



CONEXÃO DE MINUSINAS FOTOVOLTAICAS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO NA AMAZÔNIA: UM ESTUDO DE CASO COM FOCO NA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA E CURTOS-CIRCUITOS

DANIEL NUNES DE SOUSA; DIONE JOSÉ ABREU VIEIRA

RESUMO

O Brasil encontra-se na vanguarda da transição energética global, isso o coloca em uma posição favorável na corrida por investimentos, uma vez que as energias renováveis possuem um papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa e no combate as mudanças climáticas. Na Amazônia brasileira, mais especificamente na região norte do país, a geração fotovoltaica vem ganhando destaque no cenário nacional devido às características do relevo com superfícies relativamente planas, clima tropical úmido e temperaturas elevadas. No contexto da geração distribuída, para a conexão de miniusinas fotovoltaicas à rede de distribuição, são necessários estudos de proteção, afim de garantir a integridade do sistema, caso o mesmo seja submetido a perturbações. Nesse artigo, foi desenvolvido um estudo de conexão de duas miniusinas fotovoltaicas ao sistema de energia elétrica. Para o correto dimensionamento dos relés de sobrecorrente, a partir dos dados fornecidos pela distribuidora, foram realizados estudos de contribuição às correntes de curto-circuito considerando a integração das miniusinas fotovoltaicas ao sistema elétrico. A partir do estudo de faltas equilibradas e desequilibradas foram realizados os dimensionamentos dos transformadores de instrumentos e dos relés de proteção. Os resultados obtidos mostram a importância da análise de curto-circuito para o correto dimensionamento dos relés de sobrecorrente.

Palavras-chave: curto-circuito; proteção de sistemas de energia; coordenação e seletividade da proteção; geração distribuída; sistemas fotovoltaicos

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a matriz elétrica brasileira apresenta origem predominantemente renovável com geração centralizada pautada na hidroeletricidade, ou seja, poucas unidades geradoras gerando um fluxo de energia em um único sentido para vários centros de consumo.

No entanto, na última década, esse cenário mudou a partir da resolução normativa da ANEEL Nº 482/2012 que incentivou o crescimento da geração distribuída (GD) no Brasil ao permitir que qualquer cidadão pudesse gerar a sua própria energia. Tal acontecimento gerou grandes mudanças no sistema elétrico brasileiro, em especial na participação solar fotovoltaica que nos últimos cinco anos saiu de 4,7 GW para 34,2 GW de potência instalada, mantendo um crescimento exponencial médio de 40% ao ano (ABSOLAR, 2023).

Buscando encontrar soluções para mitigar os efeitos da geração de energia sobre as esferas socioambientais e econômicas devido as mudanças climáticas, a transição energética começou a ser discutida pelos países membros das Nações Unidas como uma forma de alcançar as metas e planos de ação definidos pela Agenda 2030 (MOUSINHO; COELHO, 2023). A transição energética é pautada basicamente no conceito dos 3D's: descarbonização, descentralização e digitalização (EPE, 2021). A descarbonização é a meta que visa a neutralização das emissões do gás dióxido de carbono (CO₂), sendo a eletrificação dos setores

da indústria, transporte e edifícios os elementos centrais para atingir esse objetivo (VILLANUEVA B. A.; CATAPAN A.; LOUSADA S. A. N., 2023). Em um contexto de eletrificação, a meta de descentralização surge para impulsionar a geração distribuída como forma de escalar a utilização de energias renováveis proporcionando uma matriz energética sustentável, além de segurança energética, mudança de clima e crescimento econômico (XAVIER, 2023). A digitalização busca influenciar a integração tecnológica e digital aos documentos, processos e serviços relacionados (EPE, 2021).

Ademais, observando os incentivos e o comprometimento mundial com a sustentabilidade, é previsto um crescimento no número de sistemas fotovoltaicos *on-grid*, o que tem gerado discussões sobre os efeitos negativos que estes causam a rede elétrica, como o fluxo de potência reverso, a elevação da tensão da rede, o aumento da operação de dispositivos de regulação de tensão e a elevação das perdas técnicas (GADELHA, 2019). Com essa possibilidade de interferência na qualidade de energia, as distribuidoras vêm exigindo dos acessantes estudos técnicos com objetivo de avaliar a viabilidade de conexão das GD. Segundo a Resolução Normativa da ANEEL Nº 956/2021, que estabelece o módulo 3 das Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST), as análises necessárias devem avaliar a elevação dos níveis de curto-circuito e a necessidade de ajustes de proteção e controle.

