

A Confiabilidade em Usina Fotovoltaica Centralizada de 0,5MWp Utilizando a Topologia de String

Wilson Omar Ramos Parqui

Center of Excellence in Energy and Power System (CEESP)
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, Brasil
wilson.rp.27@gmail.com

Leonardo Ramires Vargas

Center of Excellence in Energy and Power System (CEESP)
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, Brasil
leonardo.vargas29@gmail.com

Mauricio Sperandio

Center of Excellence in Energy and Power System (CEESP)
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, Brasil
mauricio.sperandio@ufsm.br

Resumo—Este artigo apresenta uma metodologia para avaliar a confiabilidade de uma usina fotovoltaica centralizada de 0,5MWp, utilizando a topologia de inversores string. A avaliação baseia-se em métricas como a taxa de falha (λ) e a taxa de reparo (μ) dos componentes, permitindo calcular a energia fornecida ideal (ISE) e esperada (ESE). Além disso, um estudo de caso é apresentado, utilizando dados de uma usina fotovoltaica situada no sul do Brasil. Este estudo pode ser aplicado tanto para a avaliação de usinas em operação quanto em estudos de viabilidade de novos projetos, fornecendo uma visão abrangente do fornecimento de energia e da eficiência do sistema. A análise inclui a avaliação de painéis fotovoltaicos, strings, inversores e transformadores, destacando a importância da confiabilidade de cada componente individualmente e em conjunto. Os resultados demonstram a alta confiabilidade do sistema, mesmo em cenários de aumento significativo nas taxas de falha dos componentes, confirmando a robustez e a eficiência da usina fotovoltaica.

Index Terms—Confiabilidade, inversor string, projeto fotovoltaico, ISE, ESE, A_e .

I. INTRODUÇÃO

Durante o projeto de uma usina fotovoltaica, é essencial considerar uma ampla gama de fatores e estudos a fim de se desenvolver um trabalho de qualidade que realmente represente os riscos e a viabilidade do projeto analisado [1]. Entre esses estudos está o de confiabilidade, que avalia a capacidade de um equipamento ou sistema operar sem falhas durante um dado período de tempo [2].

Segundo [3], a probabilidade de um sistema falhar ou ter problemas de operação futuros pode ser drasticamente reduzida conforme o nível de investimento durante o planejamento e operação desse sistema. A taxa de falhas e taxa de reparo são dois indicadores da confiabilidade de equipamentos e podem ser utilizados no cálculo da probabilidade de falha de cada um deles [3].

Esses indicadores são muito importantes e formam a base do estudo desenvolvido nesse artigo, mas, sozinhos, não re-

presentam todo o sistema. É preciso avaliar o desempenho de cada equipamento inserido dentro do seu contexto de funcionamento, operando e interagindo uns com os outros, para ser possível traçar um panorama completo do projeto [4].

Outras metodologias para análise de confiabilidade de um sistema utilizadas incluem a ISE (energia suprida ideal), ESE (energia suprida esperada) e A_e (disponibilidade de energia), que observam o sistema como um todo e permitem traçar análises quanto ao impacto na sua eficiência devido à confiabilidade dos equipamentos e do projeto desenvolvido [4].

Assim sendo, nesse artigo é desenvolvido um estudo detalhado da confiabilidade de uma usina fotovoltaica de 0,5MWp utilizando a topologia *string*. Foram calculadas as probabilidades de falha de cada um dos equipamentos e de seus conjuntos, a partir de suas taxas de falha e taxas de reparo. Foi calculada, também, a ISE e ESE dessa usina, considerando dados de irradiância solar anuais típicos de uma usina no sul do país.

II. METODOLOGIA DE ANÁLISE

As instalações de sistemas fotovoltaicos que se conectam à rede elétrica apresentam diversas topologias de inversores. Neste artigo, focamos na Topologia String, ilustrada na Fig. 1.

