light	Informação Técnica DTE/DTP	Até 36,2 kV / requisitos por potência	Explícita (condicional)	“Maior que 500 kW e ≤ 5 MW”.	27; 59; 59N; 81U; 81O; 81R/df/dt; 25; 78; 67; 32; 50/51; 50N/51N
9	Celesc-DIS	I-432.0004	Micro/mini	Não citada	“Sobrecorrente (50/51/50N/51N) conforme estudo”, mas não menciona 51V/restrrição de tensão.	27; 59; 59N; 81U; 81O; 81 df/dt; 50/51; 51N; 46; 47; 32; 67; 67N; 78; 50BF.
10	Equatorial Goiás	NT.00020.EQT	Micro/mini / requisitos mínimos	Explícita (condicional)	Exigida para potência instalada > 500 kW	27; 59; 81U; 81O; 46; 47; 50/51; 50N/51N; 67; 67N; 25; 78; 62; 51V.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos documentos técnicos das distribuidoras analisadas.

Tabela 3 – Glossário (Proteção x Numeração ANSI)

Proteção	ANSI
Distância / impedância (fase/terra)	21 / 21N
Verificação de sincronismo	25
Subtensão	27
Subtensão fase-neutro (convenção de norma)	27-0
Potência direcional / reversa	32
Subcorrente	37
Sequência negativa de corrente / desequilíbrio	46
Desequilíbrio de tensão / seq. negativa de tensão	47
Sobrecorrente instantânea / temporizada (fase)	50 / 51
Sobrecorrente instantânea / temporizada (neutro/terra)	50N / 51N
Sobrecorrente sensível/neutro	51NS
Sobrecorrente sensível à terra	51GS
Sobrecorrente com restrição de tensão	51V
Falha de disjuntor	50BF
Sobretensão	59
Sobretensão de neutro/terra	59N
Temporização/retardo (timer auxiliar)	62
Sobrecorrente direcional	67
Sobrecorrente direcional de neutro	67N
Anti-ilhamento / perda de sincronismo (out-of-step)	78
Subfrequência	81U
Sobrefrequência	81O
Taxa de variação da frequência (ROCOF)	81 df/dt

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no IEEE Std C37.2.

2.7.3 Discussão e implicação para o estudo da Proteção 51V

A Tabela 2 indica que a exigência da proteção 51V não é uniforme entre as distribuidoras analisadas. Quando aparece de forma explícita, observa-se predominância de aplicação em cenários de maior criticidade, especialmente em média tensão e em faixas mais elevadas de potência instalada, geralmente como requisito condicional (por porte ou por estudo). Esse padrão é coerente com a motivação técnica da 51V. Em faltas distantes e com maior impedância, a corrente medida pode ser reduzida, fazendo com que a 51 convencional perca sensibilidade. Ao incorporar a tensão como variável auxiliar, a 51V melhora a capacidade de atuação sob subtensão típica de faltas.

Além do critério por potência, algumas normas indicam aplicação “caso a caso”, sinalizando que a adoção depende de estudo de curto-circuito e coordenação de proteção do alimentador/gerador. Por outro lado, a ausência de menção explícita em determinados documentos não implica necessariamente inexistência de exigência, pois funções adicionais podem ser solicitadas no parecer de acesso conforme características locais do circuito.

Nos próximos tópicos, apresenta-se uma discussão das funções mais recorrentes identificadas no levantamento, contemplando sua finalidade, critérios de atuação e características, de modo a estabelecer uma base técnica coerente para a análise da Proteção de Sobrecorrente com Restrição por Tensão.

2.8 Funções de proteção recorrentes em pareceres de acesso

2.8.1 Função 27 – Subtensão

A função 27 (subtensão) é amplamente exigida em processos de conexão de GD/MMGD por atuar como proteção de supervisão frente a reduções anormais de tensão no ponto de conexão. Em termos práticos, essa função contribui para evitar a permanência do gerador conectado durante condições de tensão inadequadas, as quais podem estar associadas a faltas na rede, manobras, ilhamento involuntário ou condições operativas que comprometam a qualidade e a estabilidade do fornecimento. Em sistemas com geração distribuída, a atuação por subtensão é especialmente relevante por auxiliar tanto na estratégia de anti-ilhamento quanto na coordenação com a metodologia de recomposição do alimentador, reduzindo o risco de operação indevida durante eventos transitórios.

A lógica fundamental da função 27 pode ser expressa como:

$$V \leq V_{pick-up}$$

Onde:

- V = Tensão Eficaz (V);
- $V_{pick-up}$ = Valor de referência ajustado (V).

Em aplicações práticas, a função 27 é normalmente temporizada para evitar atuações indevidas em afundamentos muito curtos, sendo representada por:

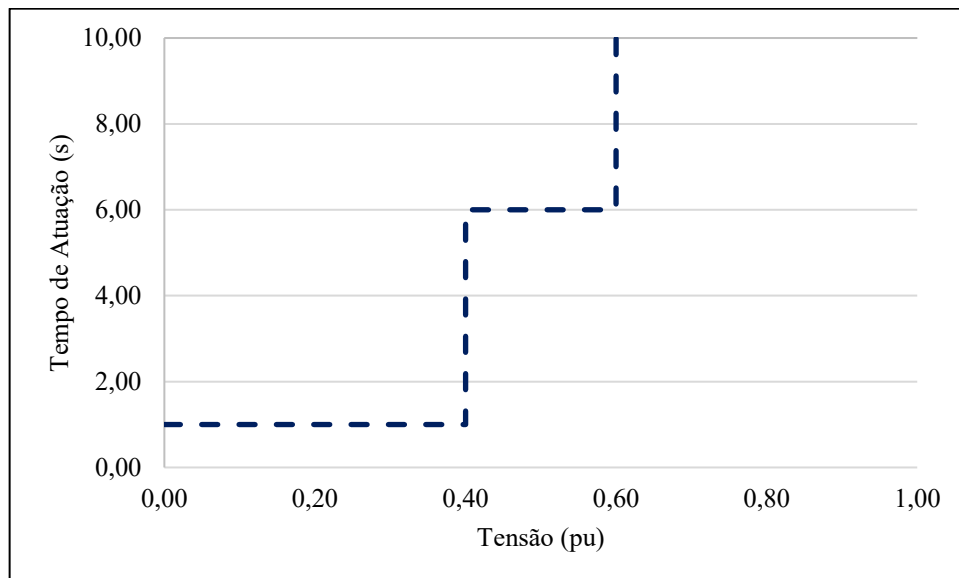
$$t_{27} = \begin{cases} t_{aj}, & \text{se } V \leq V_{pick-up} \\ \infty, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (14)$$

Onde:

- t_{aj} = Tempo de Ajuste (s);
- ∞ = Condição de não-atuação.

Quando se empregam múltiplos estágios (por exemplo, subtensão em dois níveis), a proteção pode ser implementada com dois limiares, V_1 e V_2 , e temporizações distintas, t_1 e t_2 , tornando a atuação mais seletiva frente a eventos menos severos e mais rápida em subtensões profundas.

Figura 3 - Curva Função 27 – Subtensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que em redes com GD/MMGD, ajustes de 27 devem considerar o compromisso entre sensibilidade perante condições anormais e afundamentos transitórios decorrentes de faltas externas e manobras. Além disso, a função 27 frequentemente é utilizada em conjunto com outras funções de interface, especialmente frequência (81) e sobretensão (59), compondo o conjunto mínimo de requisitos para conexão segura

A utilização isolada das funções de tensão, entretanto, pode não ser suficiente para atender simultaneamente aos requisitos de sensibilidade e velocidade da proteção. As funções 27 e 59 são normalmente associadas a temporizações intencionais, definidas de modo a evitar a desconexão indevida da geração durante variações de tensão de curta duração (VTCDs), tais como afundamentos e elevações momentâneas que não necessariamente exigem a retirada imediata da central geradora. Por outro lado, em situações de falta nas quais coexistam

afundamento de tensão e elevação limitada da corrente, a função 51V pode reduzir seu pick-up equivalente e aumentar o múltiplo de atuação da proteção. Dependendo da curva e dos ajustes temporais adotados, esse aumento pode resultar em um tempo de operação inferior ao de uma função 27 deliberadamente temporizada. Dessa forma, a 51V não substitui as funções 27, 59 ou 51, mas acrescenta um critério combinado de corrente e tensão ao esquema de proteção, cuja aplicação deve ser coordenada com as demais funções e com os requisitos de suportabilidade da geração às VTCDs (ANEEL, 2021).

2.8.2 Função 59 – Sobretensão

A função 59 é exigida para proteger a interface de conexão e a rede contra condições de elevação anormal da tensão. O evento de sobretensão pode ocorrer por operação com baixa carga, manobras, compensações reativas, reguladores de tensão e principalmente em situações de ilhamento ou operação errônea do inversor/gerador. A proteção de sobretensão reduz riscos de danos a equipamentos, evita injeções indevidas em condições fora da faixa e auxilia no cumprimento dos limites de qualidade de energia definidos pela distribuidora.

A lógica da função pode ser expressa como:

$$V \geq V_{pick-up}$$

Onde:

- V = Tensão Eficaz (V);
- $V_{pick-up}$ = Valor de referência ajustado (V).

Com temporização:

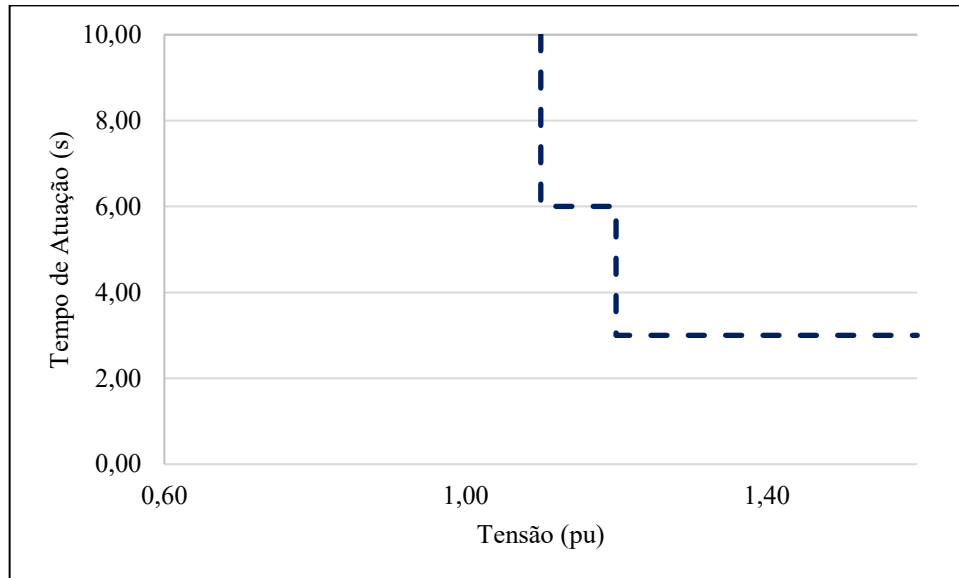
$$t_{59} = \begin{cases} t_{aj}, & \text{se } V \geq V_{pick-up} \\ \infty, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

Onde:

- t_{aj} = Tempo de Ajuste (s);

- ∞ = Condição de não-atuação.

Figura 4 - Curva Função 59 – Sobretensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.8.3 Função 81 – Proteção de Frequência

A função 81 é amplamente exigida em conexão de GD/MMGD por atuar na desconexão do gerador quando a frequência do ponto de conexão sai de faixas permitidas. Em condições anormais, como ilhamento involuntário, perda de referência do sistema ou distúrbios relevantes, a frequência pode se desviar rapidamente, e a desconexão do gerador é necessária para preservar segurança e qualidade do alimentador. Por esse motivo, normas exigem subfrequência (81U) e sobrefrequência (81O) e, em alguns casos, também a detecção pela taxa de variação da frequência (ROCOF), frequentemente indicada como 81 df/dt ou 81R.

A função de Subfrequência (81U) é descrita em:

$$f \leq f_{pick-up,U}$$

Onde:

- f = Frequência medida (Hz);

- $f_{pick-up,U}$ = Ajuste de pick-up de subfrequência (Hz)

Com o tempo definido, segue em:

$$t_{81U} = \begin{cases} t_{aj,U}, & f \leq f_{pick-up} \\ \infty, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (16)$$

Onde:

- t_{81U} = Tempo de atuação da função (s)
- $t_{aj,U}$ = Ajuste de pick-up de subfrequência (s)
- ∞ = Condição de não-atuação.

Já a função de Sobrefrequência (81O):

$$f \geq f_{pick-up,O}$$

Onde:

- f = Frequência medida (Hz);
- $f_{pick-up,O}$ = Ajuste de pick-up de sobrefrequência (Hz)

Onde a temporização se baseia em:

$$t_{81O} = \begin{cases} t_{aj,O}, & f \geq f_{pick-up,O} \\ \infty, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (17)$$

Onde:

- t_{81O} = Tempo de atuação da função (s);
- $t_{aj,O}$ = Ajuste de pick-up de sobrefrequência (s);
- ∞ = Condição de não-atuação.

Ademais, para a Taxa de Variação de Frequência (81R) – ROCOF, temos:

$$ROCOF = \frac{df}{dt} \quad (18)$$

Onde:

- $ROCOF$ = Taxa de variação da frequência (Hz/s);
- f = Frequência instantânea estimada pelo relé (Hz);
- t = Tempo (s).

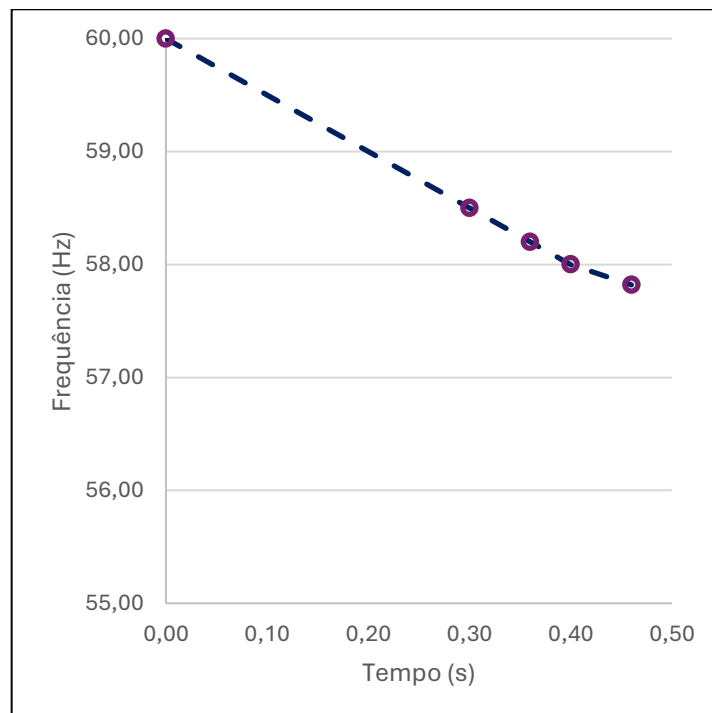
Seguindo o critério de atuação:

$$\left| \frac{df}{dt} \right| \geq \left(\frac{df}{dt} \right)_{pick-up}$$

Onde:

- $\left(\frac{df}{dt} \right)$ = Ajuste de pick-up do ROCOF (Hz/s);

Figura 5 - Curva Função 81 – Frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que a figura acima representa um comportamento decrescente da frequência ao longo do tempo, representado por uma taxa de variação $\left|\frac{df}{dt}\right|$. À medida que a frequência reduz e cruza os limites de subfrequência associados aos estágios de proteção 81U os ajustes de pick-up sensibilizam a atuação, mostrando que a presença de uma variação rápida de frequência pode antecipar a condição de desligamento e contribuir para a detecção de ilhamento em sistemas com GD/MMGD.

2.8.4 Função 67 – Sobrecorrente Direcional

A função 67 (sobrecorrente direcional) é uma proteção que associa dois critérios simultâneos: a identificação de uma condição de sobrecorrente e a verificação do sentido associado ao fluxo de corrente durante a falta. Diferentemente das funções 50/51 não direcionais, que avaliam apenas a magnitude da corrente, a função 67 permite distinguir se o evento está ocorrendo a montante ou a jusante do ponto de instalação do relé.

Em circuitos de potência, nem sempre é suficiente detectar apenas a magnitude de uma grandeza elétrica; em muitos casos é necessário identificar também o sentido associado ao evento, especialmente quando existem múltiplas fontes de alimentação e possibilidade de fluxo bidirecional. Nesse contexto, define-se a direcionalidade como a capacidade do relé de distinguir se a condição anormal (por exemplo, uma falta) ocorre no sentido configurado como forward (direto) ou backward (reverso) em relação ao ponto de instalação. Essa característica torna-se particularmente relevante em circuitos com presença de GD/MMGD, nos quais o fluxo de potência pode se tornar bidirecional e a contribuição de curto-circuito pode variar conforme a localização da geração e da falta.

Em redes de distribuição tradicionais, predominantemente radiais, a coordenação por sobrecorrente (50/51) costuma ser suficiente para garantir seletividade. Entretanto, com a inserção de fontes distribuídas, podem surgir situações de alimentação reversa e de alteração do “perfil” das correntes de falta, nas quais relés não direcionais podem atuar fora da zona esperada, comprometendo a seletividade. Nesses cenários, a função 67 aumenta a confiabilidade da proteção ao restringir a atuação à direção configurada (por exemplo, somente para faltas a jusante do ponto de medição), contribuindo para evitar desligamentos indevidos de trechos saudáveis do circuito.

Do ponto de vista funcional, a atuação da 67 depende da superação do valor de pick-up de corrente e da confirmação direcional por meio de uma grandeza de polarização, normalmente baseada em tensão (ou em combinações tensão-corrente, conforme o algoritmo do relé).

A atuação dessa função depende de dois fatores simultâneos:

1- Sobrecorrente:

$$I \geq I_{pick-up}$$

Onde:

- I = Corrente medida (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente de Ajuste (A).

2- Direcionalidade:

(definida pelo ângulo entre a corrente de falta e a tensão):

$$\cos(\theta - \tau) \geq 0$$

Onde:

- θ = Ângulo medido entre corrente de falta e a tensão;
- τ = Ângulo de máxima sensibilidade (ajuste direcional).

