



ABORDAGEM PRÁTICA DE PROTEÇÃO PARA INTEGRAÇÃO DE USINA SOLAR FOTOVOLTAICA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO SOBRECARGADA

PROTECTIVE STRATEGIES FOR INTEGRATING PHOTOVOLTAIC SOLAR PLANTS INTO OVERLOADED DISTRIBUTION GRIDS

Autores: Gilmar da Cunha Valangelis Júnior ¹, Bartolomeu Ferreira dos Santos Júnior ², Aryfrance Rocha Almeida ³

¹ Universidade Federal do Piauí (UFPI), – gilmar.junior@ufpi.edu.br; bartolomeuf@ufpi.edu.br; aryfrance@ufpi.edu.br;

RESUMO

Este trabalho investiga o impacto da integração de uma usina solar fotovoltaica de 372,4 kWp na proteção e seletividade de uma rede de distribuição de energia elétrica submetida a condições de sobrecarga. A usina está conectada a uma subestação com potência de 500 kVA, e o foco do estudo é a coordenação das proteções, com base em dados de curto-circuito de uma rede convencional, visando à elaboração de um estudo de proteção coordenado e seletivo, que possibilite a adequada parametrização do relé de proteção e evite prejuízos nos indicadores de continuidade da distribuidora. Além disso, o sistema foi modelado e simulado no software ATPDraw, com o objetivo de analisar os efeitos da integração da usina na qualidade da energia elétrica fornecida.

Palavras-chave: Impacto na rede; Proteção e seletividade; Usina fotovoltaica; Qualidade de energia.

ABSTRACT

This work investigates the impact of integrating a 372.4 kWp photovoltaic (PV) plant on the protection and selectivity of an electric power distribution network under overload conditions. The plant is connected to a 500 kVA substation, and the study focuses on protective coordination based on short-circuit data from a conventional network, with the aim of developing a coordinated and selective protection study that enables proper protection-relay parameterization and prevents deterioration in the utility's continuity indices. In addition, the system was modeled and simulated in ATPDraw to analyze the effects of the plant's integration on power quality.

Keywords: Impact on the network; Protection and selectivity; Photovoltaic power plant; Power quality.

1 INTRODUÇÃO

As fontes renováveis aumentam a complexidade do sistema elétrico e impactam os esquemas de proteção. Proteções convencionais podem falhar ou operar de forma incorreta quando há muita geração renovável conectada (GANDHI et al., 2023).

Uma consequência importante disso é a redução da inércia no sistema e alterações nos perfis de corrente de falta. Geradores convencionais contribuem com inércia rotacional, que ajuda a amortecer a resposta do sistema até que controles e proteções reajam. Fontes renováveis baseadas em inversores têm participação pequena ou nenhuma nessa inércia natural, o que significa que as faltas podem se propagar mais rápido, exigindo proteções mais sensíveis (TAYLOR; DHAR; DHANJAL, 2019).

No que se refere à curva de atuação adotada no estudo, é fundamental verificar qual é a mais utilizada pela concessionária local. Isso evita divergências na proteção e possíveis reprovações no Estudo de Viabilidade Técnica (EVT). A curva padrão IEC



do tipo muito inverso será utilizada neste trabalho para a elaboração do estudo de proteção, uma vez que é a mesma adotada pelo relé de proteção do alimentador genérico analisado.

Diante disso dos impactos das fontes de energia renovável, é imprescindível que a distribuidora avalie criteriosamente a viabilidade técnica de novas conexões de usinas fotovoltaicas, assegurando que a integração não comprometa a qualidade do fornecimento. Outro ponto fundamental é garantir que, a cada nova conexão, o estudo de proteção da unidade esteja devidamente coordenado com o da distribuidora. Essa medida visa evitar que falhas de proteção em unidades com geração distribuída sujeitas a diferentes tipos de oscilações, causem a desconexão indevida de outros consumidores, o que afetaria diretamente os indicadores de continuidade e causaria prejuízos consideráveis aos demais consumidores.