Esta configuração é composta por vários painéis fotovoltaicos conectados em série, formando uma string. Cada um desses conjuntos de painéis é então ligado a um único inversor que realiza a conversão da energia para corrente contínua [5]. A topologia string combina vantagens de um inversor central, como uma estrutura mais simples, com as de um microinversor, que inclui um maior aproveitamento energético. Além disso, a perda de incompatibilidade é minimizada nesta configuração devido ao uso do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) no nível da string, o que resulta em uma maior produção de energia em média [6].

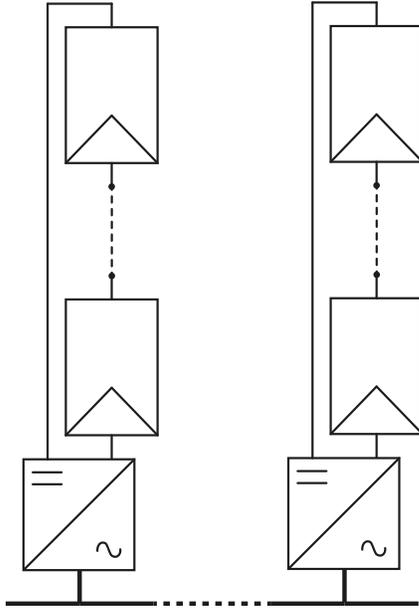


Figura 1. Configuração String

A arquitetura de string é comumente empregada em aplicações residenciais de potência média, onde cada string fotovoltaica é conectada a um inversor. Esta configuração atenua parcialmente os efeitos do sombreamento parcial ou nebulosidade. Com essa abordagem, a transferência de energia para a rede é maximizada, as perdas nos diodos de string são reduzidas e o tamanho do capacitor eletrolítico é diminuído, aumentando, assim, a vida útil do inversor [5], [6].

III. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Para analisar a confiabilidade do sistema, é essencial avaliar a confiabilidade de cada componente individualmente. Inicialmente, será focada a avaliação dos painéis fotovoltaicos.

Após determinar a confiabilidade dos painéis, se dará precedência com a avaliação das strings, inversores e, por fim, será examinada a confiabilidade do sistema quando conectado ao transformador, a ISE, ESE e A_e .

A. Confiabilidade do módulo fotovoltaico

Iniciando com os módulos fotovoltaicos individuais, cada um possui uma taxa de falha (λ) e uma taxa de reparo (μ), que podem ser utilizadas para o cálculo da probabilidade de funcionamento (p) e da probabilidade de falha (q) de um equipamento:

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (1)$$

$$q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2)$$

Cada painel é conectado na string a partir de dois cabos conectores MC4, utilizados na conexão do terminal positivo e negativo do módulo. Cada um desses cabos possui uma probabilidade de falha e funcionamento que pode ser calculado

da mesma maneira descrita pelas equações (1)-(2). Para o fornecimento de energia do painel à string é preciso que os três componentes, painel, cabo “positivo” e cabo “negativo” estejam funcionando. Essa probabilidade pode ser calculada conforme (3):

$$p_{fvc} = P(p_{c^-} | P(p_{fv} | p_{c^+})) = p_{c^-} \cdot p_{fv} \cdot p_{c^+} \quad (3)$$

Onde p_{fv} , p_{c^-} , p_{c^+} e p_{fvc} são as probabilidades de funcionamento do painel, do cabo “negativo”, do cabo “positivo” e de todo o conjunto, respectivamente. $P(p_{fv} | p_{c^+})$ é a probabilidade de p_{fvc} dado p_{c^+} e $P(p_{c^-} | P(p_{fv} | p_{c^+}))$ a probabilidade de p_{c^-} dado $P(p_{fv} | p_{c^+})$. Como p_{fv} , p_{c^-} e p_{c^+} são eventos independentes, essa probabilidade pode ser calculada apenas como o produto das mesmas [7].