A atuação é expressa por:

$$Atuação_{67} = \begin{cases} 1, & (I \geq I_{pick-up}) \wedge (\cos(\theta - \tau) \geq 0) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (19)$$

Onde:

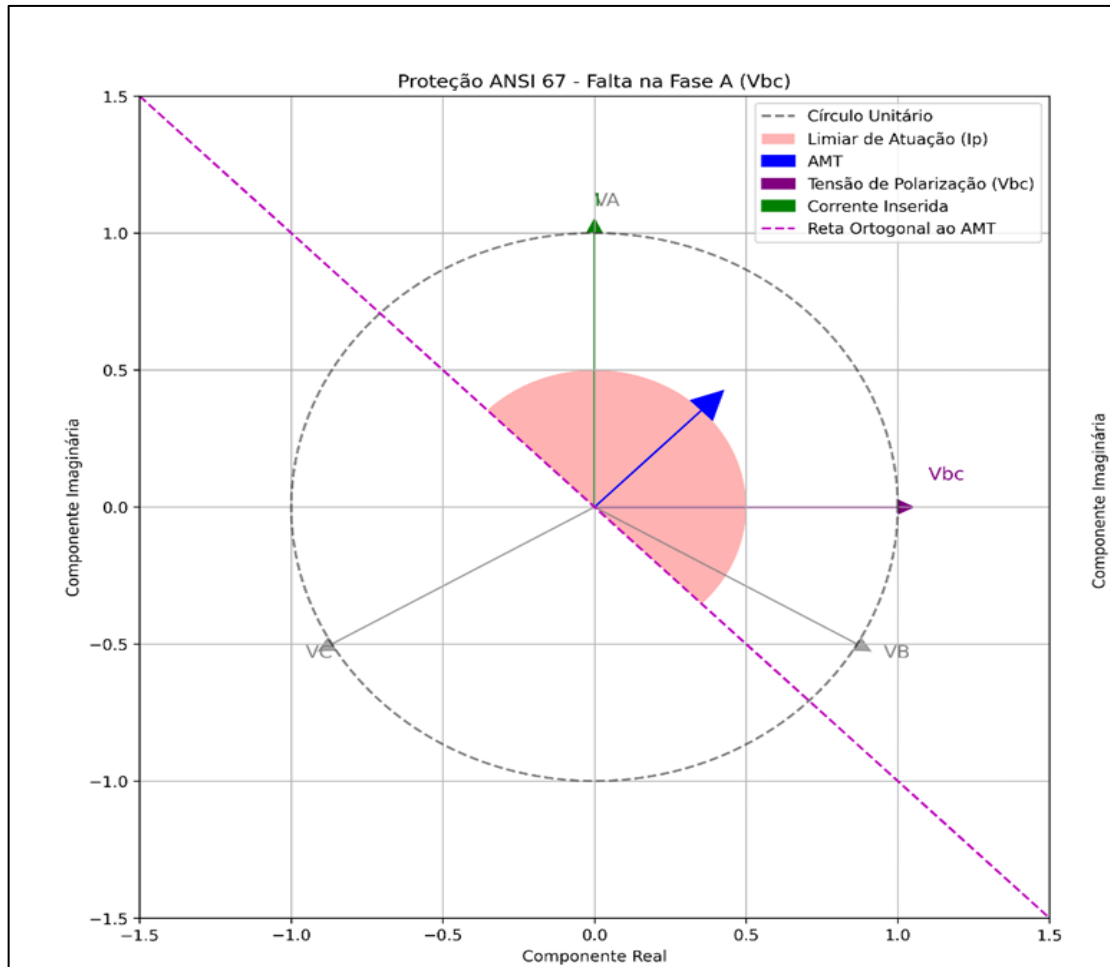
- I = Corrente medida (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente de Ajuste (A);
- $\wedge$ = Operador lógico “E”;
- θ = Ângulo entre a corrente de falta e a tensão de polarização;

- τ = Ângulo de máxima sensibilidade, ou ângulo de máximo torque;

Em termos práticos, a condição $\cos(\theta - \tau) \geq 0$ define uma janela angular de atuação. Quando o ângulo medido está dentro da região configurada como “direto” (forward), a proteção pode atuar; caso contrário, mesmo com corrente acima do pick-up, a atuação é bloqueada. Isso permite que o relé seja sensibilizado para faltas em um sentido específico do circuito, elevando a seletividade em redes com múltiplas fontes.

Além disso, a função 67 pode ser aplicada com temporização do tipo “tempo definido” ou combinada com característica inversa (similar à 51), dependendo da estratégia de coordenação adotada. Em arranjos com GD/MMGD, essa flexibilidade é importante, pois permite compatibilizar a direcionalidade com a necessidade de coordenação com religadores, fusíveis e relés a montante.

Figura 6 - Curva Função 67 – Sobrecorrente Direcional



Fonte: Adaptado das notas de aula da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos (BARRA, 2025)

Onde:

- AMT = Ângulo de máximo torque.

A figura apresentada ilustra, de forma conceitual, o princípio de operação da proteção de sobrecorrente direcional. Observa-se a representação polar da grandeza medida, na qual a decisão de direção é obtida pela relação angular entre a corrente de falta e a tensão, definindo uma janela de atuação associada ao ângulo de máximo torque (AMT). Assim, mesmo que a corrente ultrapasse o valor de pick-up, a atuação do relé ocorre apenas quando o vetor correspondente ao evento se encontra dentro do setor configurado como “direto” (forward), bloqueando ocorrências no sentido reverso. Essa característica aumenta a seletividade em circuitos com presença de GD/MMGD, nos quais o fluxo de potência e as contribuições de curto-circuito podem se tornar bidirecionais, reduzindo a probabilidade de desligamentos indevidos e contribuindo para uma coordenação de proteção mais robusta.

2.9 Função 51V – Sobrecorrente com Restrição por Tensão

2.9.1 Conceito

A função 51V corresponde à proteção de sobrecorrente temporizada com restrição por tensão, sendo empregada em situações nas quais a análise isolada da corrente pode não ser suficiente para garantir sensibilidade adequada diante de faltas. Em termos conceituais, essa função associa o comportamento do elemento de sobrecorrente ao nível de tensão registrado no ponto de instalação do relé, de modo que a redução da tensão elétrica tende a modificar a condição de atuação da proteção.

Diferentemente de uma função 51 convencional, cujo critério de operação depende essencialmente do valor da corrente em relação ao ajuste de pick-up, a 51V introduz uma lógica adicional na qual a tensão atua como variável de restrição. Assim, em condições normais de operação, com tensão próxima do valor nominal, o elemento pode permanecer menos sensível, reduzindo a possibilidade de atuações indevidas por sobrecargas transitórias ou correntes de operação admissíveis. Por outro lado, em situações de falta, nas quais é comum ocorrer afundamento de tensão, a restrição imposta pela tensão é reduzida, permitindo que o relé atue mesmo quando a corrente de curto-circuito não apresenta magnitude suficientemente elevada para sensibilizar uma função 51 ajustada de forma convencional.

Essa característica torna a 51V particularmente relevante em circuitos nos quais a contribuição de corrente de falta pode ser limitada, variável ou fortemente dependente das condições de operação da fonte. Em termos práticos, a função busca combinar duas informações fundamentais do regime de falta: a elevação da corrente e a queda de tensão.

De maneira funcional, a 51V não deve ser entendida como mera associação entre uma função de sobrecorrente e uma função de subtensão operando de forma independente. Trata-se, na realidade, de um elemento integrado de proteção, no qual a tensão altera a sensibilidade efetiva do elemento de corrente, ampliando a capacidade de detecção de faltas em cenários onde a lógica tradicional de sobrecorrente pode se mostrar insuficiente.

2.9.2 Modalidades clássicas associadas à função: 51C e 51V

Na literatura técnica, a designação 51V é frequentemente empregada em sentido amplo para representar elementos de sobrecorrente temporizada cuja atuação sofre influência da tensão medida no ponto de instalação do relé. Dentro dessa família, destacam-se duas

modalidades clássicas: a sobrecorrente controlada por tensão **51C** (*Voltage-controlled overcurrent*) e a sobrecorrente restringida por tensão **51V** (*Voltage-restrained overcurrent*). Embora ambas utilizem a tensão como grandeza auxiliar à decisão do relé, seus princípios de atuação não são idênticos e sua distinção é importante para evitar ambiguidades ao longo deste trabalho.

A modalidade 51C baseia-se em um critério de habilitação relacionado ao nível de tensão. Nessa lógica, o elemento de sobrecorrente opera com corrente de pick-up fixa, porém sua atuação somente é permitida quando a tensão cai abaixo de um limiar previamente ajustado. Em outras palavras, a tensão funciona como um critério de supervisão: se o circuito permanece em nível de tensão superior ao valor definido, o elemento de corrente fica bloqueado; se a tensão reduz para abaixo do limiar, o relé passa a atuar para correntes acima do pick-up. Trata-se, portanto, de uma abordagem mais simples sob o ponto de vista funcional, frequentemente associada à proteção de retaguarda de geradores, especialmente em situações nas quais faltas próximas aos terminais da máquina podem provocar queda de tensão acompanhada de redução relativa da corrente observada pelo relé.

De forma simplificada, a lógica da 51C pode ser representada por:

$$\text{Atuação}_{51C} = \begin{cases} 1, & (I \geq I_{pick-up}) \wedge (V \leq V_{Set}) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (20)$$

Onde:

- I = Corrente medida (A);
- $I_{pick-up}$ = Corrente de Ajuste (A);
- $\wedge$ = Operador lógico “E”;
- V = Tensão (V);
- V_{Set} = Limiar de tensão para habilitação da função (V).

Já a modalidade 51V apresenta uma lógica distinta. Nesse caso, a tensão não atua apenas como critério de habilitação, mas altera diretamente a sensibilidade do elemento de corrente. À medida que a tensão se reduz, o pick-up efetivo do relé também diminui, tornando a proteção progressivamente mais sensível em condições típicas de falta. Assim, diferentemente da 51C, na qual o valor de corrente de ajuste permanece fixo, na 51V o limiar de atuação do elemento de sobrecorrente passa a ser uma função da tensão. Essa característica torna a 51V

extremamente útil em circuitos nos quais a corrente de falta pode ser limitada ou pouco superior à corrente de carga, como em sistemas com geração distribuída e fontes baseadas em eletrônica de potência.

De forma geral, a lógica da 51V pode ser expressa como:

$$I \geq I_{ajuste,eq}(V)$$

Onde:

- I = Corrente medida (A);
- $I_{ajuste,eq}(V)$ = Corrente de ajuste equivalente, dependente da tensão no ponto de aplicação (A).

Nessa formulação, a queda de tensão reduz o valor efetivo de corrente necessário para sensibilização do relé, aumentando sua capacidade de detectar faltas mesmo em cenários de baixa contribuição de curto-circuito. Esse comportamento torna a 51V especialmente relevante em circuitos nos quais a corrente de falta pode ser limitada ou pouco superior à corrente de carga, como em sistemas com geração distribuída e fontes baseadas em eletrônica de potência.

Do ponto de vista prático, a 51C tende a apresentar implementação e ajuste mais simples, pois trabalha com um único valor de pick-up de corrente e um único limiar de tensão. Em contrapartida, a 51V oferece maior aderência a cenários onde a simples supervisão por subtensão não é suficiente, pois modifica a própria característica de atuação do elemento de corrente. Por essa razão, embora a 51C permaneça relevante em aplicações clássicas, a 51V mostra-se mais adequada ao problema investigado neste trabalho.

Ressalta-se que, em algumas documentações técnicas, a modalidade com restrição por tensão pode aparecer sob designações alternativas. Contudo, para fins de padronização e coerência com o restante deste TCC, adota-se neste trabalho a sigla 51V para representar a proteção de sobrecorrente com restrição por tensão.

2.9.3 Fundamentos Matemáticos

A modelagem matemática da função 51V pode ser apresentada, de forma generalizada, a partir da ideia de que o valor de corrente necessário para atuação do relé passa a depender da tensão medida no ponto protegido. Assim, a condição básica de operação pode ser escrita como:

$$I \geq I_{ajuste,eq}(V)$$

Onde:

- I = Corrente medida (A);
- $I_{ajuste,eq}(V)$ = Corrente de ajuste equivalente, dependente da tensão no ponto de aplicação (A).

Essa formulação expressa o princípio fundamental da proteção de sobrecorrente com restrição por tensão: o elemento de corrente não opera com um único limiar fixo, mas com um valor efetivo de pick-up que varia conforme a tensão observada pelo relé.

A relação de restrição por tensão pode ser representada por:

$$I_{ajuste,eq}(V) = K_v(V) \times I_{pick-up} \quad (21)$$

Onde:

- $I_{ajuste,eq}(V)$ = Corrente de ajuste equivalente sob determinada condição de tensão (A);
- $K_v(V)$ = Fator de restrição associado ao nível de tensão;
- $I_{pick-up}$ = Corrente de ajuste (A).

Para a função 51V, admite-se que o fator $K_v(V)$ seja crescente com a tensão. Em outras palavras, quanto maior a tensão, maior tende a ser a restrição imposta ao elemento de corrente; quanto menor a tensão, menor tende a ser essa restrição. Assim, em situação de afundamento de tensão, o valor efetivo de corrente necessário para atuação é reduzido, elevando a sensibilidade da proteção.

Uma representação linear simplificada pode ser escrita como:

$$K_v(V_{pu}) = K_{mín} + (1 - K_{mín}) \times V_{pu} \quad (22)$$

Onde:

- $K_v(V_{pu})$ = Fator de restrição associado ao nível de tensão;
- K_{min} = Fator mínimo de restrição para tensão muito reduzida.
- V_{pu} = Tensão por unidade;

Neste trabalho, K_{min} é utilizado como parâmetro da representação linear simplificada da restrição por tensão. Esse fator estabelece o limite inferior da corrente equivalente de ajuste quando a tensão medida se aproxima de zero. O valor $K_{min} = 0,4$ foi adotado como premissa analítica do estudo, não correspondendo a um ajuste universal estabelecido por norma ou a uma recomendação específica de fabricante. Com esse valor, o pick-up equivalente pode ser reduzido até 40% do pick-up nominal em condições de tensão muito reduzida, permanecendo próximo do valor nominal à medida que a tensão se aproxima de 1 pu. Em aplicações reais, esse parâmetro deve ser definido conforme a característica disponível no relé empregado e os resultados do estudo de coordenação da instalação.

A tensão por unidade é definida por:

$$V_{pu} = \frac{V}{V_{nom}} \quad (23)$$

Onde:

- V_{pu} = Tensão em por unidade;
- V = Tensão medida no ponto de aplicação (V);
- V_{nom} = Tensão nominal de referência (V).

Substituindo-se a expressão do fator de restrição na equação da corrente de ajuste equivalente, obtém-se:

$$I_{ajuste,eq}(V_{pu}) = [K_{min} + (1 - K_{min}) \times V_{pu}] \times I_{pick-up} \quad (24)$$

Onde:

- $I_{ajuste,eq}(V_{pu})$ = Corrente de ajuste equivalente da função 51V (A);

- K_{min} = Fator mínimo de restrição;
- V_{pu} = Tensão por unidade;
- $I_{pick-up}$ = Corrente básica de ajuste do relé (A)

Essa formulação evidencia que, para valores de tensão próximos da condição nominal ($V_{pu} \approx 1$), a corrente de ajuste equivalente tende a se aproximar do valor de pick-up originalmente ajustado. Por outro lado, quando a tensão medida diminui ($V_{pu} < 1$), a corrente de ajuste equivalente também é reduzida, tornando a função mais sensível à corrente. Assim, quanto menor a tensão no ponto monitorado, menor tende a ser o limiar efetivo de atuação da proteção.

A partir dessa relação, pode-se definir o múltiplo de atuação da função 51V como:

$$M_{51V} = \frac{I_{medido}}{I_{ajuste,eq}(V)} \quad (25)$$

Onde:

- M_{51V} = Múltiplo de atuação efetivo da função 51V;
- I_{medido} = Corrente medida pelo relé (A);
- $I_{ajuste,eq}(V)$ = Corrente de ajuste equivalente associada à tensão medida (A).

Quando $M_{51V} > 1$, a proteção entra em condição de atuação. Como a função 51V é normalmente temporizada, seu tempo de operação pode ser representado, de forma geral, pela expressão:

$$t_{operação} = TMS \cdot \frac{\beta}{M_{51V}^{\alpha} - 1} \quad (26)$$

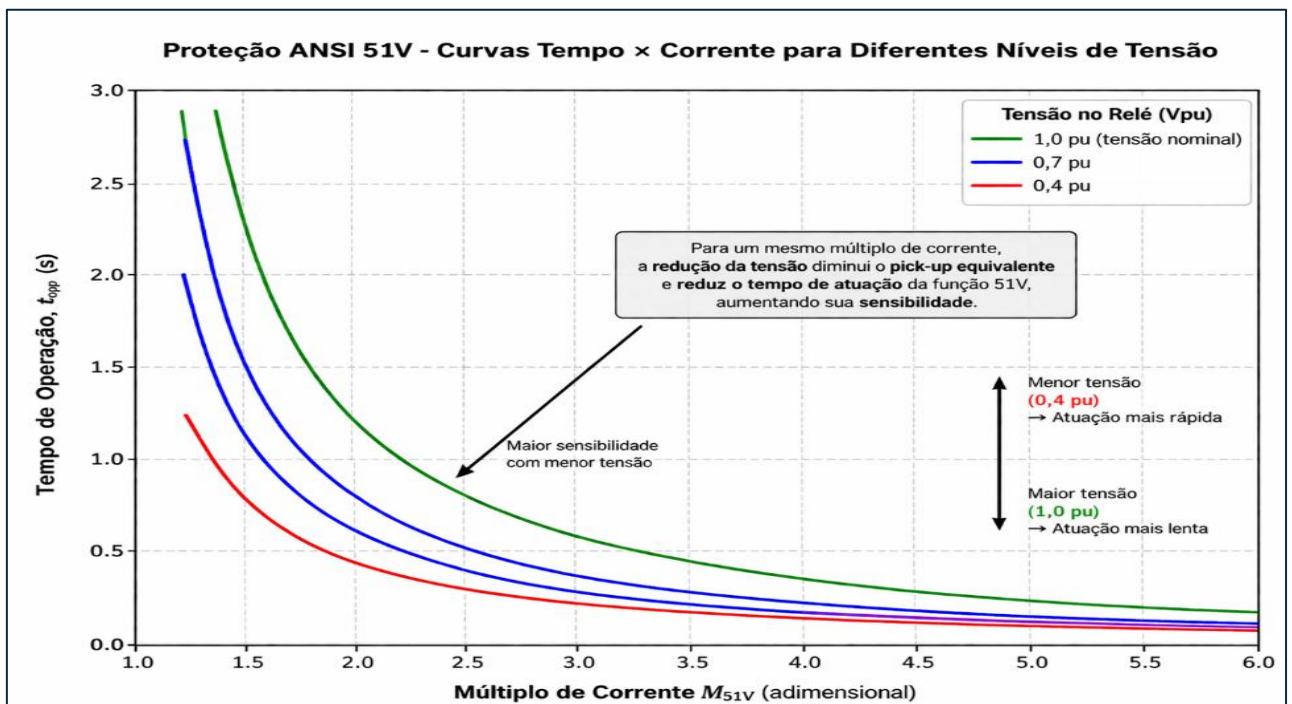
Onde:

- $t_{operação}$ = Tempo de operação do relé (s);
- TMS = Time multiplier setting (Dial de Tempo);
- β = Constante característica da curva adotada;
- α = Expoente da curva de atuação;
- M_{51V} = Múltiplo de atuação efetivo da função 51V.