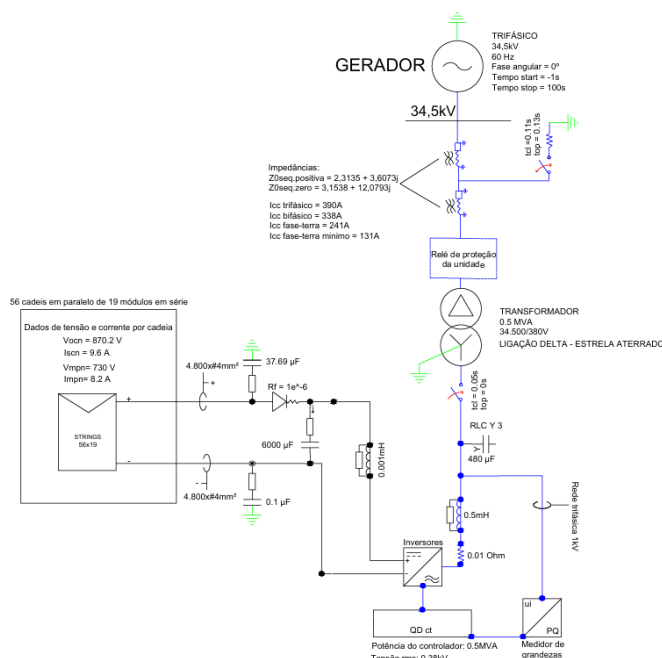
Nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo reproduzir as condições reais de operação de uma rede de 34,5 kV em regime de sobrecarga, considerando a conexão de uma usina fotovoltaica de 500 kVA. A análise inclui a capacidade do transformador de distribuição, as condições de sobrecarga e os parâmetros de curto-circuito, utilizando simulação computacional no software *ATPdraw*. O estudo avalia os efeitos sobre a estabilidade e o desempenho do sistema, bem como a coordenação e seletividade das proteções em relação ao relé da distribuidora. Ressalta-se a importância dessa abordagem para mitigar impactos nos indicadores de qualidade do fornecimento de energia.

2 METODOLOGIA

2.1. Sistema adotado

O sistema utilizado neste estudo se refere a uma usina fotovoltaica de 500 kVA conectada à rede de distribuição de 34,5 KV, cujo diagrama unifilar está representado na Figura 1. O ponto de entrega é modelado a partir dos dados fornecidos pela distribuidora de energia e são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Figura 1. Diagrama Unifilar do Sistema de distribuição.





2.2. Estudo de curto-circuito

É fundamental considerar os ajustes da proteção estejam coordenados com os da distribuidora. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta os dados de curto-circuito no ponto de entrega fornecidos pela distribuidora, enquanto a Tabela 2 contém os dados de proteção do alimentador.

Tabela 1. Dados de curto-circuito no ponto de entrega.

Parâmetros	Valor
Impedância equivalente sequência positiva (p.u)	2,3135 + 3,6073j
Impedância equivalente sequência zero (p.u)	3,1538 + 12,0793j
Icc (trifásico) (A)	390
Icc (bifásico) (A)	338
Icc (fase-terra) (A)	241
Icc (fase-terra mínimo 100 Ω) A (p.u) na base 100 MVA	131

Tabela 2. Dados de proteção do alimentador.

Subestação	SE X	
Equipamento	RP1291599	
Relé	COOPER FORM6	
Ajustes	Fase	Neutro
Ajustes de partida 51 (Temporizada) (A)	80	20
Curva de ajuste	IEC MI	IEC MI
Dial de tempo (s)	0,06	0,07
Ajuste de partida 50 (instantâneo) (A)	-	350
Quantidade de religamentos	2	2
Tempo de religamentos (s)	10/20	10/20
Tempo de atuação para curto-circuito no ponto de entrega	0,233 s	0,128 s

Considerando os dados de curto-circuito fornecido pela distribuidora, o estudo de proteção deve ser elaborado atendendo os requisitos mínimos especificados na Tabela 3 estabelecidos no módulo 3 do Prodlist.

Tabela 3. Requisitos mínimos em função da potência instalada em kW para geração distribuída, Prodlist Módulo 03, 2021.

Função de proteção	ANSI	Potência Instalada da Microgeração ou Minigeração Distribuída		
		P < 75 kW	5 kW < P < 500 kW	500 kW < P < 5 MW
Subtensão	27	Sim	Sim	Sim
Sobretensão	59	Sim	Sim	Sim
Subfrequência	81U	Sim	Sim	Sim
Sobrefrequência	81I	Sim	Sim	Sim
Desequilíbrio de corrente entre fases	46	Sim	Sim	Sim
Reversão e desequilíbrio de tensão	47	Sim	Sim	Sim
Sobrecorrente instatânea	50 / 50N	Sim	Sim	Sim
Sobrecorrente temporizada	51 / 51N	Sim	Sim	Sim
Ilhamento	-	Relé de ilhamento	Relé de ilhamento	Relé de ilhamento
Sincronismo	25	Sim	Sim	Sim
Tempo de reconção	62	Sim	Sim	Sim



