

Análise das consequências provocadas pelo aquecimento de componentes e aumento de temperatura ambiente em sistemas fotovoltaicos

Diego Piazza Hilgert¹
Renata Lautert Yang¹
Ana Carla Cordeiro¹
Nicole Polityto Cremasco¹
Jair Urbanetz Júnior¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

Um importante componente dos sistemas de proteção são os disjuntores, os quais impedem que o sistema sofra maiores danos. Neste estudo foram analisados disjuntores de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica instalados na região noroeste do Paraná. Desde a instalação destes sistemas, ocorreu um problema comum a eles, a substituição destes disjuntores que eram de marcas consolidadas no mercado nacional. As possíveis causas do acionamento destes componentes foram investigadas neste artigo por meio de três frentes de trabalho: análise teórica do aquecimento dos componentes internos do quadro geral; análise da influência da irradiação horária, temperatura ambiente e corrente durante a falha dos disjuntores; e a exposição contínua dos disjuntores a altas correntes nos meses anteriores às falhas. Com base nessas análises, concluiu-se que a ocorrência isolada delas não causou os problemas, todavia a associação delas.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, Aquecimento, Temperatura, Disjuntor, Paraná

ABSTRACT

An important component of protection systems are circuit breakers, which prevent the system from suffering damage. In this study, circuit breakers of two photovoltaic systems connected to the grid installed in the northwest region of Paraná were analyzed. Since the installation of these systems, a problem common to them has occurred, the replacement of these circuit breakers that were of consolidated brands in the national market. The possible causes of the activation of these components were investigated in this article through three work fronts: theoretical analysis of the heating of the internal

components of the general frame; analysis of the influence of solar radiation, ambient temperature and current during breaker failure; and continuous exposure to high currents in the months before the failures. Based on these analyzes, it was concluded that their isolated occurrence did not cause the problems, however their association.

Keywords: Photovoltaic systems, Heating, Temperature, Circuit Breaker, Paraná

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tem impulsionado ações governamentais no Brasil e no mundo visando à preservação de recursos naturais. Neste contexto, há um investimento constante em fontes renováveis de energia. Os sistemas fotovoltaicos vêm crescendo exponencialmente em capacidade instalada mundial, inclusive no Estado do Paraná (ANEEL, 2020a; ANEEL, 2020b).

Nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica (SFVCR), assim como em outros sistemas elétricos, é necessária a utilização de sistemas de proteção, cujo principal componente é o disjuntor. Segundo Tozetto (2018), o disjuntor é um dispositivo de manobra (mecânico) e de proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de sobrecarga e de curto-circuito.

Em circuitos fotovoltaicos, é necessária a instalação de um disjuntor de corrente alternada na saída do inversor, com o objetivo tanto de proteção como de manobra. De acordo Molinari (2010), os disjuntores mais comuns são do tipo termomagnético, que, como seu próprio nome diz, possuem sistemas de proteção térmica e magnética. Devido à existência da atuação térmica do disjuntor termomagnético nos SFVCR analisados é possível a existência da influência térmica na degradação e funcionamento destes disjuntores termomagnéticos instalados.

Sendo assim, este estudo é uma análise dos fatores que podem ter ocasionado à falha dos disjuntores em dois sistemas, em períodos em que a corrente era inferior a corrente nominal. Para a realização do estudo, três frentes de análise foram estudadas. A primeira é o estudo teórico do aquecimento dos componentes internos do quadro geral que podem ter acionado o sistema de proteção. A segunda é a análise da relação entre a temperatura ambiente e irradiância solar na região de instalação dos SFVCR, além da corrente do sistema durante o período em que o sistema de proteção atuou. A

terceira é a análise da possível degradação em função da exposição contínua a correntes elevadas, que, apesar de inferiores a corrente de desarmamento dos disjuntores, foi superior a 50% da nominal e 75% da nominal.

O aquecimento dos disjuntores representa um fator que deve ser considerado no estudo de sua operação e dimensionamento, pois o aumento da temperatura diminui sua ampacidade. E esta elevação na sua temperatura e dos demais componentes no seu entorno dificulta a dissipação de calor, podendo levar ao seu desarmamento ou danificação (SMA, 2020).

As mudanças na irradiância solar afetam essencialmente a corrente do módulo, a qual varia do nascer ao pôr do sol e sob a interferência das nuvens. De acordo com DGS (2013), a corrente elétrica no módulo é diretamente proporcional à irradiância incidente, ou seja, quanto maior a irradiância, maior a corrente.