Observa-se, portanto, que a tensão influencia o tempo de operação da proteção. À medida que a tensão diminui, o valor de $I_{ajuste,eq}(V)$ é reduzido, elevando o múltiplo M_{51V} . Esse comportamento é coerente com o princípio da função 51V, pois, em condições típicas de falta, o afundamento de tensão atua como evidência adicional da anormalidade, aumentando a sensibilidade e a rapidez da proteção.

Ressalta-se que a modelagem apresentada possui caráter generalizado e simplificado, sendo adequada à compreensão conceitual da função 51V. Em aplicações práticas, relés comerciais podem adotar parametrizações específicas de fabricante, preservando, entretanto, o mesmo princípio físico de restrição por tensão.

Figura 7 – Curva Função 51V – Restrição por Tensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 7 – Curva Função 51V ilustra o comportamento da função ANSI 51V para diferentes níveis de tensão no relé. Observa-se que, para um mesmo múltiplo de corrente, a redução da tensão desloca a característica de atuação, resultando em menores tempos de operação. Esse comportamento confirma o princípio da proteção de sobrecorrente com restrição por tensão, segundo o qual o decréscimo da tensão reduz a restrição imposta ao elemento de corrente, elevando sua sensibilidade em condições típicas de falta.

2.9.4 Análise da função 51V

A principal contribuição da função 51V é aumentar a sensibilidade da proteção sem exigir a redução excessiva do ajuste de corrente da função 51 convencional. Na prática, isso

permite que o relé permaneça mais seguro em condições normais de carregamento e, ao mesmo tempo, mais responsivo em situações de falta associadas a afundamento de tensão.

Do ponto de vista analítico, a 51V altera a fronteira de atuação no plano corrente-tensão. Enquanto na função 51 convencional o critério de disparo depende de um valor fixo de corrente, na 51V esse limiar torna-se variável, reduzindo-se à medida que a tensão diminui. Isso torna a proteção mais compatível com condições em que a corrente de falta pode ser limitada. Essa característica melhora a distinção entre variações operacionais normais e faltas efetivas, pois a queda de tensão passa a atuar como critério físico complementar à corrente.

Por fim, a 51V não substitui, isoladamente, as demais funções de proteção, devendo ser aplicada de forma coordenada com outros elementos do circuito. Assim, ela deve ser entendida como um recurso complementar de sensibilidade, especialmente relevante em determinadas aplicações de minigeração distribuída baseada em inversores e conectada em média tensão.

2.9.5 Considerações Operacionais

Do ponto de vista operacional, a aplicação da função 51V exige atenção à correta parametrização do relé, especialmente quanto ao ajuste de pick-up, à curva temporizada adotada e à grandeza de tensão utilizada como referência. Como seu desempenho depende simultaneamente da medição de corrente e de tensão, a confiabilidade dos sinais provenientes de TCs e TPs torna-se fundamental para evitar sensibilizações indevidas ou perda de desempenho da proteção. Além disso, os ajustes devem considerar as condições reais de carregamento, os diferentes cenários de falta e as particularidades do circuito protegido.

Em circuitos de média tensão com presença de minigeração distribuída baseada em inversores, essa análise assume relevância particular, uma vez que a contribuição de corrente durante faltas pode permanecer limitada. Nessas aplicações específicas, a função 51V pode complementar a função 51 convencional ao utilizar o afundamento de tensão para modificar o limiar efetivo de atuação. Sua adoção, entretanto, deve ser tecnicamente justificada, pois a função 51 permanece suficiente na maioria das aplicações e apresenta a vantagem de não depender da medição de tensão. Quando os transformadores de potencial já estão disponíveis para outras finalidades de medição e proteção, a incorporação da 51V pode constituir um recurso adicional de sensibilidade, desde que coordenado com as demais funções do sistema.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Considerações Iniciais

A ampliação da geração distribuída nas redes elétricas tem provocado mudanças relevantes no comportamento dos sistemas de distribuição, especialmente no que se refere aos níveis de curto-circuito, ao sentido do fluxo de potência e ao desempenho dos esquemas tradicionais de proteção. Em redes originalmente projetadas para operação radial, com fluxo de potência unidirecional, a presença de novas fontes conectadas ao sistema altera as condições sob as quais os dispositivos de proteção foram ajustados, comprometendo critérios clássicos como sensibilidade, seletividade e coordenação. Leão (2024), ao analisar os impactos da GD sobre uma rede real, destaca precisamente esse deslocamento de paradigma, mostrando que a integração dessas fontes impõe a revisão dos estudos de proteção e dos ajustes dos dispositivos ao longo do alimentador.

Nesse cenário, a função 51V volta a ganhar importância na literatura. Embora seu uso seja tradicionalmente associado à proteção de geradores, estudos mais recentes mostram que sua lógica passa a ser aplicável também em redes de distribuição com elevada presença de fontes baseadas em inversores. Mößlang (2022) parte exatamente dessa motivação ao investigar se a função ANSI 51V pode ser empregada na proteção de novas redes de distribuição com alta penetração de geração baseada em inversores, mostrando que o tema deixou de estar restrito ao ambiente clássico das máquinas síncronas.

Diante disso, este capítulo organiza a revisão da literatura em quatro eixos. O primeiro reúne estudos sobre a função 51V em sua forma geral. O segundo contempla sua aplicação em geradores síncronos, que corresponde ao seu uso mais clássico. O terceiro trata da função 51V em sistemas com geração distribuída. Por fim, o quarto eixo discute a coordenação da proteção em redes com GD e MMGD. A divisão foi adotada para construir um percurso lógico, partindo dos fundamentos da função, passando por sua aplicação tradicional e, em seguida, aproximando a discussão do problema central deste trabalho, associado ao comportamento da proteção em redes de distribuição modernas.

3.2 Função 51V: fundamentos e aplicações gerais

A função 51V pode ser entendida como uma variação da proteção temporizada de sobrecorrente em que a tensão deixa de ser apenas uma grandeza auxiliar de supervisão e passa a interferir diretamente na característica de atuação do relé. Rai, Singh e Aarti (2021) mostram que essa proteção relaciona corrente e tensão de forma lógica, permitindo diferenciar com maior segurança as condições normais de operação e condições de falta. No trabalho, os autores destacam que a 51V é empregada como proteção de retaguarda e explicam que sua atuação se apoia justamente na relação entre a corrente medida e a condição de tensão nos terminais do equipamento protegido.

Esses autores também ressaltam que a 51V aparece em duas formas principais: a versão controlada por tensão e a versão restringida por tensão. Na primeira, a atuação da sobrecorrente depende de a tensão cair abaixo de um determinado limiar, já na segunda, o valor de pick-up se reduz gradativamente à medida que a tensão diminui. Em ambos os casos, a lógica é a mesma: preservar a capacidade de detecção da proteção quando a corrente de falta, isoladamente, não é suficientemente representativa. Assim, a literatura sugere que a principal contribuição da função 51V está em ampliar a sensibilidade da proteção sem exigir, necessariamente, a redução indiscriminada dos ajustes da 51 convencional de fase ou neutro.

Outro aspecto importante é que a 51V não é apresentada na literatura como substituta universal das funções tradicionais de sobrecorrente. Pelo contrário, ela surge como um recurso complementar, particularmente útil em cenários nos quais a magnitude da corrente deixa de ser um critério robusto para identificar a severidade da falta. Em consequência, sua efetividade depende da correta integração com a metodologia de proteção adotada no sistema e da adequada parametrização dos níveis de tensão e corrente associados à sua atuação.

3.3 Aplicações da função 51V em geradores síncronos

A aplicação mais consolidada da função 51V está ligada à proteção de geradores síncronos. Rai, Singh e Aarti (2021) observam que faltas próximas aos terminais do gerador podem provocar queda de tensão e redução da corrente de falta, o que torna necessária a utilização de elementos temporizados de sobrecorrente influenciados pela tensão para assegurar operação e coordenação adequadas. Os autores afirmam ainda que a 51V é usada como proteção de retaguarda em estações geradoras justamente porque melhora a confiabilidade da atuação antes que a corrente do gerador se reduza excessivamente.

A literatura desse grupo também mostra que a função 51V não aparece apenas como conceito, mas como elemento efetivamente incorporado à modelagem e à análise de sistemas

de proteção. Salles (2013), ao desenvolver modelos de sistemas de proteção para ilhamento intencional de geradores síncronos distribuídos, situa a discussão no contexto da operação de geradores distribuídos interligados à rede e evidencia a necessidade de avaliações detalhadas de proteção, curto-circuito e estabilidade para esse tipo de aplicação. O trabalho reforça que, nesse ambiente, os ajustes dos dispositivos de proteção nem sempre são flexíveis o suficiente para acomodar as mudanças operativas associadas ao ilhamento e à reconexão, o que ajuda a explicar a importância histórica de funções como a 51V nesse campo.

Em direção próxima, Sousa (2024), ao tratar da confiabilidade da proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos, mostra que o sistema de proteção dessas unidades depende de ajustes coerentes com normativas e requisitos de suportabilidade, e que a identificação de condições anormais nem sempre é simples quando se observam apenas grandezas convencionais. Ainda que o foco de sua dissertação seja o anti-ilhamento, o trabalho confirma que a proteção de geradores distribuídos síncronos constitui um ambiente em que a seleção adequada das funções e dos ajustes é decisiva para evitar desconexões indevidas e falhas de atuação.

No contexto deste trabalho, os estudos sobre geradores síncronos têm papel principalmente conceitual, pois ajudam a explicar a consolidação técnica da função 51V e a incorporação da tensão como variável auxiliar da proteção. Entretanto, o foco deste TCC não está na proteção de máquinas, mas na aplicação da 51V em redes com geração distribuída e MMGD.

3.4 Aplicações da função 51V em sistemas com geração distribuída

Com a expansão da geração fotovoltaica e de outras fontes conectadas por conversores, a função 51V passou a ser discutida em um contexto distinto daquele em que foi tradicionalmente aplicada. Mishra, Pradhan e Bajpai (2021) observam que a integração de plantas fotovoltaicas baseadas em inversores altera significativamente o comportamento da corrente de falta, limitando a aplicação da proteção convencional de sobrecorrente em linhas de distribuição. Segundo os autores, a corrente de curto-circuito passa a ser comparável à corrente de carga, o que dificulta a distinção entre condição saudável e condição defeituosa. Como alternativa, o trabalho propõe um esquema adaptativo de relé de sobrecorrente restringido por tensão, capaz de modificar o pick-up conforme as condições operativas vigentes do sistema.

Os mesmos autores mostram ainda que a aplicação tradicional da VR-OCR (*Voltage Restrained Overcurrent Relay*) pode ser afetada pela variação das condições de carregamento do sistema, de modo que a simples adoção de uma curva fixa pode não ser suficiente em redes com presença de geração fotovoltaica. Por isso, propõem uma característica adaptativa baseada na corrente de pré-falta e na magnitude da tensão medida no relé, com o objetivo de preservar a sensibilidade da proteção mesmo quando a corrente de falta é menor que a corrente de carga nominal. Esse resultado é importante pois desloca a discussão da 51V do ambiente da proteção clássica para o contexto da proteção adaptativa em sistemas com geração distribuída.

Mößlang (2022) amplia essa discussão ao estudar microrredes com alta penetração de inversores formadores de rede. Em sua dissertação, o autor afirma que o objetivo é investigar se a função ANSI 51V pode ser utilizada na proteção dessas novas redes de distribuição. Os resultados mostram que, por meio da consideração da tensão, os relés conseguem detectar faltas simétricas em sistemas com baixa potência de curto-circuito, o que reforça a utilidade da função em ambientes nos quais a corrente de defeito é limitada pela própria estrutura da rede e pela natureza das fontes conectadas.

No mesmo eixo, Rahman, Nahor e Hariyanto (2025) analisam a coordenação de relés 50/51V em uma microrrede híbrida radial composta por geradores, painéis solares e baterias. Os autores mostram que, quando apenas a geração solar e baterias estão em operação, a contribuição de corrente de falta se torna relativamente pequena e pode permanecer abaixo do pick-up de relés 50/51 convencionais. Nessa condição, a lógica 51V se torna essencial, pois amplifica a corrente medida durante afundamentos de tensão e permite a atuação do relé mesmo quando a microrrede é dominada por fontes baseadas em inversores.

Além dos trabalhos acadêmicos, essa percepção também aparece em publicações técnicas voltadas à proteção de arranjos fotovoltaicos. No artigo técnico da S&R Energy, argumenta-se que, em usinas fotovoltaicas, a contribuição de corrente para curtos-circuitos externos pode permanecer muito próxima da corrente nominal de operação, o que limita a eficácia de esquemas convencionais baseados apenas em sobrecorrente. O estudo também destaca que, nessas condições, funções como 51V, 27 e 59 passam a assumir papel relevante, uma vez que a análise do comportamento das tensões se mostra mais eficaz para a sensibilização da proteção em diferentes tipos de falta.

Portanto, a literatura recente converge ao indicar que a função 51V ganha novo significado em sistemas com geração distribuída. Se antes ela era vista predominantemente como proteção de retaguarda em geração síncrona, agora passa a ser tratada como recurso de sensibilidade em redes de distribuição, microrredes e sistemas híbridos.

3.5 Coordenação de proteção em sistemas com GD e MMGD

Embora a ampliação da sensibilidade seja um aspecto importante, a literatura mostra que o problema da proteção em redes com GD e MMGD não se limita à simples detecção da falta. Leão (2024) enfatiza que a crescente penetração de geração distribuída altera a coordenação, a seletividade e a sensibilidade dos dispositivos de proteção ao longo do alimentador. Em sua análise, a autora demonstra que o aumento da GD pode comprometer o desempenho dos religadores e exigir a revisão dos ajustes ou até a mudança funcional de alguns equipamentos para preservar a seletividade do sistema.

Rodrigues (2017), ao estudar uma microrrede baseada na rede de 34 barras do IEEE, reforça essa percepção ao mostrar que o sistema apresenta exigências adicionais de proteção devido à limitação da corrente de falta imposta pelas fontes renováveis e à possibilidade de operação tanto conectada quanto ilhada. O autor conclui que a proteção de microrredes precisa garantir seletividade e coordenação nas diversas condições operativas, e mostra que a metodologia convencional baseada em sobrecorrente pode sofrer descoordenação na presença da geração distribuída. Também destaca que a proteção adaptativa tende a ganhar relevância à medida que a troca de informações entre equipamentos se torne mais confiável.

Rahman, Nahor e Hariyanto (2025) contribuem diretamente para a articulação entre sensibilidade e coordenação ao mostrar que, em uma microrrede híbrida, a coordenação temporal entre os relés 50/51V pode ser mantida dentro da faixa aceitável recomendada pela IEEE, preservando a hierarquia de proteção em diferentes cenários de operação.

Essa discussão também se aproxima da visão apresentada no artigo técnico da S&R Energy, no qual se argumenta que, em arranjos fotovoltaicos, a proteção baseada apenas em corrente pode ser insuficiente para eliminar a contribuição da usina em curtos-circuitos externos, tornando mais adequada uma abordagem apoiada no comportamento das tensões. Nessa perspectiva, a 51V passa a atuar em conjunto com funções como 27 e 59, ampliando a capacidade de detecção e reforçando a coerência do esquema de proteção em situações nas quais os elementos convencionais de sobrecorrente mostram baixa efetividade.

Dessa forma, o conjunto de trabalhos analisados indica que, em sistemas com GD e MMGD, o problema da proteção assume caráter duplo. De um lado, é preciso detectar faltas em condições nas quais a corrente de curto-circuito pode ser reduzida ou fortemente dependente do modo de operação da rede. De outro, é necessário preservar a ordem de atuação entre os dispositivos, evitando a falta de coordenação, atrasos indevidos e ampliações desnecessárias da área desligada. É nesse ponto que a função 51V se torna especialmente promissora, não apenas

como recurso de sensibilidade, mas como elemento capaz de contribuir para esquemas de proteção mais coerentes em redes de distribuição modernas.

3.6 Análise crítica da literatura

A análise conjunta dos trabalhos permite identificar uma convergência importante. Tanto na literatura clássica quanto na literatura mais recente, a função 51V é valorizada justamente em situações nas quais a corrente de falta, isoladamente, não é suficiente para representar o defeito de forma robusta. Nos estudos voltados a geradores síncronos, isso decorre da redução da corrente de curto-circuito próxima aos terminais da máquina. Já nos estudos sobre geração distribuída, microrredes e sistemas híbridos, esse mesmo problema aparece associado à limitação de corrente imposta por inversores, à operação com baixa potência de curto-circuito e à variação do modo de operação da rede.

Também se observa uma diferença de foco entre os grupos de trabalhos analisados. Os estudos mais clássicos concentram-se no princípio da função e em sua utilidade na proteção de geradores. Já os estudos mais recentes tendem a direcionar a discussão para sistemas com recursos energéticos distribuídos, propondo lógicas adaptativas, avaliando a função em microrredes e investigando seu papel na coordenação em redes modernas. Além disso, a inclusão de publicações técnicas voltadas a arranjos fotovoltaicos reforça que essa discussão não permanece restrita ao meio acadêmico, mas também se projeta sobre a prática da engenharia de proteção, especialmente quando se reconhece que funções convencionais baseadas apenas em corrente podem não ser suficientes para lidar com curtos externos em usinas fotovoltaicas.

A principal lacuna observada é que nem sempre a literatura integra de forma equilibrada três dimensões que, para este trabalho, são fundamentais: a limitação da corrente de falta em sistemas com GD e MMGD, o uso da 51V como recurso de aumento de sensibilidade e a necessidade de coordenação do esquema de proteção como um todo. Existem trabalhos consistentes sobre a função 51V, estudos relevantes sobre coordenação em redes com GD e pesquisas importantes sobre a proteção de microrredes, mas ainda é menos frequente encontrar abordagens que articulem essas três frentes de maneira simultânea e aplicada. É justamente nesse espaço que o presente TCC se insere, buscando discutir a função 51V não apenas como elemento isolado de proteção, mas como parte de uma análise mais ampla sobre o comportamento e a coordenação da proteção em sistemas de distribuição com geração distribuída.