Com base nos dados apresentados e nos parâmetros da carga, é possível elaborar o estudo de proteção de modo a garantir o sincronismo na coordenação. Nesse contexto, serão apresentados os cálculos dos valores necessários para a parametrização do relé, iniciando pelo cálculo da corrente nominal do transformador, conforme a Equação (1):

$$I_{\text{ntrafo}} = \frac{P_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \times V \times 0,92} \quad (1)$$

A potência do transformador, dada em KVA é de 500 kVA, enquanto a tensão é 34,5 kV. A corrente nominal do transformador é comumente utilizada para realizar o cálculo da corrente de energização (I_{mag}), esta corrente tem um valor em torno de 8 vezes a corrente nominal, como mostra a Equação (2).

$$I_{\text{mag}} = 8 \times I_{\text{ntrafo}} \quad (2)$$

Além disso, ainda em relação ao transformador, é importante realizar o cálculo do ponto ANSI, que é dada pela Equação (3).

$$I_{\text{ANSI}} = \frac{I_{\text{ntrafo}} \times 100}{Z\%} \quad (3)$$

A partir das Equações (1), (2) e (3) são utilizadas para estabelecer a seguinte relação:

$$I_{\text{mag}} < I_{f50} < I_{\text{ANSI}}$$

Para isso, será adotado um valor 5% acima da corrente de magnetização. Assim, temos:

$$I_{f50} = I_{\text{mag}} \times 1,05 = 72,8 \times 1,05 = 76,44 \text{ A}$$

Para o ajuste da unidade temporizada de fase foi considerada uma sobrecarga de 20% da potência do transformador. Dessa forma, o valor da corrente de ajuste ficará.

$$I_{f51 \text{ ajust}} = 1,2 \times I_n(\text{A}) = 1,2 \times 9,1 = 10,92 \text{ A}$$

Para o ajuste da função 50N, será considerado um valor entre 20% e 33% da corrente I_{f50} . Além disso, esse valor deve ser inferior a 93% da corrente de curto-circuito monofásica mínima do alimentador ($I_{cc1\phi \text{ min}} = 131 \text{ A}$).

Nessa perspectiva, a Tabela 4 será utilizada para exemplificar, de forma mais objetiva, como será definido o ajuste da função 50N, a qual servirá de base para a elaboração do coordenograma de proteção.

Tabela 4. Condição de atuação instantânea do relé-neutro.

$< I_{cc1\phi \text{ min}} \times 93\%$	$> 20\% \times I_{f50}$	$< 33\% \times I_{f50}$	$I_{50N \text{ ajust. (A)}}$
121,83	15,29	25,23	15,29

A unidade temporizada de neutro (51N) deve ser ajustada entre 20% e 33% da corrente I_{f51} . Para exemplificar como será definido esse ajuste, será utilizada a Tabela 5.

Tabela 5. Condição de atuação temporizada do relé-neutro.

$> 20\% \times I_{f51}$	$< 33\% \times I_{f51}$	$I_{51N \text{ ajust. (A)}}$	$> 20\% \times I_{f51}$
2,18	3,60	2,18	2,18

Com base nos valores calculados e nas considerações anteriormente apresentadas, foi adotada, para este estudo, a curva IEC Muito Inversa (MI), a mesma utilizada na proteção do alimentador da concessionária. A partir disso, o tempo de atuação do relé (*Relay Operation Time*) é definido pela seguinte Equação (4):



$$ROT = \left(\frac{13,5}{\left(\frac{I_{mag}}{I_{f51}} \right)^1 - 1} \right) \times TMS (s) \quad (4)$$

Considerando um dial de tempo (TMS – *Time Multiplier Setting*) de 0,1s e $I_{f51 \text{ ajust}} = 10,92 \text{ A}$, então:

$$ROT = 0,24s$$

Após a realização dos cálculos dos tempos de atuação, definiu-se que o tempo de atuação de fase será igual a 33% do tempo de atuação do neutro, dessa forma o ROT para neutro será de 0,24 s enquanto para a fase será de 0,08s.

Vale destacar que, para as unidades com geração distribuída, além das funções 50 e 51, obrigatórias na parametrização, é fundamental considerar outras funções de proteção no estudo. Essas funções estão listadas na Tabela 3, e seus valores de ajuste constam da Tabela 6, no tópico a seguir.