2. METODOLOGIA

Foram estudados dois sistemas fotovoltaicos instalados no estado do Paraná, sendo o Sistema 1 instalado em Rancho Alegre D'Oeste, e o Sistema 2 instalado em Mariluz. Com relação aos inversores, ambos são da marca *Fronius*, no Sistema 1 a potência é de 5 kW e no Sistema 2, 15 kW. Os módulos instalados eram de 335 Wp, de tecnologia de silício policristalino, tendo o painel do Sistema 1 potência instalada de 6,03 kWp e o Sistema 2, 20,1kWp. Os sistemas podem ser observados por meio das Figuras 1 e 2, respectivamente.



Figura 1 - Sistema 1



Figura 2 - Sistema 2

As análises realizadas neste artigo se relacionam ao estudo das razões que podem ser responsáveis pela falha em três circunstâncias distintas dos disjuntores dos dois sistemas estudados. Para isto foram analisados períodos antes e após a troca dos

disjuntores. Os dias de desarmamento e troca dos disjuntores de cada sistema são descritos pela Tabela 1. Ressalta-se que ocorreram dois desarmamentos no Sistema 2 em épocas distintas.

Tabela 1 - Datas de queda e troca de disjuntores dos sistemas.

	Sistema 1	Sistema 2 (primeira falha)	Sistema 2 (segunda falha)
Data de falha	11-10-2019	26-10-2019	19-02-2020
Hora da falha	10h55min	12h30min	13h30min
Data de troca	15-10-2019	01-11-2019	27-02-2020

O estudo foi dividido em três possíveis razões para o desarmamento dos disjuntores, sendo eles a análise do aquecimento dos componentes internos do quadro geral, análise da relação de temperatura e irradiância com o sistema de proteção, e a exposição contínua do sistema a correntes próximas do valor nominal durante os períodos anteriores à falha.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com finalidade de análise comparativa, os gráficos de geração diária no dia do sinistro e no dia posterior à troca dos disjuntores são indicados por Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

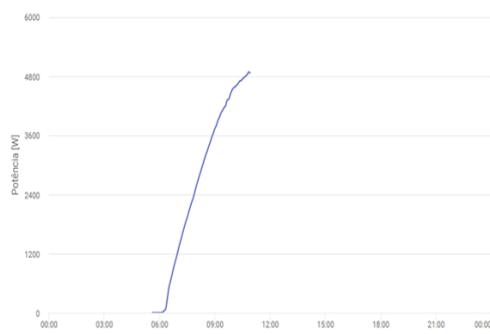


Figura 3 - Curva de geração do Sistema 1 no dia do sinistro



Figura 4 - Curva de geração do Sistema 1 no dia após troca de disjuntor

É possível observar na Figura 3 a interrupção da geração de energia elétrica no horário indicado pela Tabela 1, enquanto na Figura 4 não há interrupção da geração até o período final do dia.

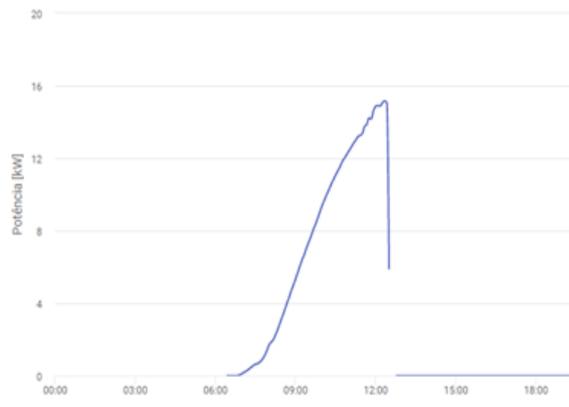


Figura 5 - Curva de geração do Sistema 2 no dia do primeiro sinistro



Figura 6 - Curva de geração do Sistema 2 no dia após a primeira troca de disjuntor

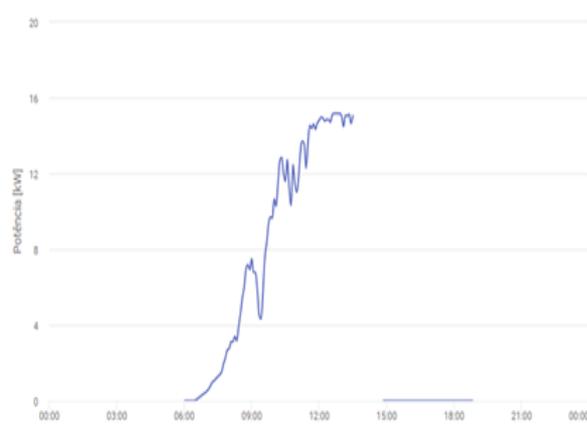


Figura 7 - Curva de geração do Sistema 2 no dia do segundo sinistro



Figura 8 - Curva de geração do Sistema 2 no dia após a segunda troca de disjuntor