3.7 Considerações finais do capítulo

A revisão desenvolvida mostrou que a função 51V possui fundamentação técnica consistente e que sua relevância foi ampliada pelo avanço da geração distribuída e das microrredes. Os trabalhos analisados indicam que a consideração da tensão pode aumentar a sensibilidade da proteção em situações nas quais a corrente de falta é limitada ou insuficiente para sensibilizar esquemas convencionais. Esse aspecto aparece tanto em estudos aplicados a plantas fotovoltaicas quanto em microrredes híbridas e redes com elevada penetração de inversores.

Ao mesmo tempo, a literatura evidencia que a presença de GD e MMGD torna a coordenação da proteção mais complexa, exigindo revisão de ajustes, maior aderência entre filosofia de proteção e operação da rede e, em muitos casos, a adoção de estratégias adaptativas. Assim, não basta demonstrar que a 51V pode atuar; é necessário validar seu comportamento quando inserida em um esquema de proteção coerente, seletivo e coordenado. Essa constatação justifica o avanço do trabalho para a análise computacional, na qual o comportamento das funções 51 e 51V é avaliado a partir das grandezas obtidas nas simulações.

4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

4.1 Considerações iniciais

Após a apresentação da fundamentação teórica e da revisão da literatura, este capítulo contempla a etapa aplicada do trabalho, desenvolvida por meio de simulações computacionais. O objetivo é avaliar o comportamento da tensão e da corrente em sistemas com geração fotovoltaica conectada à rede de distribuição em média tensão diante da ocorrência de faltas elétricas. Busca-se, principalmente, identificar uma condição na qual a função ANSI 51 convencional não seja sensibilizada e evidenciar o benefício da utilização da função ANSI 51V.

A metodologia compreendeu a simulação dos sistemas elétricos no MATLAB/Simulink e a posterior comparação analítica entre as funções ANSI 51 e ANSI 51V. Inicialmente, caracterizou-se o comportamento da tensão e da corrente antes, durante e após a ocorrência das faltas. Em seguida, as grandezas obtidas foram utilizadas para avaliar as condições de sensibilização das funções de proteção.

Na etapa de simulação, foram considerados dois sistemas elétricos. O Sistema elétrico 1 foi desenvolvido a partir da adaptação de um modelo disponibilizado pela MathWorks e utilizado para analisar a resposta dinâmica de uma planta fotovoltaica associada a um sistema de armazenamento de energia por baterias durante faltas trifásicas temporárias com diferentes valores de resistência de falta.

O Sistema elétrico 2 foi representado por meio de um sistema equivalente de uma usina fotovoltaica conectada à rede de distribuição em 13,8 kV. O modelo permitiu medir separadamente as contribuições da concessionária e da geração fotovoltaica, bem como a corrente total associada ao defeito, para faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas com diferentes valores de resistência de falta. Essa configuração possibilitou avaliar uma condição na qual a corrente medida pelo dispositivo de proteção da usina permanece próxima de seu valor nominal, enquanto a tensão apresenta um afundamento significativo.

A partir das grandezas obtidas, realizou-se uma comparação analítica entre as funções ANSI 51 e ANSI 51V, considerando o ajuste de corrente de pick-up e os parâmetros de restrição por tensão adotados. Os resultados também foram confrontados com os critérios de aplicação da função 51V identificados nos documentos técnicos das distribuidoras analisados no Capítulo 2.

4.2 Organização das simulações computacionais

A etapa aplicada deste trabalho foi desenvolvida no MATLAB/Simulink e organizada a partir de dois sistemas elétricos distintos, seguidos da avaliação das condições de sensibilização das funções ANSI 51 e ANSI 51V. Em cada sistema, as condições impostas durante as simulações foram diferenciadas pelo tipo de falta e pelo valor da resistência de falta adotado.

O Sistema elétrico 1 foi obtido a partir da adaptação de um modelo disponibilizado pela MathWorks, constituído por uma planta fotovoltaica associada a um sistema de armazenamento de energia por baterias. Esse sistema foi utilizado para caracterizar a resposta dinâmica das principais grandezas elétricas diante de faltas trifásicas temporárias, com ênfase nas tensões e correntes registradas no ponto de acoplamento comum.

O Sistema elétrico 2 consiste em um modelo equivalente de minigeração distribuída desenvolvido no MATLAB/Simulink. Sua estrutura representa uma unidade fotovoltaica baseada em inversores conectada a um circuito de média tensão e permite medir separadamente a contribuição da concessionária, a corrente fornecida pela minigeração e a corrente total associada ao defeito. Nesse sistema, foram analisadas diferentes condições de falta, incluindo curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos, com diferentes valores de resistência de falta.

A partir das grandezas obtidas nos dois sistemas elétricos, foram avaliadas analiticamente as condições de sensibilização das funções 51 e 51V. Para isso, consideraram-se os valores de corrente de pick-up, o comportamento da tensão durante as faltas e o efeito da restrição por tensão sobre o limiar equivalente da função 51V. Os resultados também foram relacionados aos critérios técnicos das distribuidoras discutidos nos capítulos anteriores.

4.3 Sistema elétrico 1 — modelo adaptado da MathWorks

4.3.1 Modelagem do sistema elétrico 1

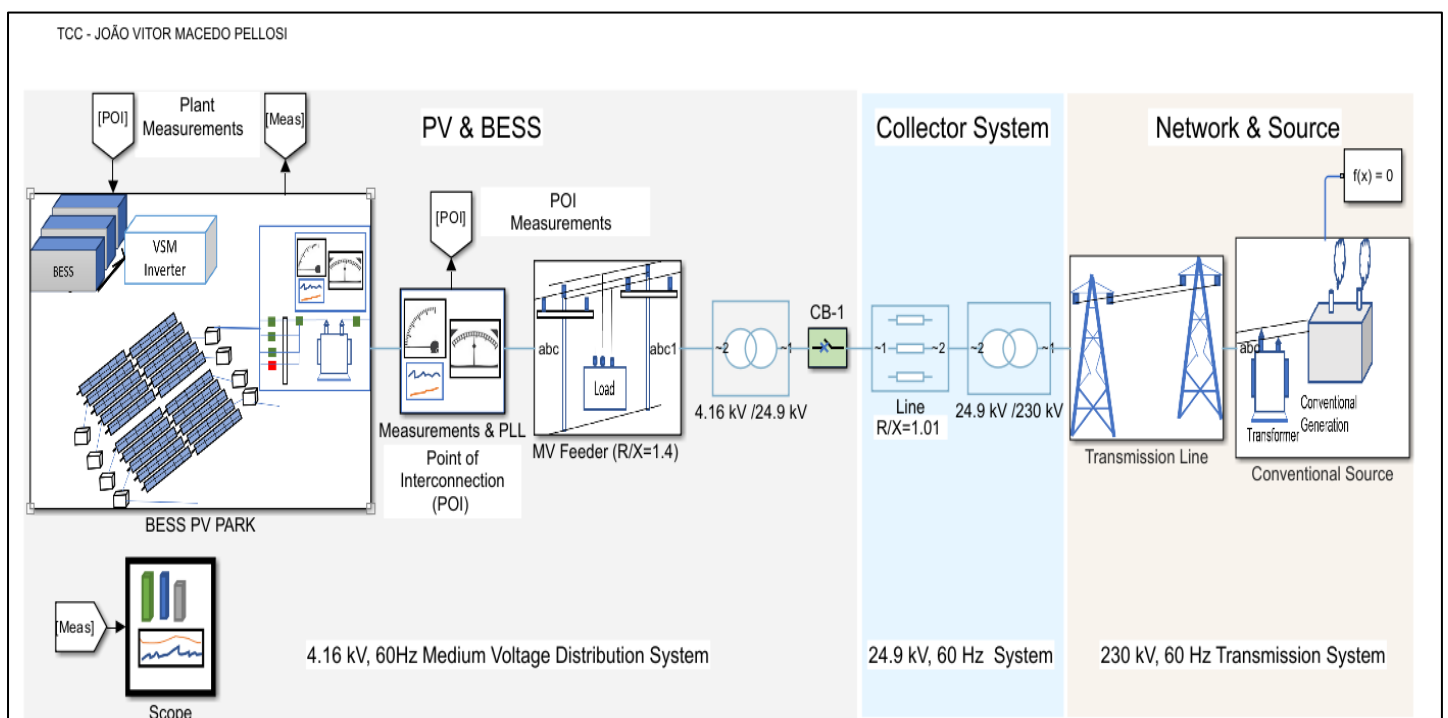
As simulações foram realizadas no MATLAB R2025b, em conjunto com o Simulink e as bibliotecas Simscape e Simscape Electrical. Esse ambiente computacional possibilitou a representação integrada dos componentes elétricos, dos sistemas de controle e dos instrumentos de medição, assim como a análise das tensões e correntes no domínio do tempo. Além dos recursos gráficos do Simulink, foram utilizados scripts desenvolvidos em MATLAB para

configurar os casos simulados, extrair os sinais de interesse, calcular os valores eficazes das grandezas elétricas e elaborar as figuras apresentadas neste capítulo.

O Sistema elétrico 1 foi desenvolvido a partir do modelo *Battery Storage PV Plant GFM*, integrante do projeto *Renewable Energy Integration Design with Simscape*, disponibilizado pela MathWorks. Em sua configuração original, o modelo representa uma planta fotovoltaica associada a um sistema de armazenamento de energia por baterias e contempla inversores, transformadores, alimentador de média tensão, cargas, sistemas de controle e blocos de medição. Essa estrutura foi utilizada como base por permitir a análise integrada do comportamento dinâmico da geração fotovoltaica e da rede elétrica diante da ocorrência de perturbações.

Para a realização deste trabalho, o modelo original foi adaptado para representar uma planta fotovoltaica com potência aproximada de 4 MW, conectada ao sistema elétrico no nível de tensão de 24,9 kV. Também foram ajustadas a potência do sistema de armazenamento por baterias, as cargas conectadas, o intervalo de aplicação das faltas e o tempo total de simulação. O Sistema elétrico 1 foi empregado especificamente para analisar a resposta dinâmica das tensões e correntes no ponto de acoplamento comum diante de faltas trifásicas temporárias, permitindo caracterizar o comportamento das grandezas antes, durante e após a ocorrência dos defeitos.

Figura 8 – Sistema fotovoltaico modelado



Fonte: Adaptado de MathWorks Simscape Team, 2026.

A partir dessa estrutura, foram monitoradas as grandezas no PAC, de modo a avaliar o comportamento do sistema em regime normal e durante a aplicação de uma falta temporária externa. Essa abordagem permite observar a relação entre o afundamento de tensão, a contribuição de corrente e a resposta dinâmica da planta fotovoltaica, aspectos diretamente relacionados à função 51V.

4.3.2 Parâmetros do sistema elétrico 1

Os principais parâmetros adotados no Sistema elétrico 1 são apresentados na Tabela 4. Durante as simulações, foram mantidas constantes as potências da planta fotovoltaica, do sistema de armazenamento por baterias e das cargas, bem como a frequência nominal, o intervalo de aplicação das faltas e o tempo total de simulação.

Tabela 4 – Parâmetros do sistema elétrico 1

Parâmetro	Valor adotado
Potência da planta fotovoltaica	4 MW
Tensão de conexão analisada	24,9 kV
Potência do sistema de baterias	0,2 MW
Potência total das cargas	3 MW
Frequência nominal	60 Hz
Intervalo da falta	1,5 a 1,7 s
Tempo total de simulação	2,5 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição desses parâmetros estabeleceu uma base comum para os casos de simulação do Sistema elétrico 1, de modo que apenas a resistência de falta fosse alterada entre as condições analisadas. Dessa forma, tornou-se possível comparar os efeitos de diferentes resistências sobre as tensões e correntes medidas no PAC.

4.3.3 Casos de faltas analisados

No Sistema elétrico 1, foram analisadas faltas trifásicas temporárias com resistências de 0,01, 1, 5 e 10 Ω . Em todos os casos, a falta foi aplicada em 1,5 s, eliminada em 1,7 s, sendo mantida durante 200 ms. Permaneceram inalterados o tipo e a localização da falta, bem como os demais parâmetros elétricos e operacionais do sistema, variando-se somente a resistência do defeito.

O caso com $R_f = 0,01 \Omega$ foi adotado para a apresentação detalhada das formas de onda da tensão, da corrente e da frequência. Posteriormente, foram realizadas simulações complementares com $R_f = 1, 5$ e 10 Ω , visando avaliar a influência da resistência de falta sobre as grandezas medidas no PAC e verificar se a corrente permanecia suficiente para sensibilizar a função ANSI 51 convencional.

4.3.4 Resultados e avaliação das funções 51 e 51V

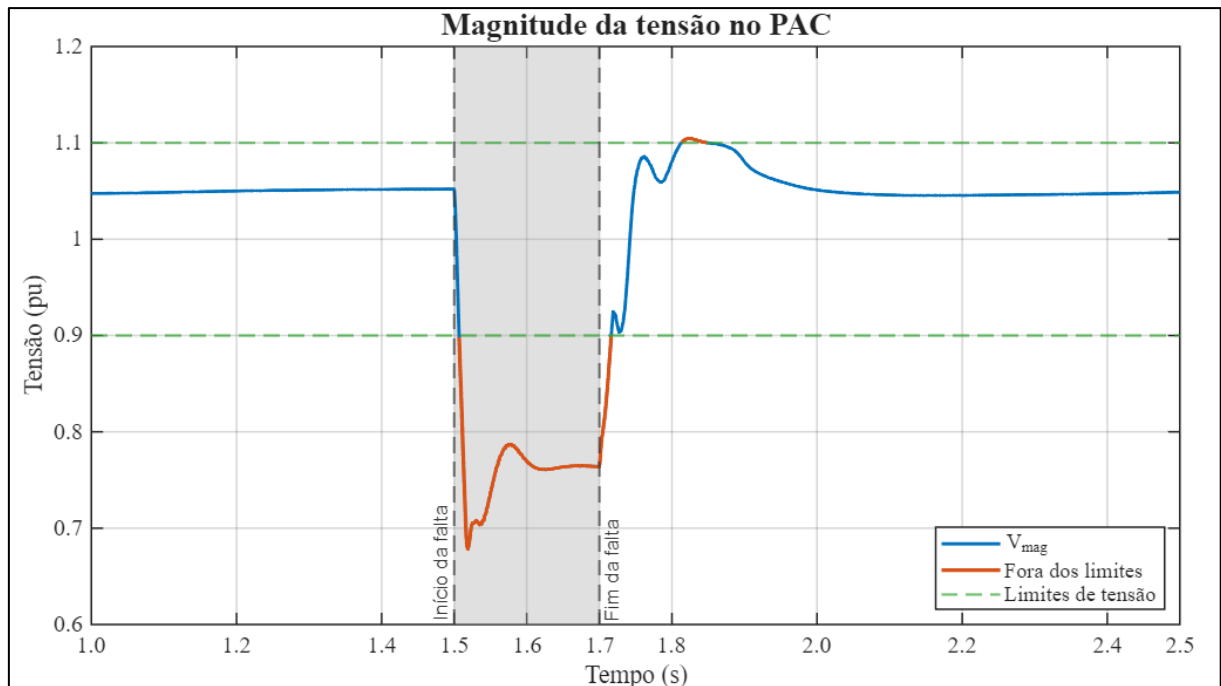
Os resultados apresentados nesta seção correspondem ao Sistema elétrico 1, caracterizado pela aplicação de uma falta trifásica temporária entre 1,5 s e 1,7 s. As grandezas foram analisadas no ponto de acoplamento comum, considerando os períodos pré-falta, durante a falta e pós-falta.

As figuras apresentam o período da falta por meio de uma região sombreada, permitindo identificar visualmente o início e o fim do curto-circuito. Além das formas de onda instantâneas, foram analisadas as magnitudes eficazes da tensão e da corrente, obtidas por meio de uma janela causal de um ciclo da frequência nominal.

Comportamento da tensão no PAC

A Figura 9 apresenta a magnitude eficaz da tensão no PAC, expressa em pu. Antes do evento, a tensão permaneceu próxima de 1,05 pu. Após a aplicação da falta, observou-se um afundamento acentuado, mantido durante o período compreendido entre 1,5 s e 1,7 s.

Figura 9 – Magnitude da tensão no PAC durante a falta trifásica temporária



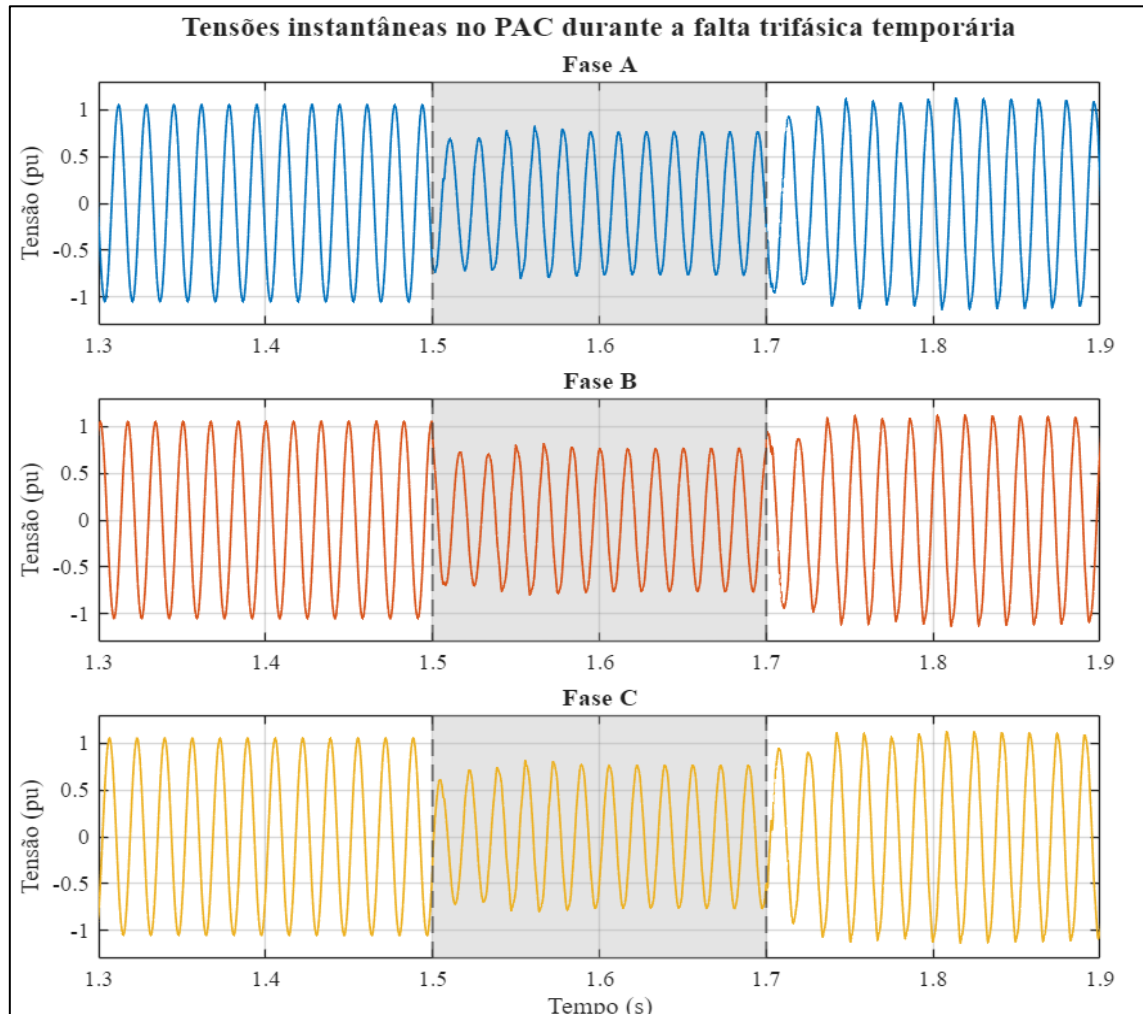
Fonte: Elaborado pelo autor.