Portanto, a probabilidade do painel não estar fornecendo energia à string é dada conforme (4):

$$q_{fvc} = 1 - p_{fvc} \quad (4)$$

B. Confiabilidade de uma string

Assim sendo cada painel possui dois estados, fornecendo ou não energia para a string, p_{fvc} e q_{fvc} , respectivamente. Quando um painel falha e para de fornecer potência à string ele é cortado para fora do conjunto pelo diodo de *by-pass*. Pela string ser conectada em série, isso não afeta a corrente circulando na string, mas reduz a tensão e, conseqüentemente, a potência total.

A probabilidade de um dado estado $\beta(N_{fs})$, onde N_{fs} painéis de um total de N_S , não estão funcionando, pode ser calculada conforme (5):

$$P(\beta(N_{fs})) = p_{fvc}^{N_S - N_{fs}} \cdot q_{fvc}^{N_{fs}} \quad (5)$$

Para simplificação dos cálculos, a confiabilidade do diodo de *by-pass* não foi considerada, já que sua falha só impacta a geração de energia se ocorrer concomitantemente com a do mesmo painel em que ele está conectado, o que configura um evento altamente improvável.

Em uma string de N_S painéis, um estado $\beta(N_{fs})$ pode se repetir diversas vezes, isso porque podem existir diferentes configurações no conjunto onde N_{fs} painéis estão desligados. A probabilidade exata para cada uma dessas combinações, $P(S(N_{fs}))$ é dada por (6):

$$\begin{aligned} P(S(N_{fs})) &= \binom{N_S}{N_{fs}} P(\beta(N_{fs})) \\ &= \frac{N_S!}{N_{fs}!(N_S - N_{fs})!} P(\beta(N_{fs})) \end{aligned} \quad (6)$$

Onde $\binom{N_S}{N_{fs}}$ é a combinação de N_S painéis, N_{fs} a N_{fs} .

C. Confiabilidade de inversores string

As probabilidades de funcionamento e falha, p_i e q_i , de um único inversor podem ser calculadas partindo de sua taxa de falha e taxa de reparo seguindo mesmo processo descrito na seção 4.1. Com esse tipo de inversor cada string é conectada

a um único equipamento e a falha do mesmo resulta na perda de energia de toda a string.

Outro evento independente que pode levar ao mesmo resultado, perda de toda a energia sendo gerada pela string, é no caso da falha da chave DC que liga a string ao inversor. Sendo assim, as probabilidades de funcionamento p_{ci} e falha q_{ci} desse conjunto de elementos são dadas pelas equações (7)-(8):

$$p_{ci} = P(p_i | p_{cdc}) \quad (7)$$

$$p_{ci} = p_i \cdot p_{cdc}$$

$$q_{ci} = 1 - p_{ci} \quad (8)$$

Onde p_i e p_{cdc} representam, respectivamente, as probabilidades de funcionamento do inversor e da chave DC. Os inversores são conectados em paralelo, portanto e a probabilidade $P(I(N_{fi}))$ de N_{fi} inversores não serem capazes de fornecer a energia da string é dada por (9):

$$P(I(N_{fi})) = \binom{N_I}{N_{fs}} p_{ci}^{N_I - N_{fs}} \cdot q_{ci}^{N_{fs}} \quad (9)$$

D. Confiabilidade de transformadores

O cálculo da confiabilidade segue o mesmo processo descrito na seção anterior para inversores, onde também existe uma chave ligando o transformador ao sistema que, em caso de falha, o impede de fornecer energia à rede. Suas probabilidades de funcionamento e falha p_t e q_t podem ser obtidas por seus parâmetros λ e μ . No caso da existência de mais de um transformador presente na ligação da usina fotovoltaica à rede, a probabilidade de N_{ft} transformadores não conseguirem fornecer energia à rede simultaneamente, em um conjunto de N_T equipamentos, é dada por (10):

$$P(T(N_{ft})) = \binom{N_T}{N_{ft}} p_{ct}^{N_T - N_{ft}} \cdot q_{ct}^{N_{ft}} \quad (10)$$

Onde p_{ct} e q_{ct} representam, respectivamente, a probabilidade de funcionamento e falha de um conjunto de transformador e chave.