Por conseguinte, é notória a necessidade por metodologias e tecnologias capazes de avaliar os impactos da geração distribuída nas redes elétricas, devido à complexidade gerada pela conexão dos inversores e pela possibilidade de inversão do fluxo de carga, o que pode comprometer a eficiência e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Várias ferramentas computacionais são empregadas para auxiliar o acessante a atender as exigências normativas, como o ANAFAS, ETAP, EASYPOWER, POWERWORD, SUPERCOORD, etc.

2 RELATO DE CASO/EXPERIÊNCIA

Para o correto dimensionamento da proteção deve ser realizado o cálculo do curto-circuito no sistema elétrico. Nesse trabalho, foi utilizado o software computacional ETAP, do inglês “*Electrical Transient Analyzer Program*”, que utiliza o método das componentes simétricas ou teorema de Fortescue, equação 01, para a determinação das faltas em qualquer ponto do sistema elétrico. De acordo com Kinderman (1977), $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c \dots \dot{I}_n$ os fatores que representam as fases a , b , $c \dots n$ do sistema desequilibrado de origem, que são decompostos em “ n ” fasores equilibrados que representam as componentes de sequência zero, 1, 2, 3 $\dots k$. A partir disso, formam-se os sistemas de sequência positiva, negativa e zero.

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dots + \dot{I}_{an-1} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dots + \dot{I}_{bn-1} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c0} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dots + \dot{I}_{cn-1} \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \dot{I}_n &= \dot{I}_{n0} + \dot{I}_{n1} + \dot{I}_{n2} + \dots + \dot{I}_{nn-1}\end{aligned}\quad (1)$$

Para a obtenção das correntes de curto-circuito monofásico e trifásico, são utilizadas as equações 02 e equação 03, respectivamente.

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (3)$$

A metodologia utilizada para o estudo de proteção partiu das teorias de filosofia de proteção foram baseadas nas literaturas de Caminha (1977), Filho e Mamede (2013), Kindermann (2005) e Stevenson (1974).

Na tabela 1, são apresentadas as equações utilizadas no dimensionamento dos transformadores de corrente (TC), assim como dos relés de sobrecorrente não direcionais, instantâneo (50) e temporizado (51), de fase e neutro.

Tabela 1 – Equações utilizadas para o dimensionamento dos TC's e relés de sobrecorrente

TC	$I_{NP} = \frac{I_{CC-3\phi}}{20}, \quad RTC = \frac{I_{NP}}{5}$
51	$INPS_{AJUSTE.51F} = \frac{INPS_{P.51F}}{TC_{PRIMÁRIO}} \times \frac{TC_{PRIMÁRIO}}{I_{N.RELÉ}}$
	$INPS_{P.51F} = 1,1 \times In_{Demanda}$
50	$INPS_{AJUSTE.50F} = \frac{INPS_{P.50F}}{TC_{PRIMÁRIO}} \times \frac{TC_{SECUNDÁRIO}}{I_{N.RELÉ}}$
	$INPS_{P.50F} = 1,1 \times Inrush_{REAL}$
51N	$INPS_{AJUSTE.51N} = \frac{INPS_{P.51N}}{TC_{PRIMÁRIO}} \times \frac{TC_{SECUNDÁRIO}}{I_{N.RELÉ}}$
	$INPS_{P.51N} = 0,1 \times In_{Demanda}$
50N	$INPS_{AJUSTE.50N} = \frac{INPS_{P.50N}}{TC_{PRIMÁRIO}} \times \frac{TC_{SECUNDÁRIO}}{I_{N.RELÉ}}$
	$INPS_{P.50N} = 0,2 \times INPS_{P.50F}$

3 DISCUSSÃO

A conexão de uma nova geração ao sistema elétrico oferece maior contribuição a corrente de curto-circuito, o que exige um estudo complementar aos dados técnicos fornecidos pela distribuidora. Com objetivo de demonstrar como um sistema de proteção é ajustado para eliminar faltas, antes mesmo da atuação da proteção da subestação da concessionária, foi desenvolvido um estudo para a conexão de duas miniusinas fotovoltaicas.

As usinas fotovoltaicas (UFV) foram denominadas UFV 01 e UFV 02, onde a primeira está ligada ao ponto de acoplamento comum de média tensão de 34,5 kV denominado de PAC-MT 01 e a segunda em outro ponto denominado de PAC-MT 02. O PAC-MT 01 está aproximadamente a 0,5 km de distância do PAC-MT 02 e a 4 km do alimentador (AL-PA) da Subestação do Pará (SE-PA). Analisando a disposição das usinas, constata-se que a UFV 01 está a montante da UFV 02, desse modo espera-se que a segunda usina influencie nos níveis de curto-circuito da primeira, ou vice-versa. Sendo assim, verifica-se a necessidade de estudos complementares considerando também as contribuições das correntes de curto-circuito de ambas as gerações e da própria subestação SE-PA nos pontos de entrega.