A magnitude média da tensão durante a falta foi de 0,7308 pu, enquanto o menor valor registrado foi de 0,6587 pu. Considerando a referência nominal de 1 pu, o valor mínimo registrado correspondeu a uma redução de 34,12% em relação à tensão nominal.

O comportamento observado demonstra que a redução da tensão não ocorreu apenas como um pico instantâneo, mas permaneceu durante a aplicação do defeito. Após a eliminação da falta em 1,7 s, a tensão apresentou recuperação. Na janela pós-falta adotada para o cálculo, foi obtido valor médio de 0,9954 pu, indicando a recuperação progressiva da grandeza em direção à condição de regime permanente.

A Figura 10 apresenta as formas de onda instantâneas das tensões das fases A, B e C. A separação das fases em gráficos individuais permite observar com maior clareza a redução da amplitude durante a falta.

Figura 10 – Tensões trifásicas instantâneas no PAC durante a falta trifásica



Fonte: Elaborado pelo autor.

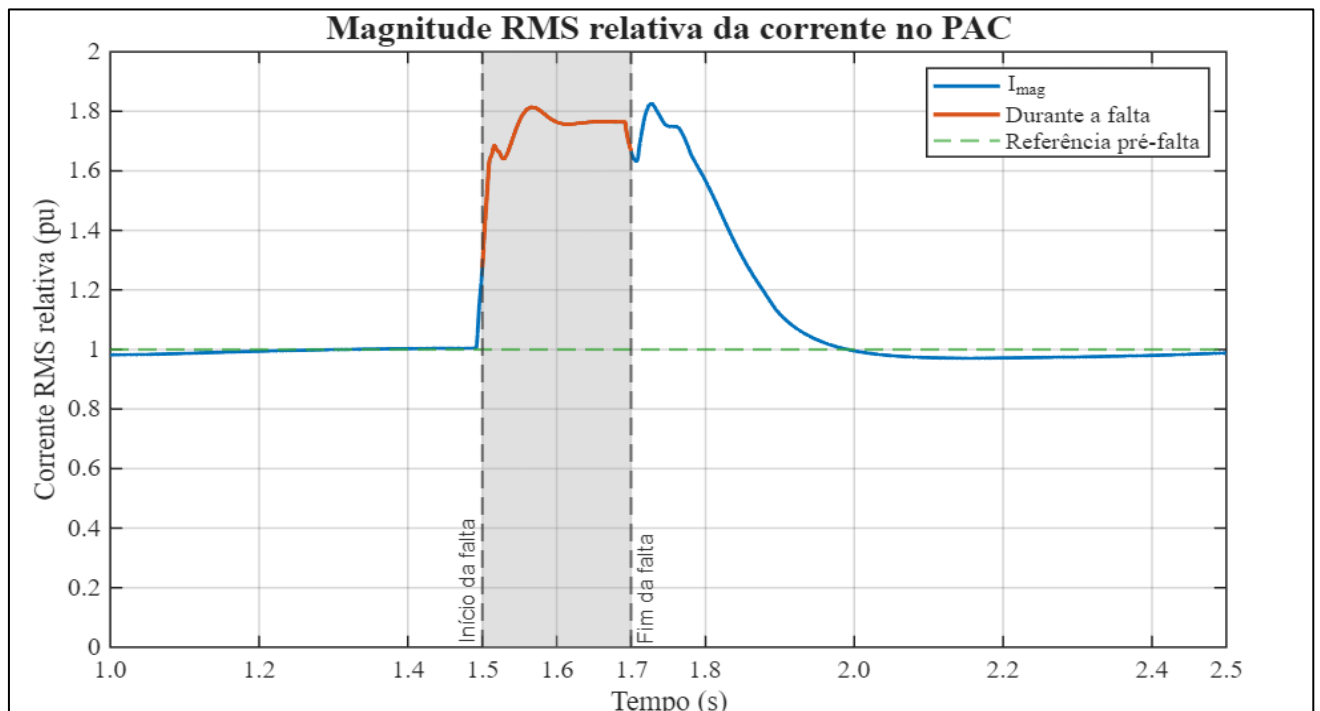
Durante o curto-circuito, as três fases apresentaram redução de amplitude de forma aproximadamente equilibrada, comportamento compatível com a natureza trifásica do evento aplicado. Após a eliminação do defeito, foram observadas oscilações transitórias de recuperação, seguidas do restabelecimento das tensões para valores próximos aos registrados antes da falta.

Os resultados evidenciam que a tensão apresentou uma resposta significativa e claramente associada ao período da falta. Essa grandeza é analisada posteriormente em conjunto com a corrente.

Comportamento da corrente no PAC

A Figura 11 apresenta a magnitude eficaz da corrente no PAC, normalizada em relação ao valor médio registrado no período pré-falta. Antes da ocorrência do evento, a corrente permaneceu próxima de 1 pu, condição adotada como referência para a avaliação de sua variação durante o curto-circuito.

Figura 11 – Magnitude da corrente no PAC durante a falta temporária



Fonte: Elaborado pelo autor.

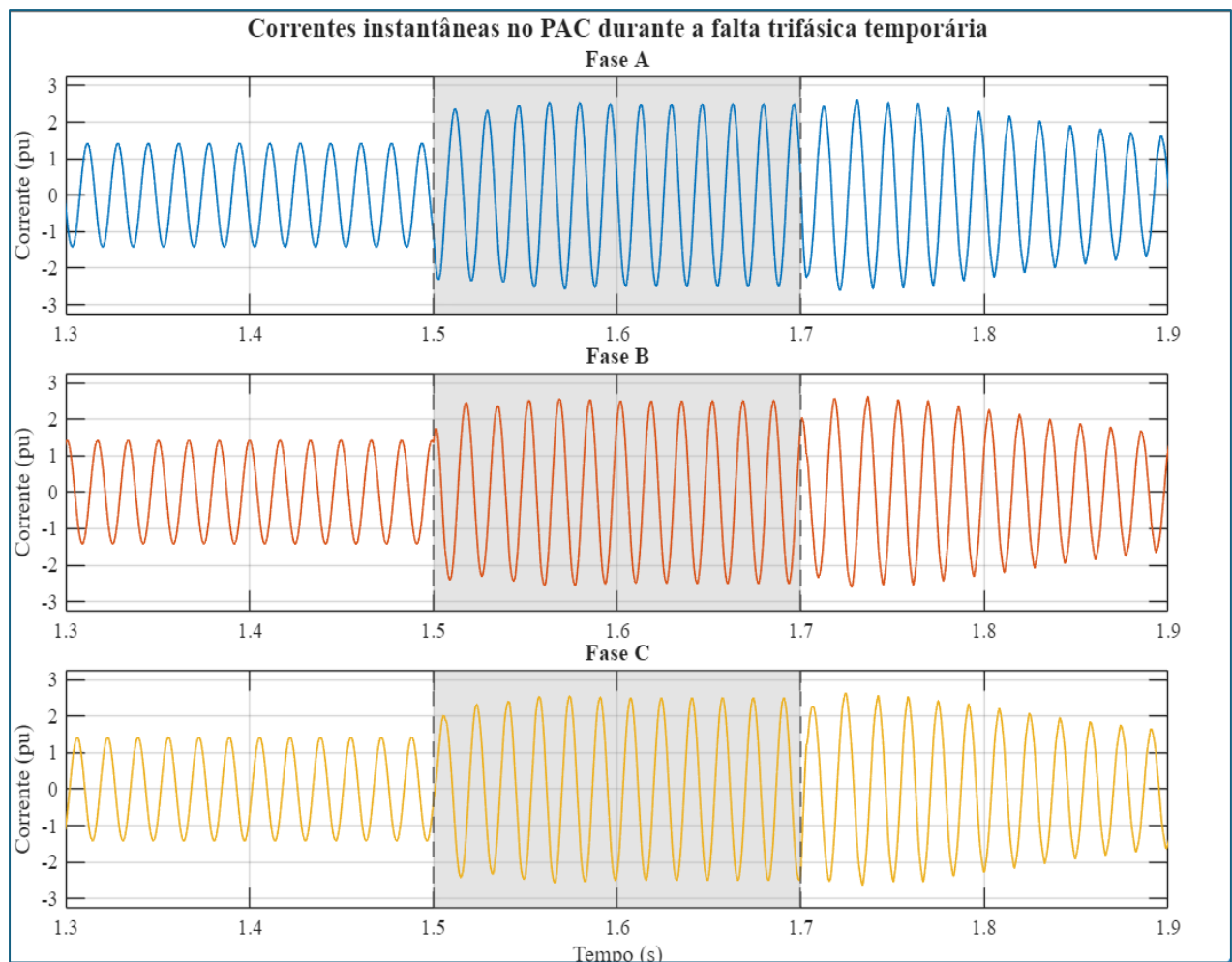
Após a aplicação da falta em 1,5 s, observou-se elevação da magnitude da corrente. O valor médio registrado durante o período de permanência do defeito foi de 1,7138 pu, enquanto o valor máximo atingiu 1,8146 pu. Assim, a corrente apresentou elevação máxima de 81,46% em relação à condição pré-falta.

Apesar do aumento identificado, a corrente não atingiu valores de múltiplos elevados em relação ao regime anterior ao evento. Esse comportamento pode estar relacionado às características do sistema modelado, que contém fontes conectadas à rede por meio de conversores eletrônicos e estratégias de controle capazes de influenciar a contribuição de corrente durante perturbações.

Posteriormente à eliminação da falta em 1,7 s, a corrente apresentou oscilações transitórias e retornou para um valor médio de 0,9752 pu no período pós-falta, próximo à condição observada antes do curto-circuito.

A Figura 12 apresenta as formas de onda instantâneas das correntes das fases A, B e C durante o período analisado.

Figura 12 – Correntes trifásicas no PAC durante a falta temporária



Fonte: Elaborado pelo autor.

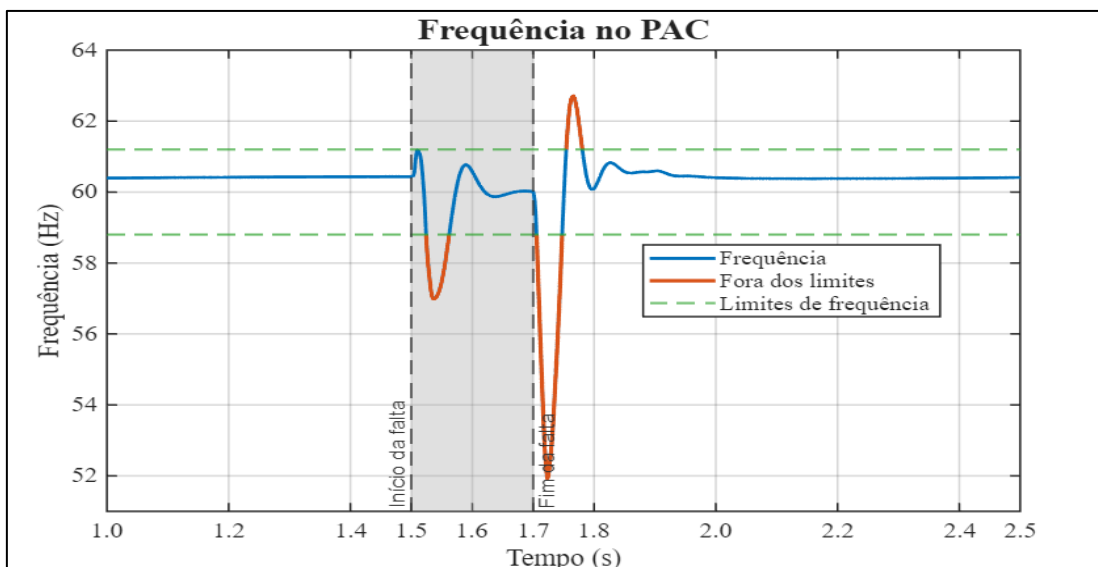
Durante a falta, verificou-se o aumento da amplitude das correntes nas três fases, com comportamento aproximadamente equilibrado, conforme esperado para um curto-circuito trifásico. Após a retirada do defeito, ocorreram oscilações transitórias de curta duração, seguidas da recuperação das formas de onda para valores próximos aos registrados no período pré-falta.

Os resultados demonstram que a falta provocou simultaneamente um afundamento significativo da tensão e uma elevação moderada da corrente. Essa combinação é relevante para o objetivo deste trabalho, uma vez que a função 51 utiliza somente a corrente como grandeza de atuação, enquanto a função 51V considera também a redução da tensão para modificar sua sensibilidade.

Comportamento da frequência

A Figura 13 apresenta o comportamento da frequência medida no PAC durante a aplicação da falta trifásica temporária. Antes do evento, a frequência permaneceu próxima do valor nominal de 60 Hz, indicando uma condição inicial estável do sistema.

Figura 13 – Frequência no PAC durante a falta trifásica temporária



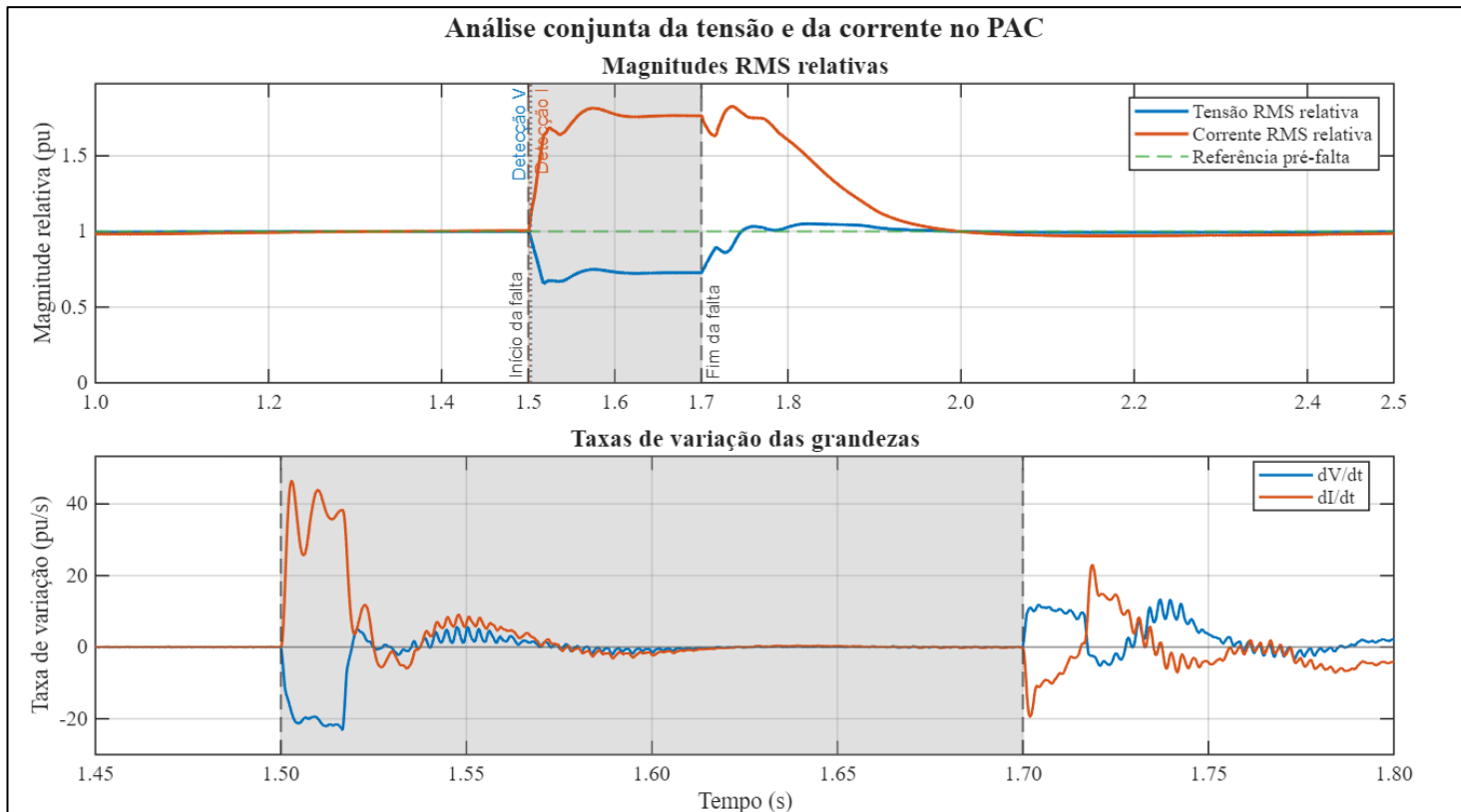
Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante os instantes de aplicação e eliminação da falta, a frequência apresentou movimentos transitórios acentuados. Essas variações permaneceram concentradas nos períodos de transição do evento e não caracterizaram um novo regime permanente de operação.

Após os transitórios decorrentes da eliminação do curto-circuito, a frequência retornou para valores próximos de 60 Hz.

A Figura 14 apresenta, de forma conjunta, as magnitudes eficazes relativas da tensão e da corrente no PAC durante a falta trifásica temporária.