E. Índices de confiabilidade

1) *Energia suprida ideal*: A energia suprida ideal, ou ISE, é a energia que pode ser entregue à rede elétrica em um sistema 100% confiável, ou seja, onde todos os componentes estão operando o tempo todo. Seu cálculo considera a irradiância disponível e a eficiência dos equipamentos, conforme a equação (11):

$$ISE = \sum_{k=1}^K E_{mk} P(E_{mk}) A_{fv} \eta_k N_S N_I \eta_i T_o \quad (11)$$

Onde E_{mk} é o k-ésimo valor de irradiância de uma função de probabilidade que representa a incidência solar no local de construção da usina e $P(E_{mk})$ a probabilidade de ocorrência dessa faixa de irradiância. É importante ressaltar que para a construção dessa distribuição de probabilidade apenas os valores não nulos de irradiância são considerados. A_{fv} é a área

do painel fotovoltaico, η_k a eficiência do painel para aquele nível de irradiância, N_S o número de painéis por strings, N_I o número de inversores, η_i a eficiência dos inversores e T_o o tempo total de operação da usina durante o período analisado.

2) *Energia suprida esperada*: A energia suprida esperada, ou ESE, é a energia que se espera ser entregue ao sistema elétrico, ao se considerar a confiabilidade dos componentes que compõem a usina. A ESE possui o cálculo mais complexo que a ISE e portanto será apresentada por partes. O cálculo da ESE de uma string, ESE_S , precisa considerar a tensão mínima de operação do inversor, pois quando muitos painéis na mesma string são desconectados devido a falhas, sua tensão pode cair abaixo desse valor e o inversor deixa de ser capaz de atuar, perdendo-se também a energia gerada pelos painéis remanescentes conectados ao mesmo. Assim sendo, ESE_S se da por (12):

$$ESE_S = \sum_{s=0}^{N_S} \Gamma(V_s) (N_S - N_{fs}) P(S(N_{fs})) T_o \quad (12)$$

Onde o índice s representa o número de painéis com falha e $\Gamma(V_s)$ é a função que descreve a potência dos painéis dado que a tensão da string V_s é maior que a tensão mínima do inversor V_m . Essa função pode ser calculada como:

$$\Gamma(V_s) = \begin{cases} \sum_{k=1}^K E_{mk} P(E_{mk}) A_{fv} \eta_k, & \text{se } V_s \geq V_m \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (13)$$

Com a ESE_S calculada é possível a utilizar no cálculo da ESE_I , que avalia a energia suprida esperada considerando todos os inversores e suas taxas de falha. Essa indicador é calculado tal como (14):

$$ESE_I = \sum_{i=0}^{N_I} ESE_S(N_I - N_{fi}) P(I(N_{fi})) \eta_i \quad (14)$$

Por fim, resta apenas considerar a confiabilidade dos transformadores e o cálculo da ESE estará completo. Para isso, é importante se atentar que, conforme vão se perdendo equipamentos devido a falhas, a potência total que os transformadores remanescentes são capazes de transmitir é reduzida junto. Assim sendo a ESE pode ser calculada por (15):

$$ESE = \sum_{t=0}^{N_T} T(P_{max,t}) (N_T - N_{ft}) P(T(N_{ft})) \quad (15)$$

Onde $P_{max,t}$ representa a potência máxima que os transformadores operando são capazes de transmitir e $T(P_{max,t})$ pode ser calculado como:

$$T(P_{max,t}) = \begin{cases} ESE_I, & \text{se } ESE_I \leq P_{max,t} \\ P_{max,t}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (16)$$