Cada UFV é composta por 10 conjuntos de sistemas fotovoltaicos com transformador de acoplamento individual de 500 kVA 0,6 kV/34,5kV com proteção geral do secundário realizada por chave seccionadora, disjuntor de média tensão e relé modelo 7SR12 da Siemens.

Além disso, cada conjunto é composto por 960 módulos fotovoltaicos de 545 Wp e 4 inversores de 120 kW, totalizando 9600 módulos e 40 inversores por usina.

A partir dos dados fornecidos pela distribuidora, tabela 2 e tabela 3, foi realizada a modelagem do sistema elétrico no ETAP, onde os transformadores de acoplamento foram representados por sistemas equivalentes de 5MW cada, conforme a figura 2.

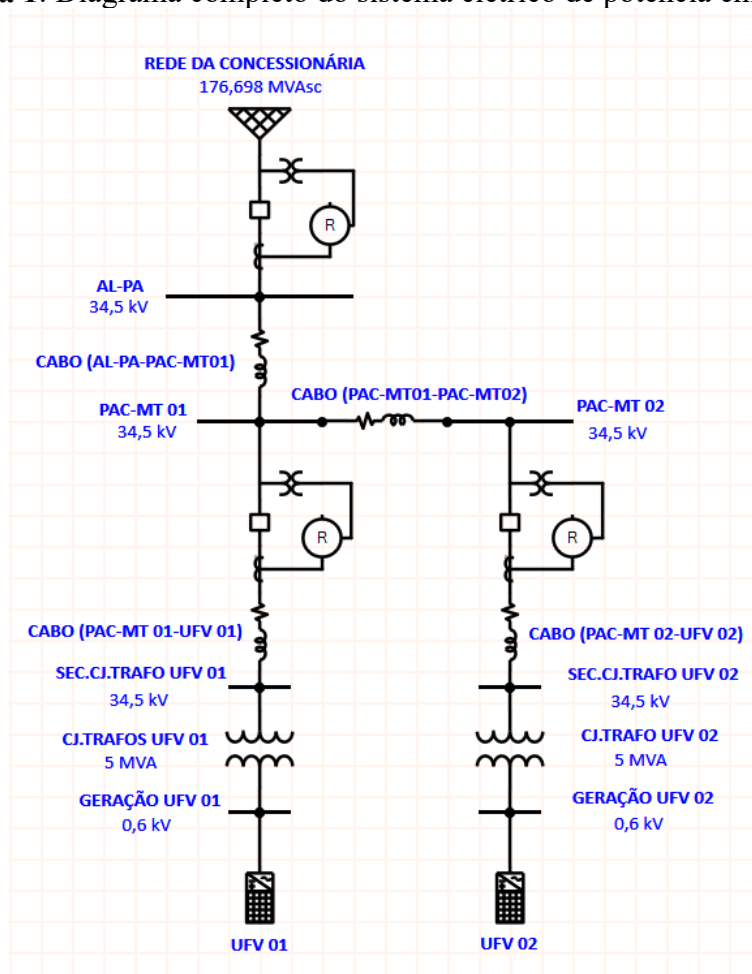
Tabela 2 – Dados do ponto de entrega PAC-MT 01

(Z0) (pu) 100 MVA	0,06 + j0,57
(Z1) (pu) 100 MVA	0,03 + j0,56
Icc-3 ϕ A	2957
Icc-1 ϕ A	2944

Tabela 3 – Dados do ponto de entrega PAC-MT 02

(Z0) (pu) 100 MVA	0,19 + j1,29
(Z1) (pu) 100 MVA	0,10 + j0,69
Icc-3 ϕ A	2398
Icc-1 ϕ A	1859

Figura 1: Diagrama completo do sistema elétrico de potência em estudo



As tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados dos estudos de curto-circuito nos pontos de conexão PAC-MT 01 e PAC-MT 02 e no alimentador AL-PA.