Figura 14 – Comportamento conjunto da tensão e da corrente no PAC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando as bases empregadas nas análises individuais, a tensão atingiu valor mínimo de 0,6587 pu na base nominal do sistema, enquanto a corrente alcançou valor máximo relativo de 1,8146 pu em relação à condição pré-falta. Esses resultados correspondem, respectivamente, a uma tensão 34,12% abaixo da referência nominal e a uma elevação máxima de 81,46% da corrente.

Para comparar o início das respostas, foram adotados os limiares analíticos de 0,95 pu para a tensão e 1,05 pu para a corrente. A corrente ultrapassou seu limiar em 1,5019 s, enquanto a tensão cruzou o respectivo limiar em 1,5033 s. A diferença entre os instantes foi de aproximadamente 1,5 ms, indicando que as alterações ocorreram praticamente de forma simultânea.

Embora os limiares tenham sido cruzados em instantes próximos, a tensão completou sua transição mais rapidamente. O intervalo entre 10% e 90% da variação foi de 13,1 ms para

a tensão e de 50,1 ms para a corrente. Dessa forma, a resposta da tensão foi aproximadamente 3,82 vezes mais rápida que a resposta da corrente.

A Tabela 5 resume os principais indicadores obtidos na análise conjunta.

Tabela 5 – Indicadores da resposta da tensão e da corrente

Indicador	Tensão	Corrente
Valor extremo durante a falta	0,6587 pu	1,8146 pu
Variação máxima	-34,125%	81,46%
Instante de cruzamento do limiar	1,5033 s	1,5019 s
Tempo de transição entre 10% e 90%	13,1 ms	50,1 ms
Taxa máxima de variação	-23,071 pu/s	46,349 pu/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstram que a tensão fornece uma informação complementar à corrente durante a caracterização do defeito. Essa constatação não significa que a tensão tenha identificado o evento antes da corrente no cenário analisado, visto que os limiares foram cruzados praticamente no mesmo instante. Entretanto, a redução acentuada e a transição mais rápida da tensão evidenciam seu potencial para modificar a sensibilidade de uma função de sobrecorrente com restrição por tensão.

Na função ANSI 51 convencional, a avaliação é realizada exclusivamente a partir da corrente medida. Na função ANSI 51V, o afundamento da tensão reduz a corrente equivalente de ajuste, aumentando a sensibilidade da proteção durante condições de baixa tensão.

Além da análise detalhada do caso com $R_f = 0,01 \Omega$, foram avaliadas resistências de falta de 1, 5 e 10 Ω .

Tabela 6 – Sensibilidade da função 51 no Sistema elétrico 1

Resistência de falta	Tensão média durante a falta	Corrente RMS relativa média	Condição da função 51
0,01 Ω	0,7308 pu	1,7138 pu	Sensibilizada
1 Ω	0,6623 pu	1,3337 pu	Sensibilizada
5 Ω	0,7743 pu	1,3790 pu	Sensibilizada
10 Ω	0,7960 pu	1,4019 pu	Sensibilizada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 6, a corrente RMS relativa permaneceu superior ao pick-up de 1,10 pu em todas as condições avaliadas, indicando que a função 51 convencional foi sensibilizada nos quatro casos simulados.

Dessa forma, no Sistema elétrico 1, a contribuição de corrente observada no PAC foi suficiente para sensibilizar a função 51 convencional em todas as faltas trifásicas analisadas. Embora a redução da tensão também aumentasse a sensibilidade de uma eventual aplicação da função 51V, sua utilização não se mostrou indispensável para a detecção desses casos, uma vez que o ajuste da função 51 já foi superado.

Esse resultado demonstra que a necessidade da restrição por tensão depende das características elétricas do sistema, do ajuste adotado e da contribuição de corrente observada pelo dispositivo de proteção. A vantagem da função 51V será analisada de forma mais evidente no Sistema elétrico 2, no qual a corrente da geração permanece limitada e próxima do valor nominal durante a falta.

4.4 Sistema elétrico 2 — modelo equivalente de minigeração distribuída

O Sistema elétrico 2 foi desenvolvido com o objetivo de representar uma unidade de minigeração fotovoltaica conectada à rede de distribuição em média tensão. Diferentemente do Sistema elétrico 1, que permitiu caracterizar a resposta dinâmica de um modelo mais detalhado, este sistema foi estruturado para analisar separadamente as contribuições de corrente da concessionária e da geração fotovoltaica durante faltas externas ao ramal da usina.

A representação equivalente possibilitou reproduzir uma condição característica das fontes baseadas em inversores, que mesmo diante de faltas capazes de provocar afundamentos significativos de tensão e correntes elevadas no ponto do defeito, a corrente fornecida pela minigeração permanece limitada e próxima de seu valor nominal. Essa condição permite avaliar comparativamente as sensibilidades das funções ANSI 51 e ANSI 51V.

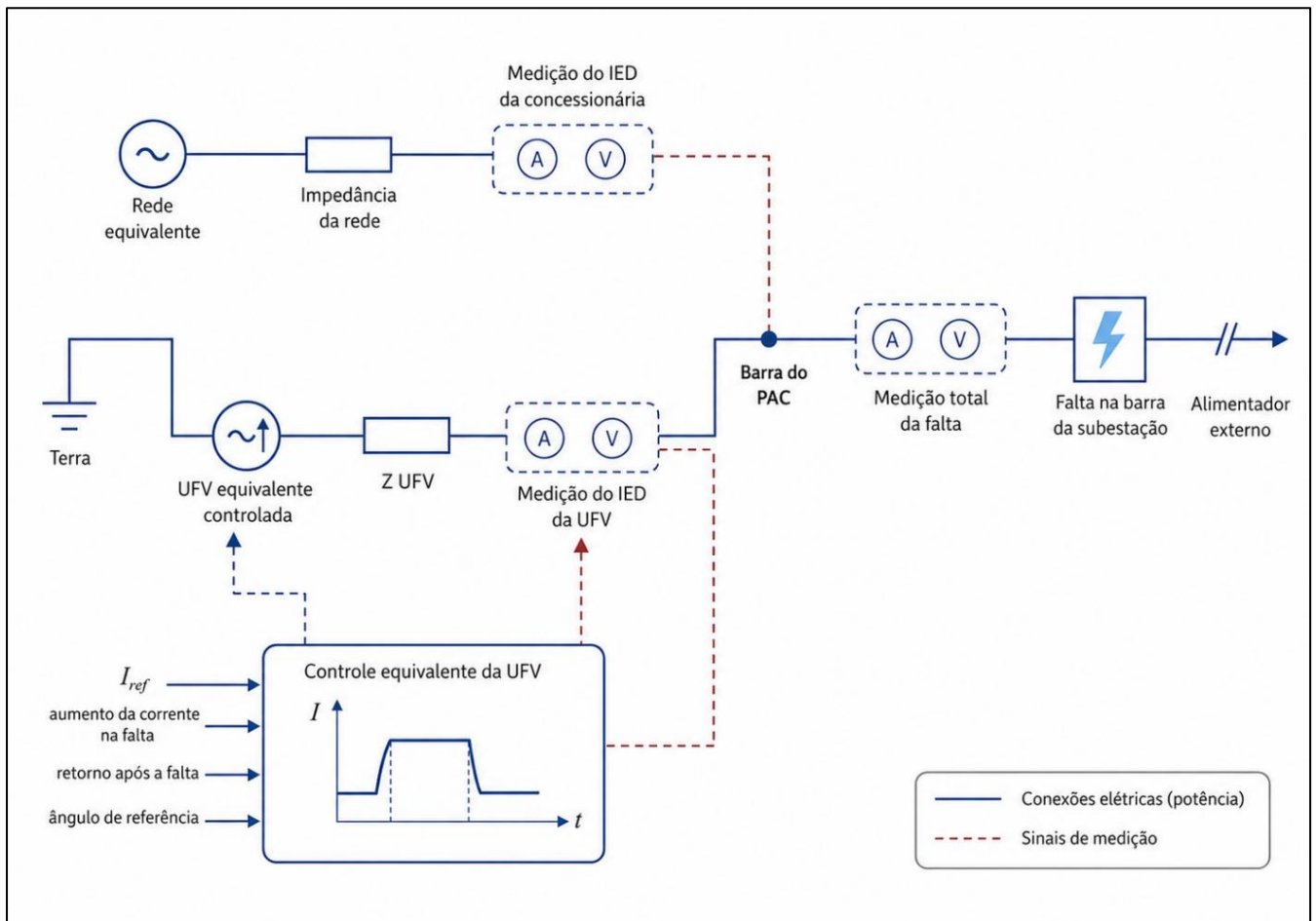
4.4.1 Desenvolvimento e modelagem do sistema elétrico 2

O Sistema elétrico 2 consiste em um modelo equivalente de minigeração distribuída desenvolvido integralmente no MATLAB/Simulink. Sua estrutura representa uma usina fotovoltaica de 4 MW conectada à rede de distribuição em 13,8 kV e foi elaborada com base no sistema elétrico apresentado por Rocha (2025).

A concessionária foi representada por uma fonte trifásica associada à impedância equivalente da rede. A usina fotovoltaica, por sua vez, foi representada por uma fonte trifásica controlada de corrente, permitindo reproduzir, de maneira simplificada, a limitação da contribuição dos inversores durante a ocorrência de curtos-circuitos.

O modelo também contempla o alimentador de conexão da minigeração, a barra da subestação, os elementos utilizados para a aplicação das faltas e os blocos destinados à medição das grandezas elétricas. Os pontos de medição foram posicionados de modo a registrar separadamente a corrente fornecida pela concessionária, a corrente proveniente da minigeração e a corrente total direcionada ao ponto de falta.

Figura 15 – Sistema equivalente de minigeração distribuída desenvolvido no MATLAB/Simulink



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Rocha (2025).

A separação dos pontos de medição permite avaliar a corrente observada pelo dispositivo de proteção instalado no ramal da usina.

4.4.2 Parâmetros do sistema elétrico 2

Os parâmetros do Sistema elétrico 2 foram definidos de modo a representar uma unidade de minigeração fotovoltaica de 4 MW conectada à rede de distribuição em 13,8 kV. A corrente nominal da usina foi calculada considerando a potência nominal e a tensão de conexão, resultando em 167,35 A.

A rede da concessionária foi caracterizada por uma corrente de curto-circuito trifásico de referência de 1,358 kA e por uma relação $X/R = 5$. A partir dessas grandezas, obteve-se uma

impedância equivalente de aproximadamente $5,87 \, \Omega$, composta por uma resistência de $1,15 \, \Omega$ e uma indutância de $0,01526 \, \text{H}$.

Para representar de maneira simplificada a limitação de corrente característica das fontes conectadas à rede por inversores, a fonte controlada associada à usina fotovoltaica foi parametrizada com corrente mínima de $167,35 \, \text{A}$ e corrente máxima de $173,00 \, \text{A}$. O valor máximo corresponde a aproximadamente $1,034 \, \text{pu}$ da corrente nominal da minigeração:

$$I_{\text{UFV,max}} = \frac{173,00}{167,35} = 1,0338 \, \text{pu}$$

Dessa forma, mesmo durante a ocorrência de faltas, a contribuição da usina permanece próxima de seu valor nominal. Esse comportamento permite analisar condições nas quais a função ANSI 51 não alcança seu valor de pick-up, apesar da presença de afundamentos significativos de tensão no ponto de conexão.

Os principais parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais parâmetros do sistema elétrico 2

Parâmetro	Valor adotado
Potência nominal da usina fotovoltaica	4 MW
Tensão nominal de conexão	13,8 kV
Frequência nominal	60 Hz
Corrente nominal da usina fotovoltaica	167,35 A
Corrente máxima da usina fotovoltaica	173 A (1,0338 pu)
Corrente de curto-circuito da rede	1,358 kA
Impedância equivalente da rede	5,87 Ω
Impedância do alimentador	0,587 Ω

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Casos de faltas analisados

Com o objetivo de avaliar o comportamento do Sistema elétrico 2 diante de diferentes condições de curto-circuito, foram simuladas faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas. Em todos os casos, as faltas foram aplicadas no instante de $1,5 \, \text{s}$ e eliminadas em $1,7 \, \text{s}$, correspondendo a uma duração de $200 \, \text{ms}$.

Para as faltas trifásicas, foram adotadas resistências de falta de $1, 5$ e $8 \, \Omega$. A variação da resistência permitiu representar diferentes níveis do defeito e analisar sua influência sobre a tensão no ponto de acoplamento comum e sobre as contribuições de corrente da concessionária

e da minigeração. Esses casos constituem a análise principal para a comparação entre as funções 51 e 51V.

Como análises complementares, foi considerada uma falta bifásica entre as fases B e C, sem envolvimento da terra, com resistência de $0,01 \Omega$, além de faltas monofásicas A–terra e C–terra, com resistências de 5 e 10Ω , respectivamente. Esses casos permitiram avaliar o comportamento das funções diante de defeitos desequilibrados. Os casos selecionados para análise são sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Casos de faltas analisados no Sistema elétrico 2

Tipo de falta	Fases envolvidas	Resistência de falta
Trifásica	A–B–C	1Ω
Trifásica	A–B–C	5Ω
Trifásica	A–B–C	8Ω
Bifásica	B–C	$0,01 \Omega$
Monofásica	A–terra	5Ω
Monofásica	C–terra	10Ω

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante as simulações, foram registradas as tensões no PAC, as correntes fornecidas pela concessionária e pela minigeração e a corrente total direcionada ao ponto de falta. Nas faltas trifásicas, essas grandezas foram utilizadas diretamente na comparação entre as funções estudadas. A falta bifásica foi empregada como análise complementar do comportamento do sistema diante de uma condição desequilibrada.

4.4.4 Resultados e avaliação das funções 51 e 51V

Os resultados obtidos foram analisados considerando a corrente fornecida pela minigeração e a tensão medida no PAC. Embora a corrente total direcionada ao defeito também inclua a contribuição da concessionária, a avaliação das funções de proteção foi realizada a partir das grandezas observadas no ramal da usina fotovoltaica.

Tabela 9 – Ajustes adotados para a avaliação das funções ANSI 51 e ANSI 51V

Parâmetro	Valor adotado
Corrente-base da minigeração	167,35 A
Pick-up da função ANSI 51	1,10 pu (184,09 A)
Pick-up nominal da função ANSI 51V	1,10 pu
Fator mínimo de restrição $K_{mín}$	0,40
Critério de sensibilização	$(M \geq 1)$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a função ANSI 51, o múltiplo de sensibilização foi determinado pela relação entre a corrente medida e a corrente de pick-up. Na função ANSI 51V, o limiar de corrente foi modificado em função da tensão medida na fase correspondente, conforme a expressão apresentada no Capítulo 2. Em ambas as funções, valores de múltiplo iguais ou superiores à unidade foram considerados indicativos de sensibilização.

Inicialmente, são apresentados os resultados das faltas trifásicas, utilizadas como análise principal da comparação entre as funções. Em seguida, discute-se a falta bifásica B–C, empregada como análise complementar do comportamento do sistema diante de um defeito desequilibrado.

Exemplo de cálculo das margens de sensibilização

Para demonstrar a aplicação dos critérios adotados, realizou-se o cálculo das margens de sensibilização para a falta trifásica com resistência de 8Ω . Nesse caso, foi considerada a tensão com valor de 0,76197 pu e o valor da corrente fornecida pela minigeração de 1,0337 pu. Para fins comparativos, considerou-se um ajuste de pick-up de 1,10 pu e fator mínimo de restrição por tensão $K_{\min} = 0,40$.

Para a função 51 convencional, a margem de sensibilização foi calculada por:

$$M_{51} = \frac{I_{\text{RMS}}}{I_{\text{pickup}}}$$

Assim:

$$M_{51} = \frac{1,0337}{1,10} = 0,9397$$

Como $M_{51} < 1$, o limiar de sensibilização da função 51 não foi alcançado para o ajuste considerado.

Para a função 51V, o pick-up equivalente foi calculado por:

$$I_{\text{pickup,eq}} = I_{\text{pickup}}[K_{\min} + (1 - K_{\min})V_{\text{pu}}]$$

Substituindo os valores:

$$I_{\text{pickup,eq}} = 1,10[0,40 + 0,60 \times 0,76197]$$

$$I_{\text{pickup,eq}} \approx 0,9429 \text{ pu}$$

A margem correspondente à função 51V foi, portanto:

$$M_{51V} = \frac{1,0337}{0,9429} \approx 1,0963$$

Como $M_{51V} > 1$, o limiar de sensibilização da função 51V foi alcançado analiticamente. O afundamento de tensão reduziu o valor equivalente de pick-up, permitindo que a corrente limitada da minigeração superasse o limiar ajustado.

Resultado das faltas trifásicas

Nas faltas trifásicas, a corrente fornecida pela minigeração permaneceu praticamente constante, próxima ao limite máximo estabelecido para a fonte controlada. Em contrapartida, o aumento da resistência de falta reduziu o nível do afundamento de tensão no ponto de acoplamento comum. Esse comportamento permitiu avaliar a influência da tensão sobre a sensibilidade da função ANSI 51V.

A função ANSI 51 foi avaliada considerando um pick-up de 1,10 pu. Como a corrente fornecida pela minigeração permaneceu próxima de 1,034 pu nos três casos analisados, o múltiplo de sensibilização da função manteve-se inferior à unidade. **Consequentemente, a função ANSI 51 não foi sensibilizada em nenhuma das faltas trifásicas.**

Para a função ANSI 51V, o limiar equivalente de corrente foi calculado em função da tensão medida durante cada falta. A Tabela 10 apresenta os valores obtidos e as condições de sensibilização das duas funções.

Tabela 10 – Avaliação das funções ANSI 51 e ANSI 51V nas faltas trifásicas

<i>R_f</i>	<i>V_{falta}</i>	<i>I_{planta}</i>	<i>M₅₁</i>	<i>Pickup equivalente 51V</i>	<i>M_{51V}</i>	<i>Resultado</i>
1 Ω	0,16826 pu	1,0338 pu	0,9398	0,5511 pu	1,8760	Somente 51V sensibilizada
5 Ω	0,59391 pu	1,0338 pu	0,9398	0,8320 pu	1,2425	Somente 51V sensibilizada
8 Ω	0,76197 pu	1,0337 pu	0,9397	0,9429 pu	1,0963	Somente 51V sensibilizada

Fonte: Elaborado pelo autor.