3) *Disponibilidade de Energia*: A disponibilidade de energia, ou A_e , é a razão entre ESE e ISE e um poderoso indicador de confiabilidade que representa a parcela de energia que o sistema é capaz de extrair após considerar as possíveis falhas dos equipamentos e seus efeitos no sistema. Assim sendo a A_e pode ser calculada como:

$$A_e = \frac{ESE}{ISE} \quad (17)$$

IV. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, apresentaremos o estudo de caso para um projeto de uma usina fotovoltaica (PV) centralizada de 0,5 Megawatts-pico (MWp). A Fig. 2 mostra a topologia da usina utilizada no projeto. Na Figura 3, é possível observar o conjunto de dados de irradiação medida em horas ao longo de um ano usado no estudo.

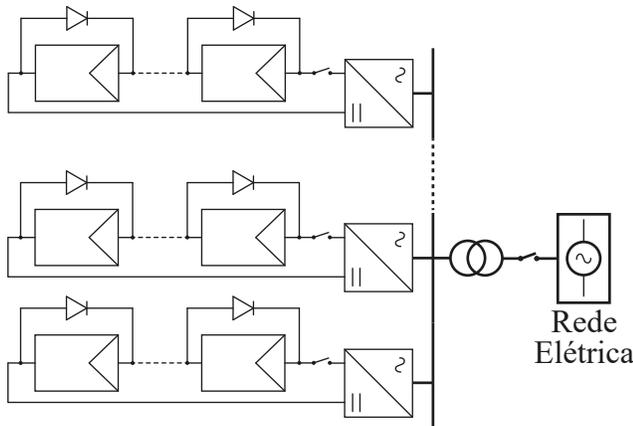


Figura 2. Topologia String

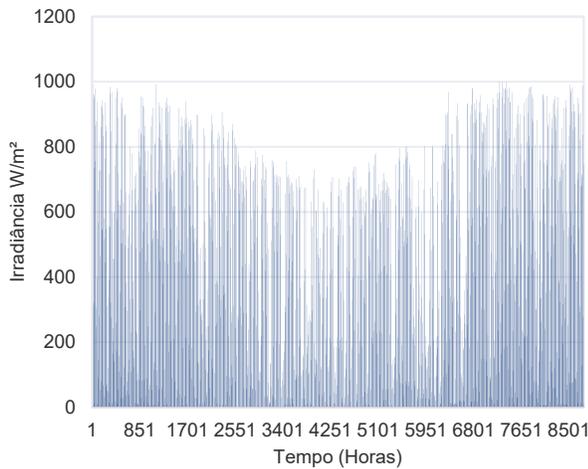


Figura 3. Dados de irradiação utilizados no projeto.

A avaliação da confiabilidade desta usina fotovoltaica, conforme delineada na Tabela I foca nas taxas de falha e de reparo de cada componente presente na usina. Esse enfoque oferece

uma compreensão aprofundada da durabilidade, da eficiência e dos procedimentos de manutenção para cada parte do sistema.

Tabela I
TAXA DE FALHA E TAXA DE REPARO DOS COMPONENTES

Componente	λ [10^{-4}h^{-1}]	μ [10^{-4}h^{-1}]
Inversores String	0,036824	10000
Módulo FV	0,000631	10000
Chaves	0,14269	10000
Transformador	0,00230	285,4

Os valores das taxas de falha e de reparo foram obtidos a partir de dados históricos de operação. De acordo com [8], onde é realizada uma análise utilizando cadeias de Markov.

Podemos observar as características dos painéis fotovoltaicos e os inversores escolhidos para análise na Tabela II e na Tabela III.