Para aumentar a confiabilidade do sistema e garantir redundância na proteção, é utilizado um disjuntor de baixa tensão equipado com bobina de abertura remota e um dispositivo de verificação de falha instalado no quadro geral da usina. Esse dispositivo enviará um sinal ao relé para abertura do disjuntor de média tensão em caso de falha. Para as falhas do disjuntor de média tensão, será configurado um tempo de atraso de 200 ms.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa, apresenta-se um quadro resumo com todas as funções que serão habilitadas no estudo de proteção e seletividade, elaborado para configurar o relé responsável pela proteção da subestação. Além dos dados apresentados na Tabela 1, foram utilizados parâmetros para o cálculo da demanda nominal do transformador, da corrente de magnetização e dos pontos ANSI e NANSI, bem como os ajustes das funções descritas na Tabela 3, as quais devem ser implementadas no relé. Também foi considerada a atuação do elo fusível, que funcionará como proteção de retaguarda entre o relé da unidade e a proteção da concessionária.

A Figura 5 apresenta o coordenograma de proteção da subestação, construído com base nos valores previamente calculados, com o objetivo de garantir a coordenação entre as proteções, conforme descrito no item anterior e detalhado nas Tabelas 1 e 2, referentes aos dados do alimentador.

Tabela 6. Quadro resumo de ajustes do relé da unidade.

Funções Padrão		
Ajustes	Fase	Neutro
Função 50/50N	76,44A	15,29A
Função 51/51N	10,92A	2,18A
Curva	IEC-MI	IEC-MI
Dial	0,08	0,1
Ponto Ansi e Inansi	182A	105,56A
Funções Complementares para Geração Distribuída		
Função 25	Sim	
Função 27	15.953V	DT=0,4s
Função 32	330kW	15s



4 CONCLUSÕES

A aplicação conjunta do software ATPDraw e do estudo de proteção e seletividade, utilizando curvas no padrão IEC recomendadas pela distribuidora, mostrou-se uma metodologia eficaz para a parametrização coordenada e seletiva do relé de proteção da subestação de 500 kVA. Essa abordagem também possibilita a identificação e caracterização de fenômenos relevantes para o diagnóstico da qualidade da energia elétrica, além de subsidiar a implementação de estratégias de mitigação. Os resultados obtidos reforçam a importância de manter a coordenação e seletividade entre o sistema de proteção das unidades consumidoras e a rede de distribuição, de modo a evitar impactos negativos sobre os demais consumidores.

Um aspecto adicional de destaque no estudo é a proteção de retaguarda do relé, representada pelo elo fusível de 12K. Esse dispositivo exerce uma dupla função: permite a realização de manobras na rede de alimentação da unidade e atua como proteção de retaguarda, caso algum componente do sistema de proteção da subestação não opere corretamente.

Este trabalho, portanto, não se limita a evidenciar os impactos da inserção de uma usina de geração distribuída na rede elétrica e os riscos associados aos demais consumidores. Ele também destaca a relevância de se adotar um estudo de proteção e seletividade adequadamente coordenado. Ademais, o conteúdo aqui apresentado serve como material de apoio tanto no âmbito acadêmico, ao abordar temas relacionados à proteção de sistemas elétricos e à geração distribuída, quanto no âmbito profissional, ao oferecer subsídios técnicos para empresas que operam grandes centrais geradoras. A intensificação do processo de transição energética tem aprofundado a necessidade de estudos mais robustos na área de proteção, impulsionada pelo crescimento da participação de fontes renováveis na matriz elétrica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica – REN 1059*. Vigente a partir de 07 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica – REN 1000*. Vigente a partir de 07 dez. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição*. Revisão 6, vigente a partir de 01 jan. 2021.

EQUATORIAL ENERGIA PIAUÍ – EQTL. *Conexão de Microgeração e Minigeração Distribuída ao Sistema de Distribuição – NT.00020*. Revisão 5, homologada em 17 nov. 2024.

EQUATORIAL ENERGIA PIAUÍ – EQTL. *Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8 kV, 23,1 kV e 34,5 kV) – NT.00002*. Revisão 9, homologada em 27 dez. 2024.

MOMESSO, Antônio. *Proteção adaptativa de relés de sobrecorrente com lógica fuzzy*. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. DOI: 10.11606/D.18.2017.tde-17082017-144237.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. *Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes*. Submódulo 2.8, ago. 2009.