Conforme indicados pelas Figuras 5 e 7, a queda dos diferentes disjuntores ocorreu quando o valor de potência era superior a 12 kW, sendo próximo a 16 kW, e possivelmente da potência nominal do inversor (15 kW). Além disso, é possível observar que a primeira queda ocorreu em um dia de pouca nebulosidade, por conta da inexistência de distorções na curva de geração, e no dia da segunda queda havia presença de nuvens, pois a curva de geração possui grande distorção.

3.1 Análise do Aquecimento dos Componentes Internos do Quadro Geral com a Atuação do Sistema de Proteção

De acordo com a norma NBR IEC 60898 (ABNT, 2004), alguns dos pontos que devem ser observados no momento do dimensionamento do disjuntor são: tipo do cabo utilizado; temperatura ambiente ao redor do cabo; quantidade de cabos e método de encaminhamento; temperatura ambiente do disjuntor; e aquecimento mútuo dos disjuntores.

Para sistemas fotovoltaicos em que tanto os cabos como o quadro onde estão os disjuntores estão em ambientes externos, expostos diretamente ao tempo e ao sol, alguns destes pontos merecem maior atenção, pois há um maior aquecimento destes elementos. Este é o caso de ambos os sistemas em questão.

Ainda segundo a NBR IEC 60898, este sobreaquecimento deve ser considerado, já que o aumento de temperatura provoca uma redução na capacidade de condução de corrente do disjuntor, podendo fazer com que este desarme mesmo em correntes abaixo da corrente nominal. A Tabela 2 exemplifica as alterações causadas pela temperatura (tanto acima como abaixo da temperatura padrão, adotada como 50 graus Celsius) na corrente de atuação do disjuntor, conforme a NBR IEC 60947 (ABNT, 2013).

Tabela 2 - Efeito da temperatura do disjuntor na corrente. ABNT, 2013

Rating	Ambient temperature (°C)												
(A)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
0.5	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.5	0.49	0.48	0.47	0.45
1	1.16	1.14	1.12	1.1	1.08	1.06	1.04	1.02	1	0.98	0.96	0.93	0.91
2	2.4	2.36	2.31	2.26	2.21	2.16	2.11	2.05	2	1.94	1.89	1.83	1.76
3	3.62	3.55	3.48	3.4	3.32	3.25	3.17	3.08	3	2.91	2.82	2.73	2.64
4	4.83	4.74	4.64	4.54	4.44	4.33	4.22	4.11	4	3.88	3.76	3.64	3.51
6	7.31	7.16	7.01	6.85	6.69	6.52	6.35	6.18	6	5.81	5.62	5.43	5.22
10	11.7	11.5	11.3	11.1	10.9	10.7	10.5	10.2	10	9.8	9.5	9.3	9
13	15.1	14.8	14.6	14.3	14.1	13.8	13.6	13.3	13	12.7	12.4	12.1	11.8
16	18.6	18.3	18	17.7	17.3	17	16.7	16.3	16	15.7	15.3	14.9	14.5
20	23	22.7	22.3	21.9	21.6	21.2	20.8	20.4	20	19.6	19.2	18.7	18.3
25	28.5	28.1	27.6	27.2	26.8	26.4	25.9	25.5	25	24.5	24.1	23.6	23.1
32	37.1	36.5	35.9	35.3	34.6	34	33.3	32.7	32	31.3	30.6	29.9	29.1
40	46.4	45.6	44.9	44.1	43.3	42.5	41.7	40.9	40	39.1	38.2	37.3	36.4
50	58.7	57.7	56.7	55.6	54.5	53.4	52.3	51.2	50	48.8	47.6	46.3	45
63	74.9	73.5	72.1	70.7	69.2	67.7	66.2	64.6	63	61.4	59.7	57.9	56.1