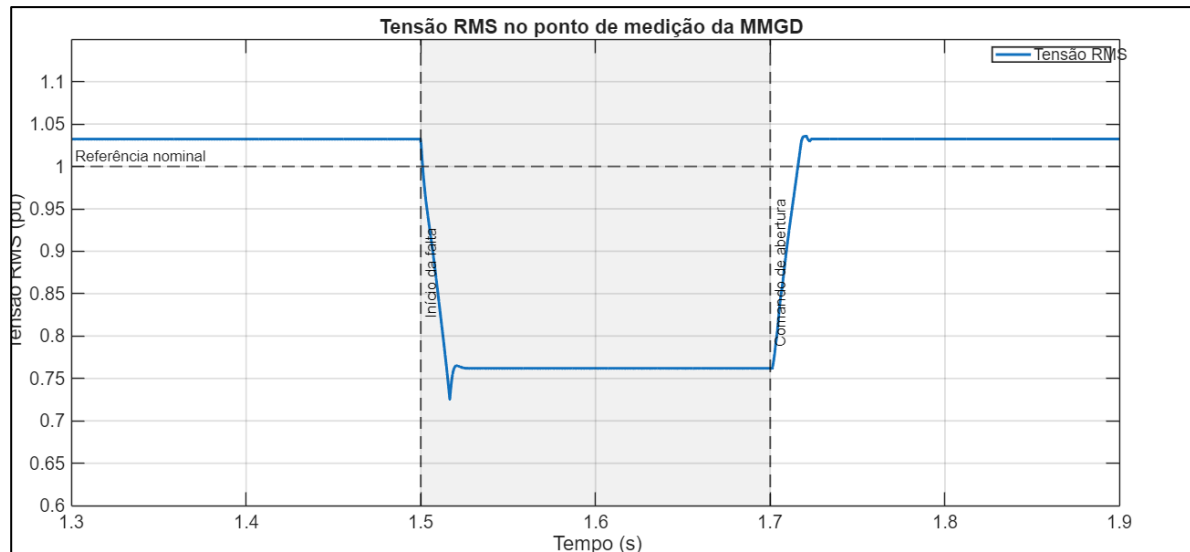
Para a resistência de falta de 1 Ω , a tensão no ponto de acoplamento comum foi reduzida para 0,1683 pu. Nessa condição, o pick-up equivalente da função ANSI 51V diminuiu para 0,5511 pu, resultando em um múltiplo de sensibilização de 1,8760. Assim, embora a corrente da minigeração permanecesse abaixo do ajuste da função ANSI 51, a função ANSI 51V foi sensibilizada em razão do afundamento acentuado de tensão.

Para a resistência de 5 Ω , a tensão durante a falta foi de 0,5939 pu. Nessa condição, o pick-up equivalente da função ANSI 51V foi reduzido para 0,8320 pu e o múltiplo de sensibilização atingiu 1,2425. Dessa forma, a função ANSI 51 permaneceu não sensibilizada, enquanto a função ANSI 51V foi sensibilizada nas três fases.

Na falta com resistência de 8 Ω , a tensão durante o defeito foi de 0,7620 pu e o pick-up equivalente da função ANSI 51V foi reduzido para 0,9429 pu. Como a corrente fornecida pela minigeração permaneceu em 1,0337 pu, obteve-se um múltiplo de 1,0963, suficiente para sensibilizar a função ANSI 51V. A função ANSI 51, novamente, permaneceu não sensibilizada.

Entre as condições avaliadas, a falta trifásica com resistência de 8 Ω foi selecionada para a apresentação das formas de onda por representar uma situação intermediária, na qual a corrente da minigeração permaneceu abaixo do pick-up da função ANSI 51, enquanto o afundamento de tensão foi suficiente para sensibilizar a função ANSI 51V. As Figuras 16 a 18 apresentam o comportamento das tensões e correntes nesse caso.

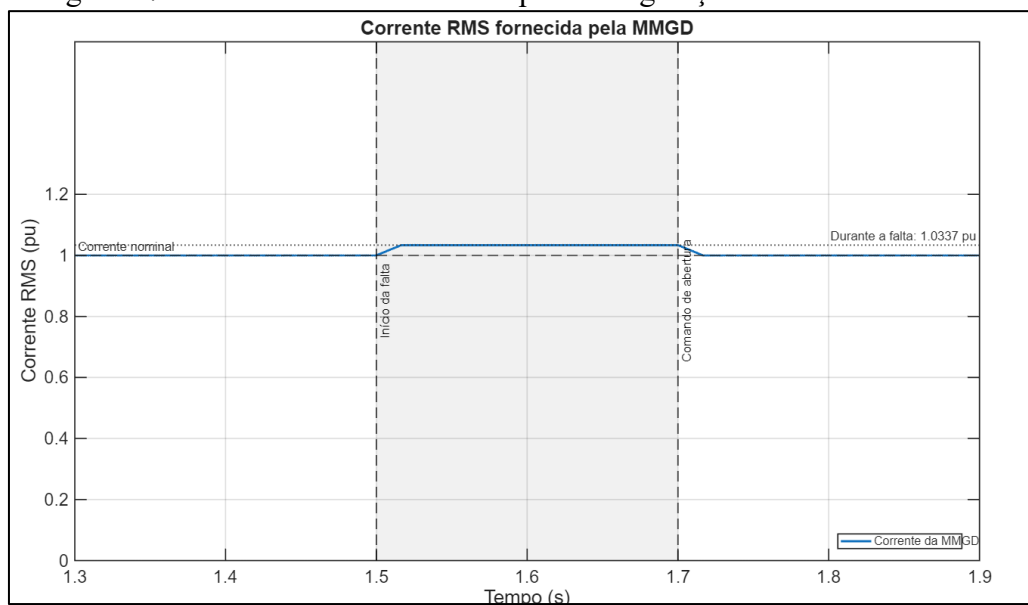
Figura 16 – Tensão RMS no PAC durante a falta trifásica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes da falta, a tensão apresentou valor médio de 1,032 pu. Durante o defeito, estabilizou-se em aproximadamente 0,761 pu, correspondendo a uma redução de 26,19% em relação à condição pré-falta. O valor mínimo transitório foi de 0,725 pu.

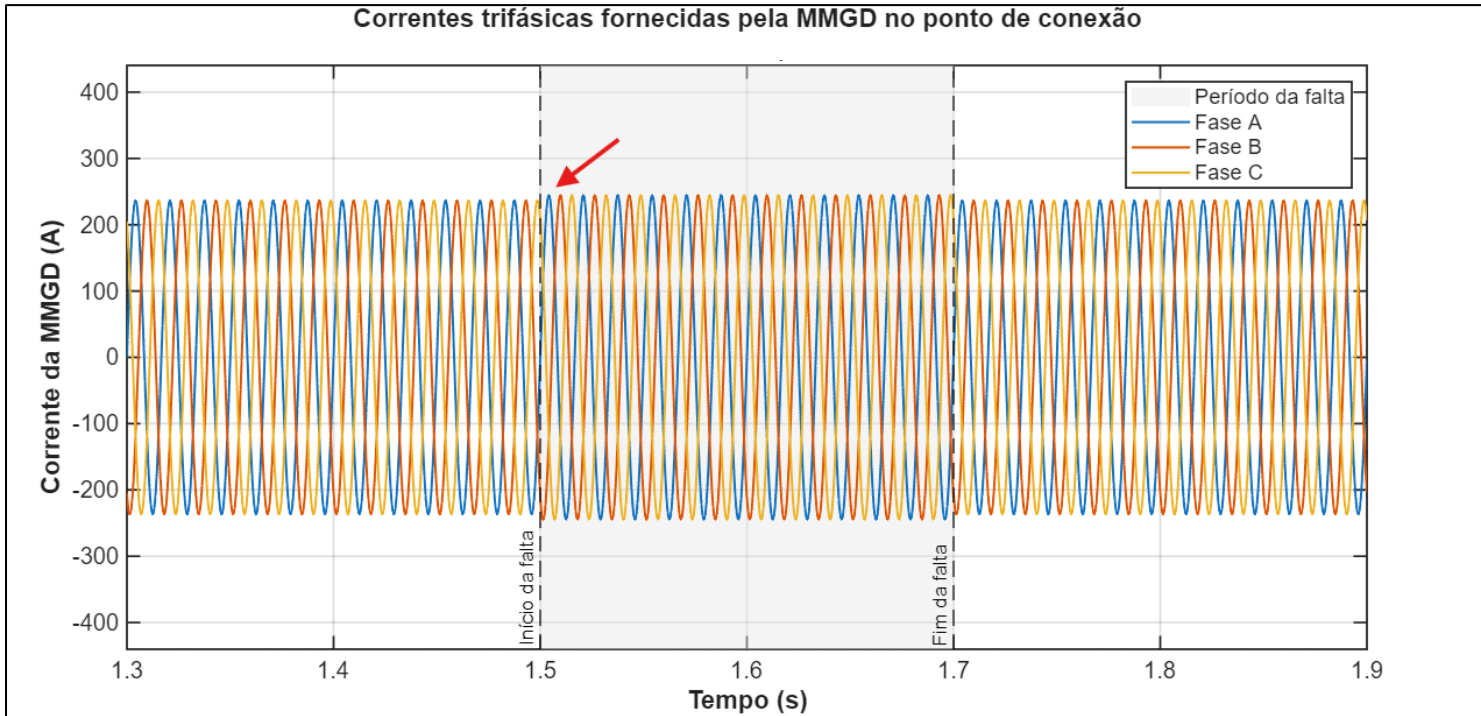
Figura 17 – Corrente RMS fornecida pela minigeração durante a falta trifásica



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento observado foi de aproximadamente 3,4% em relação à condição pré-falta. Portanto, mesmo com o afundamento de tensão apresentado anteriormente, a contribuição da geração fotovoltaica permaneceu próxima de sua corrente nominal.

Figura 18 – Correntes instantâneas trifásicas fornecidas pela minigeração



Fonte: Elaborado pelo autor.

No período da falta, a minigeração forneceu aproximadamente 172,99 A por fase, valor pouco superior à sua corrente nominal de 167,35 A. No mesmo intervalo, a concessionária contribuiu com cerca de 606,51 A por fase, enquanto a corrente total direcionada ao ponto de falta atingiu aproximadamente 758,77 A por fase.

Esses resultados evidenciam que o dispositivo de proteção instalado no ramal da planta mede apenas a contribuição fornecida pela própria geração, e não a corrente total do curto-circuito. Assim, embora a corrente no ponto de falta seja elevada, o relé da minigeração permanece submetido a uma corrente próxima do valor nominal. Essa característica pode reduzir a sensibilidade da função 51 convencional diante de faltas externas.

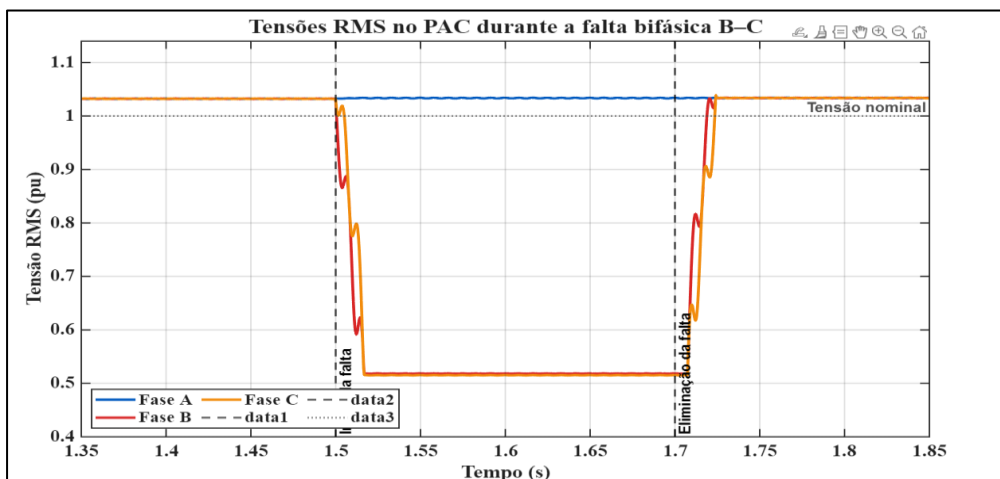
Resultados da falta bifásica

Como análise complementar, simulou-se uma falta bifásica entre as fases B e C, sem envolvimento da terra e com resistência de $0,01 \Omega$. O defeito foi aplicado em 1,5 s e eliminado em 1,7 s, mantendo-se os parâmetros elétricos e os ajustes de proteção adotados anteriormente.

A Figura 19 apresenta as tensões RMS no PAC. Durante a falta, as tensões das fases B e C foram reduzidas para 0,5184 pu e 0,5151 pu, respectivamente, enquanto a fase A

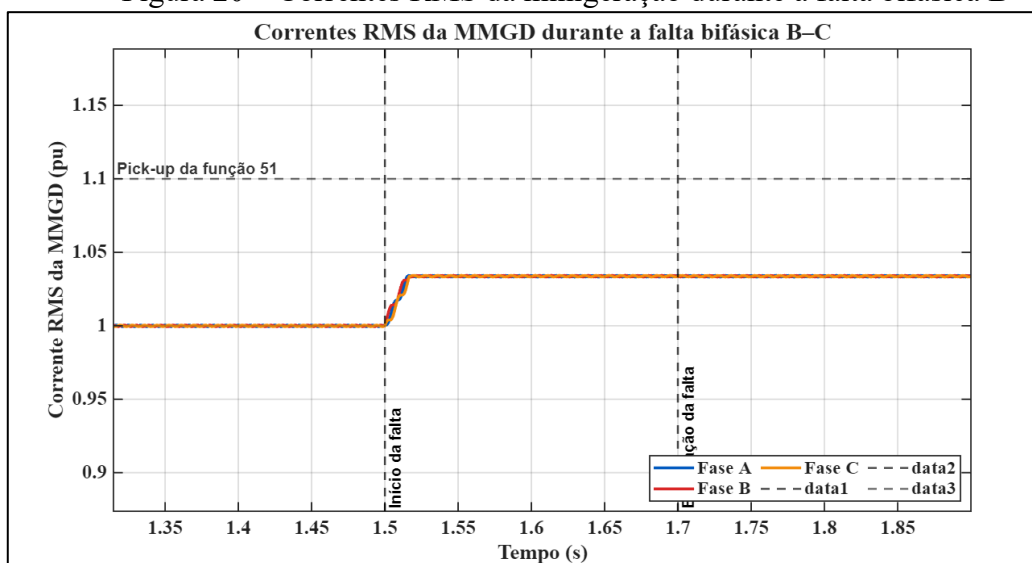
permaneceu em 1,0335 *pu*. O comportamento evidencia o caráter assimétrico do defeito e o afundamento concentrado nas fases envolvidas.

Figura 19 – Tensões RMS no PAC durante a falta bifásica B–C



Apesar do afundamento expressivo de tensão, a corrente fornecida pela minigeração permaneceu limitada em aproximadamente 173 A, equivalente a 1,034 *pu*, nas três fases. Conforme mostra a Figura 20, esse valor permaneceu abaixo do ajuste de 1,10 *pu* da função 51.

Figura 20 – Correntes RMS da minigeração durante a falta bifásica B–C

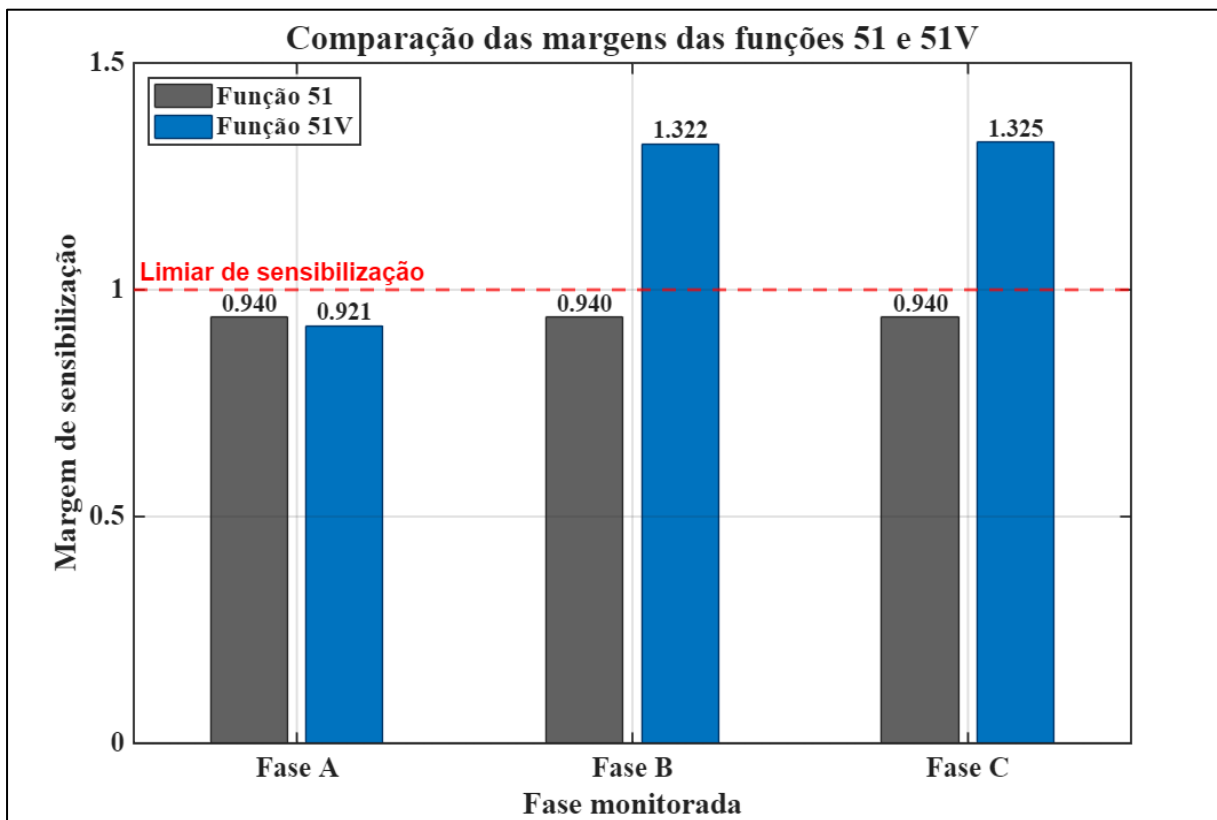


A corrente residual permaneceu praticamente nula na minigeração, na concessionária e no ponto de falta. Esse resultado é coerente com uma falta bifásica sem contato com a terra, na

qual as correntes das fases defeituosas circulam em sentidos opostos e não há caminho significativo para corrente de sequência zero.