Tabela 4 – Variação dos níveis de curto-circuito no PAC-MT 01 antes e depois da conexão da usina UFV 01

Icc-3 ϕ (A)			Icc-1 ϕ (A)		
Antes	Depois	$\square I_{CC}$ (%)	Antes	Depois	$\square I_{CC}$ (%)
2957	3078	5,125	2944	3032	2,959

Tabela 5 – Variação dos níveis de curto-circuito no PAC-MT 02 antes e depois da conexão da usina UFV 02

Icc-3 ϕ (A)			Icc-1 ϕ (A)		
Antes	Depois	$\square I_{CC}$ (%)	Antes	Depois	$\square I_{CC}$ (%)
2398	2519	5,046	1859	1948	4,78

Tabela 6 – Variação dos níveis de curto-circuito no AL-PA antes e depois da conexão da UFV 01 e UFV 02

Icc-3 ϕ (A)			Icc-1 ϕ (A)		
Antes	Depois	$\square I_{CC}$ (%)	Antes	Depois	$\square I_{CC}$ (%)
2957	3199	8,184	2944	3126	6,182

A partir dos resultados obtidos, com a conexão das UFV 01 e UFV 02 ao sistema elétrico, verificou-se que ambas as usinas contribuem com uma corrente trifásica de 242 A e com uma corrente monofásica de 182 A no alimentador AL-PA da subestação. Esses aumentos representam 8,182% para falta trifásica e 6,182% para falta monofásica.

Os parâmetros do relé de sobrecorrente do alimentador da subestação, fornecido pela distribuidora, são 250 A para a função 51 e 100A para 51N e dial de tempo de 0,18s e 0,22s com curva de característica muito inversa (MI) padrão IEC 255.

De posse dessas informações, foram então realizados os dimensionamentos dos transformadores de corrente e os ajustes das proteções de sobrecorrente buscando a coordenação e seletividade da proteção das miniusinas com a da rede de distribuição.

As tabelas 07 e 08, apresentam os ajustes calculados para o dimensionamento das proteções das UFV 01 e UFV 02, respectivamente. As figuras 02 e 03, apresentam os coordenogramas de proteção instantânea e temporizada das miniusinas fotovoltaicas com a subestação da concessionária.

Tabela 7 – Ajustes da proteção geral da UFV 01

Relé UFV 01	Fabricante	Modelo
Função de proteção	Siemens	Reyrolle 7SR12
51	$0,33 \square I_n$	100 A
	Dial de tempo 0,1– Curva MI	
50	$0,555 \square I_n$	166,55 A
51N	$0,05 \square I_n$	9,094 A
	Dial de tempo 0,1– Curva MI	
50N	$0,11081 \square I_n$	33,244 A

Relé UZF 02	Fabricante	Modelo
Função de proteção	Siemens	Reyrolle 7SR12
51	0,33 $\square$ In	100 A
	Dial de tempo 0,1– Curva MI	
50	0,5499 $\square$ In	164,978 A
51N	0,05 $\square$ In	9,094 A
	Dial de tempo 0,1– Curva MI	
50N	0,1099 $\square$ In	32,995 A

Supercord 2.27.13
www.supercord.com.br

FASE:100.0/166.6A
Proteção Geral UFV

FASE:250.0/0.000A
Concessionária

ANSI 500F

INRUSH UFV 01
151A

Esse trabalho teve por objetivo realizar um estudo de proteção para a conexão de minigeração distribuída na Amazônia. A partir desse estudo, verificou-se a importância de avaliar a contribuição das correntes de curto-circuito no ponto de acoplamento das usinas fotovoltaicas à rede elétrica, uma vez que a integração de novas unidades geradoras contribuem para o aumento das correntes de curto-circuito e se não forem levadas em consideração podem comprometer a confiabilidade da proteção.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Disponível em: <ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica> Acesso em: 22 de Nov. 2023.

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: ANEEL, 2021.

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

EPE. **Mudanças climáticas e Transição energética**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>> Acesso em: 22 de Nov. 2023.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

GADELHA, F. Impacto dos sistemas de geração distribuída fotovoltaica sobre a tensão em regime permanente das redes de distribuição. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2019.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2ª edição. Florianópolis: Edição do autor , 2005.

MOUSINHO, M. C. A. DE M.; COELHO, A. P. B. Financiamento externo e transição energética nos países do BRICS. <http://www.ipea.gov.br>, 1 abr. 2023.

STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. McGraw-Hill do Brasil, 1974.

VILLANUEVA, B. DE A.; CATAPAN, A.; LOUSADA, S. A. N. Cooperativas de energia no Brasil: um referencial teórico para a transição energética. **DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE**, v. 16, n. 50, p. 4061–4083, 13 dez. 2023.

XAVIER, B. A. **Desafios e oportunidades para a expansão da geração distribuída no setor elétrico brasileiro**. Disponível em: repositorio.ufersa.edu.br. Acesso em: 20 dez. 2023.