Tabela II
DETALHES TÉCNICOS DOS MÓDULOS FV

Eficiência do Módulo	21,57	%
Potência Máxima (Pmax)	670	W
Tensão de Máxima Potência (Vm)	37,63	V
Corrente de Máxima Potência (Im)	17,81	A

Tabela III
DETALHES TÉCNICOS DOS INVERSORES

Máxima Eficiência	98,75	%
Tensão Máxima de Entrada DC	1100	V
Tensão Mínima	250	V
Tensão Nominal	580	V
Corrente Máxima de Entrada DC para cada MPPT	27	A
Potência Máxima de Saída AC	20000	W
Corrente Máxima de Saída AC	31,9	A

A. Configuração do Sistema

Para o estudo de confiabilidade desenvolvido neste trabalho foram utilizados dados de irradiação de um período de um ano conforme ilustrado na Fig. 3, armazenados de hora em hora, totalizando uma entrada de 8760 valores. Esses dados foram agrupados em vinte diferentes faixas de valores distintas, excluindo-se as ocorrências de zero irradiação. Com base no número de ocorrências para cada porção de irradiação foi construída uma Função Massa de Probabilidade (FMP) para desses dados, apresentada na Figura 4 e utilizada nos cálculos da ISE e ESE.

A FMP é uma função discreta que representa a probabilidade de ocorrência de uma faixa de valores de irradiação. Conforme os dados, chegou-se a um valor médio de irradiação de **359,15 W/m²** durante o ano todo, utilizado como base nos cálculos das seções a seguir.

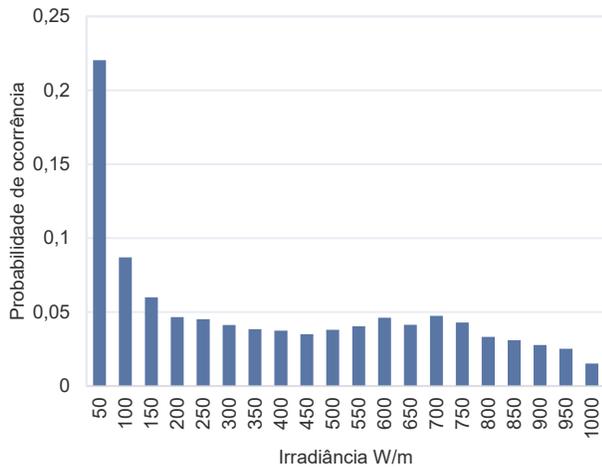


Figura 4. Função Massa Probabilidade da Irradiância

B. Cálculo dos Equipamentos de Projeto

1) *String*: Dado que a tensão máxima de entrada do inversor é de 1100 V (V_{maxInv}), e a tensão máxima do módulo FV é de 37,63 V (V_{maxFV}), podemos calcular a quantidade de painéis por string. Nesse caso, nossa única limitação está relacionada à tensão, pois estamos operando com um único ponto de rastreamento máximo de potência (MPPT), e não há restrições em relação à corrente.

$$\frac{V_{maxInv}}{V_{maxFV}} = N_{FVs} \quad (18)$$

$$\frac{1100V}{37,63V} = 29,23199$$

Portanto, teremos 29 painéis por string.

2) *Potência Total do Sistema*: Cada string terá uma potência total de 18,760 W, o que significa que, com uma única string, o sistema estará operando abaixo da capacidade máxima do inversor, que é de 20,000 W. Portanto, para um projeto de 0,5MWp, serão necessários um total de 26 inversores.

V. RESULTADOS

Para realizar o estudo de confiabilidade deste sistema, foram desenvolvidos dois casos de análise. O primeiro caso consiste no caso base, desenvolvido para fins de avaliar o desempenho normal do sistema; no segundo, foi alterada a taxa de falha dos equipamentos, para conferir a sensibilidade da confiabilidade quanto aos efeitos de incremento no tempo médio de falha dos equipamentos.

A. Caso Base

A análise descrita nas seções anteriores foi aplicada no sistema recém-apresentado para avaliar sua confiabilidade. Com os valores das taxas de falha e reparo de cada um dos componentes, foram calculadas as probabilidades de sucesso e falha, conforme a Tabela IV.