3.2 Análise da Relação Entre a Temperatura Ambiente e Irradiância da Região com a Atuação do Sistema de Proteção

No momento do sinistro para os três casos, os valores de irradiância em estações próximas ao local eram de 897,5, 971,7 e 982,5 W/m², respectivamente, conforme dados coletados de INMET (2020). Como não existiam estações do INMET nas regiões de instalação dos sistemas, foram selecionadas estações em cidades próximas. Assim, os dados de temperatura coletados pelo *AccuWeather* (2020), irradiância obtida pelas estações do INMET (2020), e os dados de corrente do sistema no momento do sinistro de cada SFVCR são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados dos sistemas durante o sinistro

	Sistema 1	Sistema 2 (primeira falha)	Sistema 2 (segunda falha)
Estações do INMET	Nova Fátima	Goioerê	Goioerê
Corrente (A)	21,61	38,88	38,26
Temperatura (°C)	33	34	31
Dados de irradiação horária (Wh/m ²)	897,5	971,7	982,5

Conforme observado nos dados da Tabela 3, os valores de irradiação horária durante os períodos em que ocorreram as falhas dos disjuntores eram alta, próxima a 1.000Wh/m², e a temperatura ambiente também era alta, o que em geral ocasiona maiores temperaturas em quadros gerais (que geralmente são fechados e constituídos por material metálico), que podem ter auxiliado na falha dos disjuntores. Os dados referentes às correntes com relação à corrente nominal do disjuntor são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Corrente no sistema versus Corrente máxima que o disjuntor suporta

	Corrente no sistema no momento do sinistro (A)	Corrente nominal - Máxima corrente que o disjuntor suporta (A)
Sistema 1	21, 61	25 A
Sistema 2 – 1ª Falha	38,88	50 A
Sistema 2 – 2ª Falha	38,26	50 A

Com relação aos valores das correntes durante o período do sinistro, houve variação entre 75% e 90% da corrente nominal dos disjuntores, sendo os valores referentes a 86,44% no Sistema 1, 77,76% na primeira falha do Sistema 2 e 76,52% na segunda falha do Sistema 2. Os valores das correntes durante os períodos de sinistro não justificariam somente por si próprias o desarme do disjuntor.

3.3 Análise da Exposição Contínua a Altas Correntes

Durante todo o período de análise dos sistemas, referentes aos meses anteriores, não foram encontradas correntes superiores às correntes nominais dos disjuntores, portanto a falha não foi somente desarmamento de segurança dos sistemas. Houve, portanto, problemas com os disjuntores dos sistemas e, como os fabricantes e marcas eram distintos, foram analisadas as correntes dos períodos anteriores para verificação de possível estresse dos equipamentos.

Os dados da corrente na saída do inversor do Sistema 2, no qual ocorreram duas falhas, foram coletados a cada cinco minutos, e analisados entre o período de 07/01/2019 (início de operação) a 19/02/2020 (segunda falha). A Figura 9 ilustra o comportamento da corrente alternada (CA) nesse período. Foram coletadas aproximadamente 66.000 aquisições neste período, conforme valores apresentados no eixo x. Percebe-se que em grande parte de sua operação, a corrente esteve próxima a 40 A.

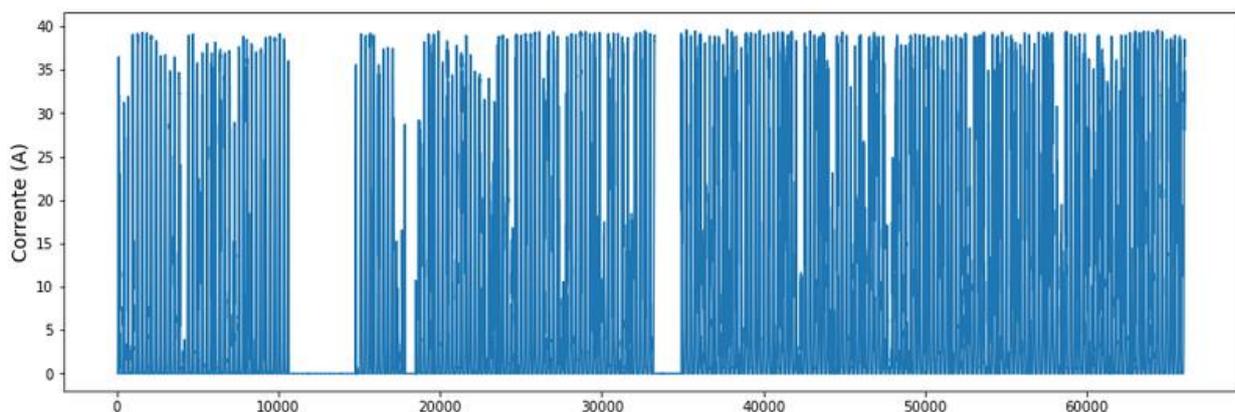


Figura 9 - Corrente na saída do inversor do Sistema 2

Analisando apenas o período de sol, foram contabilizados 37.636 valores. A quantidade de valores brutos de corrente superiores a 50% da corrente nominal foi 10.400, e a quantidade de valores com corrente superior a 75% foi 2.546. Sendo assim,