A comparação apresentada na Figura 21 demonstra que a função 51 convencional não atingiu a condição analítica de sensibilização. Suas margens permaneceram próximas de 0,94 nas três fases. Na função 51V, entretanto, o afundamento de tensão reduziu o pick-up equivalente para 0,7822 pu na fase B e 0,7800 pu na fase C. Consequentemente, as margens nessas fases aumentaram para 1,3217 e 1,3253, respectivamente, superando o limiar unitário. Na fase A, que não sofreu afundamento significativo, a margem permaneceu abaixo de 1.

Figura 21 – Comparação das margens das funções 51 e 51V na falta bifásica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentam concordância com Rocha (2025), principalmente quanto ao afundamento próximo de 0,5 pu nas fases defeituosas, à limitação da corrente fotovoltaica e à ausência de corrente residual. Como limitação, o modelo equivalente empregado mantém as correntes da minigeração praticamente equilibradas e não representa integralmente os controles de sequência positiva e negativa dos inversores. Ainda assim, a simulação demonstra que a restrição por tensão amplia a sensibilidade da proteção diante de uma falta bifásica que não seria identificada pelo critério de sobrecorrente convencional adotado.

Resultados complementares – Falta monofásicas

De forma complementar, foram simuladas faltas monofásicas à terra nas fases A e C. A Tabela 11 reúne apenas as grandezas observadas nas fases afetadas, uma vez que as fases sãs permaneceram próximas de 1 pu e não alcançaram o limiar de sensibilização da função 51V.

Tabela 11 – Avaliação das funções ANSI 51 e ANSI 51V nas faltas monofásicas

Falta	R_f	$V_{falta}(pu)$	$I_{planta}(pu)$	M_{51V}	Resultado
A–terra	5 Ω	0,59398	1,03375	1,2425	Somente 51V sensibilizada
C–terra	10 Ω	0,79012	1,03374	1,0752	Somente 51V sensibilizada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambos os ensaios, a corrente fornecida pela minigeração permaneceu limitada a aproximadamente 1,034 pu. Como esse valor foi inferior ao *pick-up* de 1,10 pu, a margem da função 51 permaneceu próxima de 0,94, não alcançando o limiar de sensibilização. Esse comportamento reforça a limitação da proteção de sobrecorrente convencional diante da contribuição de corrente controlada pelos inversores.

Para a função 51V, a redução da tensão na fase afetada diminuiu o *pick-up* equivalente e permitiu sua sensibilização. Na falta A–terra com $R_f = 5 \Omega$, a tensão foi reduzida para 0,59398 pu, resultando em *pick-up* equivalente de 0,8320 pu e margem $M_{51V} = 1,2425$. Na falta C–terra com $R_f = 10 \Omega$, o afundamento foi menos acentuado, com tensão de 0,79012 pu, *pick-up* equivalente de 0,9615 pu e margem $M_{51V} = 1,0752$. Portanto, embora a 51V tenha sido sensibilizada nos dois casos, o ensaio com maior resistência de falta apresentou menor margem em relação ao limiar unitário.

4.5 Análise comparativa dos sistemas elétricos

Os dois sistemas elétricos simulados apresentaram comportamentos distintos durante a ocorrência das faltas. Enquanto o Sistema elétrico 1 foi utilizado para representar uma condição em que a corrente de curto-circuito apresentou elevação significativa, o Sistema elétrico 2 permitiu avaliar uma condição mais crítica para a proteção de sobrecorrente, caracterizada pela limitação da corrente fornecida pela minigeração.

No Sistema elétrico 1, a falta trifásica temporária provocou uma elevação expressiva das correntes no ponto de medição. Nessas condições, a corrente ultrapassou o pick-up estabelecido, possibilitando a sensibilização da função ANSI 51. Esse comportamento corresponde à situação convencionalmente considerada na aplicação da proteção de sobrecorrente, na qual o defeito é identificado principalmente pelo aumento da corrente medida.

No Sistema elétrico 2, por outro lado, a corrente fornecida pela minigeração permaneceu limitada a aproximadamente 1,034 pu, mesmo diante de afundamentos significativos de tensão. Como esse valor permaneceu abaixo do pick-up de 1,10 pu adotado na análise, a função ANSI 51 não foi sensibilizada nos casos utilizados para a comparação principal. Esse resultado demonstra que a magnitude da corrente fornecida por uma fonte baseada em inversores pode não representar, isoladamente, a severidade do defeito observado no sistema.

Durante os afundamentos de tensão, o limiar equivalente de sensibilização foi reduzido, permitindo que a corrente limitada da minigeração superasse o valor ajustado. Isso ocorreu nas faltas trifásicas com resistências de 1, 5 e 8 Ω , nas fases B e C da falta bifásica B–C com resistência de 0,01 Ω e nas fases afetadas das faltas monofásicas complementares.

Os resultados também demonstraram que a melhoria proporcionada pela restrição por tensão não é constante para todas as faltas. A sensibilização da função 51V depende da relação entre a corrente medida, a tensão durante o defeito, o pick-up nominal e o fator mínimo de restrição $K_{\min}$. Nas faltas desequilibradas, essa avaliação deve ser realizada individualmente para cada fase, associando-se a corrente medida à respectiva tensão de fase.

A comparação não deve ser interpretada como uma equivalência direta entre os dois sistemas, uma vez que eles possuem configurações e finalidades distintas. O Sistema elétrico 1 evidencia o comportamento da proteção diante de uma corrente de falta suficientemente elevada, enquanto o Sistema elétrico 2 representa a condição de maior interesse para este trabalho, que é a ocorrência de afundamento de tensão acompanhada por uma contribuição de corrente limitada pela minigeração. Portanto, os **sistemas são complementares e permitem demonstrar tanto a condição convencional de sensibilização da função ANSI 51 quanto a condição em que a utilização da função ANSI 51V se torna vantajosa.**

Esse comportamento está de acordo com a discussão desenvolvida nos capítulos anteriores acerca da proteção de instalações com geração baseada em inversores. Os documentos técnicos das distribuidoras analisados indicam a aplicação da função ANSI 51V em determinados sistemas de minigeração, especialmente como recurso complementar à proteção de sobrecorrente convencional. Os resultados computacionais obtidos neste trabalho fornecem uma justificativa técnica para essa aplicação, pois demonstram que a redução do

limiar em função da tensão pode ampliar a sensibilidade da proteção quando a corrente de falta permanece próxima da corrente nominal da geração.

De maneira geral, a análise comparativa mostrou que a função ANSI 51 permanece adequada quando a corrente medida supera claramente o pick-up estabelecido. Entretanto, em sistemas com geração baseada em inversores, a limitação da corrente pode impedir sua sensibilização, mesmo na presença de afundamentos relevantes de tensão. Nessas condições, a função ANSI 51V pode ampliar a capacidade de identificação do defeito, desde que seus parâmetros sejam definidos considerando as características da instalação e a coordenação com as demais funções de proteção.

4.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou as simulações computacionais realizadas para avaliar o comportamento das funções ANSI 51 e ANSI 51V em diferentes condições de falta. Os dois sistemas elétricos utilizados permitiram analisar situações complementares, uma condição convencional, caracterizada pela elevação significativa da corrente de curto-circuito, e outra representativa de uma minigeração fotovoltaica cuja contribuição de corrente permaneceu limitada durante os defeitos.

No Sistema elétrico 1, a corrente de falta ultrapassou o pick-up estabelecido, permitindo a sensibilização da função ANSI 51. No Sistema elétrico 2, entretanto, a corrente fornecida pela minigeração permaneceu próxima de seu valor nominal e abaixo do ajuste de 1,10 pu. Nessa condição, a função ANSI 51 convencional não foi sensibilizada nos casos empregados na comparação principal, mesmo diante de afundamentos relevantes de tensão.

A inclusão da restrição por tensão ampliou a sensibilidade da proteção nas condições analisadas. A função ANSI 51V foi sensibilizada nas faltas trifásicas com resistências de 1, 5 e 8 Ω , nas fases B e C da falta bifásica B–C com resistência de 0,01 Ω e nas fases afetadas das faltas monofásicas complementares, enquanto a função ANSI 51 permaneceu não sensibilizada nesses ensaios do Sistema elétrico 2.

Os estudos também fornecem fundamentação técnica para o panorama normativo apresentado na Tabela 2. A minigeração simulada possui potência de 4 MW e se enquadra nas faixas em que distribuidoras como Enel SP, CPFL Paulista, Energisa, Light e Equatorial Goiás preveem explicitamente a função 51V. Em outras distribuidoras, como CEMIG-D, COPEL-DIS e empresas do Grupo Neoenergia, sua aplicação permanece condicionada aos estudos de proteção e às características do projeto.

A comparação demonstra que os limites de potência estabelecidos pelas distribuidoras definem principalmente quando a aplicação da 51V deve ser considerada, mas não determinam isoladamente sua eficácia. Para uma mesma potência instalada, a função foi sensibilizada em algumas condições de falta e não em outras. Portanto, sua parametrização deve considerar o nível de tensão durante o defeito, a resistência da falta, a limitação de corrente dos inversores e a coordenação com os demais elementos de proteção.

Conclui-se que a 51V constitui um recurso relevante para recuperar a sensibilidade perdida pela proteção 51 em sistemas com geração baseada em inversores. Contudo, ela não deve ser tratada como solução isolada. Sua aplicação deve integrar um esquema coordenado com funções como 27, 59, 46, 47 e elementos direcionais, conforme a topologia do sistema e os critérios definidos pela distribuidora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou a aplicação da função de sobrecorrente com restrição por tensão (ANSI 51V) em circuitos de média tensão com presença de minigeração distribuída baseada em inversores. A investigação reuniu os fundamentos da proteção de sobrecorrente, a revisão da literatura, a análise de documentos técnicos de distribuidoras brasileiras e a realização de simulações computacionais no MATLAB/Simulink. Essa abordagem permitiu relacionar as características das fontes baseadas em inversores às limitações da função ANSI 51 convencional e às possibilidades de aplicação da função ANSI 51V como recurso complementar de proteção.

A fundamentação teórica e a revisão da literatura mostraram que a inserção da minigeração distribuída pode modificar o comportamento das redes de distribuição durante condições de falta. Em especial, os conversores eletrônicos empregados nas fontes baseadas em inversores podem limitar a corrente fornecida durante o defeito, fazendo com que sua magnitude permaneça próxima do valor nominal da geração. Nessas condições, a corrente medida pode não superar o pick-up da função ANSI 51, mesmo diante de uma condição anormal no sistema. A utilização da tensão como grandeza complementar permite reduzir o pick-up equivalente durante o afundamento de tensão, podendo ampliar a sensibilidade da proteção.

Os resultados computacionais confirmaram que o desempenho das funções depende das características do sistema elétrico e da resposta das grandezas durante a falta. No primeiro sistema avaliado, a corrente de falta apresentou magnitude suficiente para sensibilizar a função ANSI 51 convencional. Nesse caso, a utilização da tensão como grandeza complementar não representou uma vantagem determinante, evidenciando que a função ANSI 51 permanece adequada quando a corrente medida supera o limiar ajustado.

No segundo sistema elétrico, desenvolvido para representar uma minigeração distribuída baseada em inversores e conectada em média tensão, a contribuição de corrente da geração permaneceu limitada. Esse comportamento impediu que a função ANSI 51 alcançasse a condição de sensibilização para o ajuste adotado. A função ANSI 51V, por sua vez, apresentou maior sensibilidade nas faltas em que o afundamento de tensão foi suficiente para reduzir o pick-up equivalente. Nas faltas assimétricas, a avaliação individual das fases também se mostrou importante, pois o comportamento das grandezas pode variar entre as fases envolvidas e as não envolvidas no defeito.

Portanto, verificou-se que o desempenho da função ANSI 51V depende da relação entre a corrente fornecida pelo inversor, a tensão durante o defeito e os parâmetros adotados na

proteção, especialmente o pick-up nominal e o fator mínimo de restrição. Dessa forma, a função ANSI 51V deve ser compreendida como um recurso adicional de sensibilidade para situações específicas, e não como substituta da função ANSI 51 ou como solução isolada para todas as condições de falta.

A análise dos documentos técnicos das distribuidoras brasileiras mostrou que a aplicação da função 51V é prevista de maneiras distintas, podendo estar associada à potência instalada, ao nível de tensão da conexão ou aos resultados de estudos específicos. Os resultados deste trabalho fornecem fundamentação técnica para essa abordagem, uma vez que a potência da central geradora, isoladamente, não determina o desempenho da proteção. A decisão sobre sua aplicação deve considerar a topologia da rede, as características dos inversores, os níveis de curto-circuito, os tipos de falta, o comportamento da tensão e a coordenação com as demais funções de proteção.

Dessa forma, considera-se que o objetivo proposto foi alcançado. A função ANSI 51V mostrou-se capaz de ampliar a sensibilidade da proteção em situações nas quais a limitação da corrente fornecida pela minigeração comprometeu a sensibilização da função ANSI 51. A principal contribuição deste trabalho consiste em integrar os aspectos teóricos, técnicos e computacionais relacionados à aplicação da função ANSI 51V no contexto da minigeração distribuída baseada em inversores e conectada em média tensão, evidenciando tanto as condições em que sua utilização pode ser vantajosa quanto as limitações que devem ser consideradas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se validar os resultados em relés comerciais ou em ambientes de simulação em tempo real, ampliar a análise para diferentes topologias de rede e estratégias de controle dos inversores e realizar estudos completos de coordenação e temporização. Esses estudos devem avaliar especialmente a atuação conjunta das funções 27, 59, 51 e 51V, considerando as curvas de tempo, os ajustes de pick-up, a duração das VTCDs e os requisitos de suportabilidade da geração. Também podem ser investigados diferentes valores do fator mínimo de restrição da 51V e condições de faltas assimétricas. Essas análises permitirão verificar em quais cenários a 51V pode proporcionar uma resposta mais rápida sem comprometer a seletividade e a coordenação com as demais funções de proteção.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 16 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL nº 956, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2021.

CELESC DISTRIBUIÇÃO. **I-432.0004: requisitos para a conexão de micro ou minigeradores de energia ao sistema elétrico da Celsc Distribuição**. Florianópolis: Celsc Distribuição, [s. d.].

CEMIG DISTRIBUIÇÃO. **ND 5.31: requisitos para a conexão de acessantes produtores de energia elétrica ao sistema de distribuição Cemig – conexão em média tensão**. Belo Horizonte: Cemig Distribuição, [s. d.].

COPEL DISTRIBUIÇÃO. **NTC 905200: acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da Copel**. Curitiba: Copel Distribuição, [s. d.].

CPFL PAULISTA. **GED-15303: conexão de micro e minigeração distribuída sob sistema de compensação de energia elétrica**. Campinas: CPFL Energia, [s. d.].

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, 2021.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Especificação técnica nº 0005: conexão de central geradora ao sistema de distribuição**. São Paulo: Enel Distribuição São Paulo, [s. d.].

ENERGISA. **NDU-015: critérios para a conexão de acessantes de geração distribuída ao sistema de distribuição para conexão em média tensão**. [S. l.]: Energisa, versão 8.0, [s. d.].

EQUATORIAL GOIÁS. **NT.00020.EQT: requisitos para conexão de microgeração e minigeração distribuída**. Goiânia: Equatorial Goiás, [s. d.].

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std C37.2-2022: IEEE standard for electrical power system device function numbers, acronyms, and contact designations**. New York: IEEE, 2022.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std C37.112-2018: IEEE standard for inverse-time characteristic equations for overcurrent relays**. New York: IEEE, 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60255-151:2009: measuring relays and protection equipment – Part 151: functional requirements for over/under current protection**. Geneva: IEC, 2009.

LEÃO, Viviane Stefany dos Santos. **Análise impactual da rede de geração distribuída: uma perspectiva da proteção elétrica**. 2024. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

LIGHT. **Informação Técnica DTE/DTP: acesso de micro e minigeração distribuída em instalações até 36,2 kV**. Rio de Janeiro: Light, [s. d.].

MATHWORKS SIMSCAPE TEAM. **Renewable Energy Integration Design with Simscape**. Versão 25.2.1.3. Natick: MathWorks, 2026. Inclui o modelo BatteryStoragePVPlantGFM.slx e os scripts BatteryStoragePVPlantGFMPParameters.m, BatteryStoragePVPlantGFMSettingScenario.m e BatteryStoragePVPlantGFMplot.m. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/123870-renewable-energy-integration-design-with-simscape>. Acesso em: 16 jul. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Ranking oficial das dez maiores distribuidoras brasileiras por número de unidades consumidoras**. Brasília, DF: MME, [s. d.].

MISHRA, Priyanka; PRADHAN, Ashok Kumar; BAJPAI, Prabodh. **Adaptive voltage restrained overcurrent relaying for protection of distribution system with PV plant**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS (ICPS), 9., 2021. Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ICPS52420.2021.9670077.

MÖBLANG, Benjamin Lukas. **Voltage dependent overcurrent protection in microgrids with a high penetration of grid-forming inverters**. 2022. Master's Thesis – Graz University of Technology, Graz, fev. 2022.

NEOENERGIA COELBA. **DIS-NOR-033: requisitos para conexão de geradores em paralelo com o sistema elétrico de distribuição em média tensão**. Salvador: Neoenergia Coelba, [s. d.].

NEOENERGIA PERNAMBUCO. **DIS-NOR-033: requisitos para conexão de geradores em paralelo com o sistema elétrico de distribuição em média tensão**. Recife: Neoenergia Pernambuco, [s. d.].

RAHMAN, Alvin Harista; NAHOR, Kevin Marojahan Banjar; HARIYANTO, Nanang. **Analysis of 50/51V relay coordination for reliable protection in hybrid renewable**

microgrids: a case of small island power systems in Indonesia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND POWER SYSTEMS (ICHVEPS), 5., 2025. Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2025. DOI: 10.1109/ICHVEPS66913.2025.11351261.

RAI, Jitendra Nath; SINGH, Ajendra; AARTI; et al. **Overcurrent relay using voltage control.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL PERFORMANCE EVALUATION (ComPE), 2021, Shillong. Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ComPE53109.2021.9752206.

ROCHA, Rodolfo. **A importância das proteções 51V, 59 e 27 em arranjos fotovoltaicos e possibilidades de rearme automático por retorno de tensão: uma abordagem baseada nos comportamentos das tensões.** Americana: S&R Energy, fev. 2025. Artigo técnico, documento nº 003/2025.

RODRIGUES, Israel Resende Alves. **Estudo de proteção elétrica de uma microrrede baseada na rede de 34 barras do IEEE.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SALLES, Newton José de. **Modelagem multiambiente de sistemas de proteção para ilhamento intencional de geradores síncronos distribuídos.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SOUSA, Ryan Floriani Serafim de. **Avaliação da confiabilidade do sistema de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos.** 2024. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2024.