Partindo da irradiância média de $359,15 \text{ W/m}^2$, e utilizando os valores de p e q da Tabela IV nas equações da Seção 3, é

Tabela IV
PROBABILIDADE DE SUCESSO (P) E PROBABILIDADE DE FALHA (Q)

Componente	λ [10^{-4} h^{-1}]	μ [10^{-4} h^{-1}]	p	q
Inversores String	0,036824	10000	0,999999937	0,000000063
Módulo FV	0,000631	10000	0,999999937	0,000000063
Chaves	0,14269	10000	0,999985731	0,000014269
Transformador	0,00230	285,4	0,999991941	0,000008059

possível determinar os valores de ISE e ESE do sistema. Para visualizar melhor os dados em relação à potência nominal, a parcela de tempo T_o foi retirada do cálculo das ISEs e ESEs nas tabelas de COPT (*Capacity Outage Probability Table*). Essa parcela de tempo foi adicionada apenas no resultado final, facilitando a análise dos valores em relação à potência nominal dos equipamentos.

Dessa forma, o cálculo de ISE_S e ESE_S está representado na Tabela V. De acordo com este método, também é possível calcular ISE e ESE para os inversores e o transformador, respectivamente.

Tabela V
COPT DOS MODULOS FV

N_{fs}	P ideal (W)	Probabilidade	P esperada (W)
0	6978,70	9,99E-01	6,97E+03
1	6738,05	8,29E-04	5,58E+00
2	6497,41	3,32E-07	2,16E-03
3	6256,76	8,54E-11	5,34E-07
4	6016,12	1,59E-14	9,55E-11
5	5775,47	2,27E-18	1,31E-14
6	5534,83	2,60E-22	1,44E-18
7	5294,18	2,44E-26	1,29E-22
8	5053,54	1,92E-30	9,71E-27
9	4812,89	1,28E-34	6,17E-31
10	4572,25	7,33E-39	3,35E-35
11	4331,60	3,62E-43	1,57E-39
12	4090,96	1,55E-47	6,36E-44
13	3850,32	5,81E-52	2,24E-48
14	3609,67	1,90E-56	6,86E-53
15	3369,03	5,43E-61	1,83E-57
16	3128,38	1,36E-65	4,25E-62
17	2887,74	2,97E-70	8,59E-67
18	2647,09	5,67E-75	1,50E-71
19	2406,45	9,39E-80	2,26E-76
20	2165,80	1,34E-84	2,91E-81
21	1925,16	1,65E-89	3,17E-86
22	1684,51	1,71E-94	2,88E-91
23	0,00	1,49E-99	0,00E+00
24	0,00	1,07E-104	0,00E+00
25	0,00	6,09E-110	0,00E+00
26	0,00	2,68E-115	0,00E+00
27	0,00	8,52E-121	0,00E+00
28	0,00	1,74E-126	0,00E+00
29	0,00	1,72E-132	0,00E+00
ESE _S			6,978,4965
ISE _S			6,978,6961

A eficiência dos painéis fotovoltaicos influenciou o valor do ISE direcionado aos inversores. Com 26 inversores instalados

na usina, o ISE total ajustado, considerando a eficiência dos painéis, foi de 179667,9268 W. De forma semelhante, os cálculos de COPT foram realizados para os inversores, levando em conta a eficiência desses componentes. Os resultados obtidos foram:

- ISE_I : 179652,51170 W
- ESE_I : 179652,4777 W

Com todos esses cálculos realizados é possível encontrar finalmente os valores finais do ISE, ESE e Disponibilidade de energia (A_e) para essa usina fotovoltaica, conforme apresentado na Tabela VI. Os resultados encontrados foram bastante satisfatórios para esse conjunto, apresentando um A_e bastante próximo de 1, indicando que esse sistema possui uma alta confiabilidade.