27,63% dos resultados foram superiores a 50% da corrente nominal e 6,76% dos valores foram superiores a 75% da corrente nominal, considerando todo o período de sol, incluindo os períodos de baixas irradiações horárias.

Para comparação dos valores de corrente, incluindo os horários de baixas irradiações horárias e excluindo dados noturnos, foram realizadas as médias horárias dos valores de corrente. A análise foi dividida entre a quantidade de horários com corrente superior a 50% e 75% em todos os horários ensolarados, totalizando 2.906 valores, e excluindo horários de baixas irradiações horárias (somente das 11h às 16h foram considerados), totalizando 1.256 valores. A Tabela 5 representa a quantidade de medições de corrente que obtiveram valores superiores a 50% e 75% da corrente nominal, durante os diferentes períodos escolhidos.

Tabela 5 - Análise da corrente em períodos de sol e maiores irradiações: número de ocorrências.

	50% In	75% In
Período total de sol	852	169
Período de maior nível de irradiação (entre 11h e 16h)	727	127

A partir dos valores da Tabela 5 é possível observar que aproximadamente 30% dos valores horários obtiveram valores de média horária de corrente superiores a 50% da corrente nominal considerando o período total de sol. Com relação à análise dos valores entre as 11h e 16h, a situação é ainda mais estressante aos disjuntores, representando 57,88% dos valores de corrente do período.

A quantidade de valores com corrente acima de 75% da corrente nominal foi relativa a 4,37% dos casos sobre todos os horários de irradiação solar, e durante o período entre 11h e 16h foi referente a 10,11% dos casos. Sendo assim, é possível que, após 852 horas de exposição às condições de estresse tenha ocorrido a degradação dos disjuntores.

4. CONCLUSÕES

Após a análise de operação dos SFVCR durante as ocorrências que levaram à substituição dos disjuntores e estudo das possíveis causas desse problema, conclui-se que nenhuma delas motivou isoladamente o acionamento do sistema de proteção. Percebeu-se que a corrente de operação nos instantes de abertura dos circuitos não foi superior à corrente nominal do disjuntor. Notou-se que o aumento da temperatura,

aliada aos altos índices de irradiância solar contribuem com o aquecimento dos componentes do sistema, e como consequências elevam o valor da corrente elétrica. Assim, a ação conjunta destes fatores, juntamente com a exposição prolongada a correntes elevadas e próximas à corrente limite do disjuntor, durante horas ao longo do seu período de operação, desde a instalação do sistema foram as causas possíveis dessas ocorrências nos sistemas estudados. Portanto, todos esses fatores devem ser considerados e analisados no dimensionamento de disjuntores para SFVCR.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa e a COPEL-Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização deste projeto de P&D "ANEEL PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, “NBR IEC 60947-2:2013 - Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão - Parte 2: Disjuntores”, 2013.

ABNT, “NBR NM 60898:2004 - Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares”, 2004.

ACCWEATHER, “Tempo em Brasil”, disponível em: <<https://www.accuweather.com/pt/br/brazil-weather>>, acesso em: 10/07/2020, 2020.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, “Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA”, disponível em: <<https://bit.ly/38iJmEr>>, acesso em: 11/07/2020, 2020a.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, “Unidades Consumidoras com Geração Distribuída”, disponível em: <<https://goo.gl/Pj1MCm>>, acesso em: 11/07/2020, 2020b.

DGS, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE, “Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers”, 2013.

INMET. “Estações Automáticas”, disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>, acesso em: 10/07/2020, 2020.

MOLINARI, E.M., “Estudo de Caso de Coordenação e Seletividade da Proteção Contra Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Industrial”, 2010.

SMA, “Technical information: circuit breaker”, disponível em: <<https://www.sma-america.com/>>, acesso em 10/07/2020, 2020.

TOZETTO, M.F., “Instalações Elétricas Residenciais e Sistemas de Proteção”, 2018.