Tabela VI
ISE, ESE E A_e DA USINA FOTOVOLTAICA COMPLETA

ISE (MWH)	ESE (MWH)	A_e
854,6803	854,6489	0,9999632778

B. Alterando o valor da taxa de falha

Para esse caso, foi investigado o efeito da alteração da taxa de falha dos equipamentos na confiabilidade do sistema. Para isso foram consideradas duas alterações, incrementando a taxa de falha de todos os equipamentos em 100% e um caso extremo onde esse valor foi aumentado em 200%. Os efeitos dessas alterações da ESE e A_e da usina são apresentados na Tabela VII.

Tabela VII
IMPACTOS DA ALTERAÇÃO DA TAXA DE FALHA NA CONFIABILIDADE DO SISTEMA

	Caso Base	Incremento de 100%	Incremento de 200%
ISE (MWH)	854,68033	854,68033	854,68033
ESE (MWH)	854,64894	854,61756	854,58618
A_e	0,9999632778	0,9999265575	0,999889839

Este sistema, em si, apresenta uma confiabilidade bastante alta, mesmo quando se considera o aumento na taxa de falha de todos os equipamentos.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo focou na análise de confiabilidade de um sistema fotovoltaico. Foram desenvolvidos dois casos de estudo: o primeiro, um caso base para avaliar o desempenho normal do sistema; e o segundo, uma variação da taxa de falha (λ) dos equipamentos em 100% e 200% para avaliar a sensibilidade da confiabilidade do sistema às mudanças nos períodos de falha.

O segundo caso do estudo, que envolveu a alteração da taxa de falha dos equipamentos, apresentou resultados que também destacam a alta confiabilidade do sistema. Essa análise foi realizada para entender a sensibilidade do sistema a diferentes cenários de falha. O ESE variou ligeiramente em diferentes cenários. No caso base, foi de 854,64894 MWh, diminuindo

para 854,58618 MWh no pior cenário de 200% de incremento da taxa de falha.

Os resultados finais do estudo, focados no ISE (Energia Suprida Ideal), ESE (Energia Suprida Esperada) e na disponibilidade de energia (A_e), reforçam a alta confiabilidade do sistema fotovoltaico. Com um A_e inicial de 0,9999632778, o sistema demonstra capacidade de atingir quase integralmente sua performance ideal em condições normais de operação. Esse alto nível de eficiência é mantido mesmo quando se considera um aumento de 200% na taxa de falha, onde a disponibilidade ainda se mostra robusta, alcançando 0,999889839. Estes resultados evidenciam que, apesar das variações nas condições de manutenção, o sistema mantém um excelente nível de disponibilidade.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their gratitude to the Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

REFERÊNCIAS

- [1] J. Zhou, X. Su, and H. Qian, "Risk assessment on offshore photovoltaic power generation projects in china using d numbers and anp," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144704–144717, 2020.
- [2] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner, "Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, 2010.
- [3] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. 233 Spring Street, New York, N. Y: Plenum Press, New York, 2^o edition ed., 1994.
- [4] A. M. Mustafa, W. A. Omran, Y. G. Hegazy, and M. Abu-Elnaga, "Reliability assessment of grid connected photovoltaic generation systems," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 1543–1549, 2015.
- [5] Y. Yang and F. Blaabjerg, "Overview of single-phase grid-connected photovoltaic systems," in *Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS®*, pp. 41–66, CRC Press, 2017.
- [6] D. Kolantla, S. Mikkili, S. R. Pendem, and A. A. Desai, "Critical review on various inverter topologies for pv system architectures," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 17, pp. 3418–3438, 2020.
- [7] S. S. Epp, *Discrete mathematics with applications*. Wadsworth Publ. Co., 1990.
- [8] S.-V. Oprea, A. Băra, D. Preoteşcu, and L. Elefterescu, "Photovoltaic power plants (pv-pp) reliability indicators for improving operation and maintenance activities. a case study of pv-pp agigea located in romania," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 39142–39156, 2019.