

INFLUÊNCIA DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DE INVERSOR NO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM OPERAÇÃO NO SUL DO BRASIL

André Possamai Rosso – possamairosso@yahoo.com.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais

Geóvio Kroth – geovio.kroth@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina, Departamento de Eletrotécnica

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade

Lirio Schaeffer – schaeffer@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais

Resumo. *Nos últimos anos, a geração distribuída com sistemas fotovoltaicos apresenta crescimento exponencial fundamentado em aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. O desempenho de um sistema fotovoltaico depende, especialmente, de fatores ambientais, radiação solar e temperatura ambiente, e de características elétricas dos componentes, módulos e inversores. O fator de dimensionamento de inversor (FDI) é definido como a razão entre a potência em corrente alternada do inversor e a potência nominal do gerador fotovoltaico. A eficiência de conversão do inversor é função da potência relativa, ou seja, do nível de carregamento do inversor e da tensão c.c. de entrada. O monitoramento e análise de sistemas fotovoltaicos é importante para verificação de desempenho e de confiabilidade da tecnologia. Os índices de mérito são relacionados à eficiência do sistema, produtividade, perdas do sistema e a energia elétrica produzida. Este artigo apresenta um estudo dos índices de produtividade (YF), de taxa de desempenho (PR) e eficiência de conversão do inversor de dois subsistemas (Sub 1 e Sub 2) de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) instalado no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) em Criciúma/SC. O horizonte de análise está compreendido entre 2018 e 2020. Os módulos dos subsistemas Sub 1 e Sub 2 apresentam os mesmos ângulos de inclinação e de azimute. O subsistema Sub 1 tem FDI de 1,12 enquanto o subsistema Sub 2 tem FDI de 0,76. A produtividade anual do Sub 1 variou entre 1221 kWh/kWp e 1295 kWh/kWp enquanto a produtividade anual do Sub 2 variou entre 1223 kWh/kWp e 1277 kWh/kWp. Os valores de eficiência de conversão média mensal do inversor do Sub 1 são similares aos valores de eficiência de conversão média mensal do inversor do Sub 2 em todo o horizonte de análise.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Índices de mérito, Fator de dimensionamento do inversor.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que possui um grande potencial para energias renováveis, como eólica, hídrica, biomassa e a solar fotovoltaica, portanto, o Brasil é um país que pode ser seguido como exemplo na geração de energia elétrica de forma sustentável. Nos últimos anos, o Brasil vem crescendo de forma exponencial no uso de energia solar fotovoltaica para sistemas de pequena geração (GD) (Deschamps e Rüther, 2019).

Alguns parâmetros podem afetar o desempenho de um arranjo de módulos fotovoltaicos. A radiação solar é o parâmetro principal, que depende da localização geográfica da instalação do sistema, do clima no local da instalação, bem como de seus ângulos de inclinação e azimute além da possibilidade de sombreamentos. Outros parâmetros como: temperatura dos módulos, sombreamento parcial, o descasamento entre os módulos ou painéis de uma mesma *string* (*module mismatch losses*), as resistências dos condutores e a limpeza dos módulos, também influenciam no desempenho de geração do sistema fotovoltaico (Rüther, 2004).

Outro fator que pode influenciar no desempenho de um sistema fotovoltaico é a tecnologia e a potência do inversor. Através da carga que está conectada ao inversor, a eficiência de conversão do inversor pode variar. O superdimensionamento dos geradores fotovoltaicos em relação a capacidade dos inversores, pode levar o inversor, há um tempo de vida de operação menor (Rüther, 2004).

O inversor é responsável por converter a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (FV) em corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) com as características e qualidade necessárias para injeção na rede ou consumida instantaneamente pelas unidades consumidoras. O conceito de fator de dimensionamento do inversor (FDI) estabelece a relação entre a potência do inversor e a potência do gerador FV sob condições de teste padrão (STC) (Rampinelli *et al.*, 2007).

Os parâmetros de desempenho permitem a detecção de problemas operacionais dos sistemas fotovoltaicos, facilitam a comparação de sistemas que podem diferir no que diz respeito ao design, tecnologia ou localização geográfica e validar modelos para estimativa de desempenho do sistema durante a fase de projeto. Os parâmetros que descrevem as quantidades de energia para o sistema fotovoltaico e seus componentes foram estabelecidos pelo Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica da Agência Internacional de Energia (IEA) e estão descritos na norma IEC 61724. O rendimento

de energia do sistema fotovoltaico, que é uma medida direta de produtividade, é a relação entre a energia total gerada pelo sistema fotovoltaico na saída do inversor em um determinado intervalo de tempo e a potência nominal do sistema fotovoltaico (kWh / kWp) (Marion, 2005, Zomer *et al.* 2020).

Uma análise sobre o desempenho de SFCR é importante para acompanhar a produção de energia desse sistema e para analisar parâmetros que podem afetar diretamente na produção de energia elétrica. Os índices de mérito ou de desempenho são relacionados à eficiência do sistema, produtividade, perdas do sistema e a energia elétrica produzida. Uma alternativa para avaliar um SFCR é através dos índices de méritos que relacionam a produtividade e o desempenho dos sistemas.

Este artigo apresenta um estudo dos índices de mérito *YF* e *PR* e uma análise da correlação da eficiência dos inversores com relação a *YF* de dois subsistemas de um SFCR do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Criciúma/SC. Os módulos dos subsistemas Sub 1 e Sub 2 estão instalados com o mesmo ângulo de inclinação (10°) e com um desvio azimutal de -9° N. A diferença entre os subsistemas está no fator de dimensionamento dos inversores.

2. METODOLOGIA

Esta seção faz referência aos métodos de análises de índices de desempenho do sistema de geração fotovoltaica localizado no Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC na cidade de Criciúma - SC.

2.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede

O sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) é composto por 229 módulos fotovoltaicos de modelo CS6K do fabricante *Canadian Solar* com potência nominal individual de 320 Wp e 5 inversores de modelo Symo 15.0-3-M do fabricante *Fronius* com potências nominais de 15 kW. A potência total do sistema é de 73,28 kWp. Os arranjos fotovoltaicos estão dispostos em três blocos do campus Criciúma/SC (latitude $28,40^\circ$ S, longitude $49,19^\circ$ W e 47 m acima do nível do mar). O sistema fotovoltaico conectado à rede está dividido em 5 subsistemas, sendo que neste trabalho são analisados os subsistemas Sub 1 e Sub 2. O subsistema Sub 1 tem FDI de 1,12 enquanto o subsistema Sub 2 tem FDI de 0,76.

As orientações geográficas dos módulos do sistema fotovoltaico conectado à rede são: norte, oeste e leste, conforme apresentado na Fig. 1. Os módulos estão instalados na cobertura das edificações e acompanham um ângulo de inclinação de 10° e um ângulo de desvio azimutal de -9° em relação ao norte para os subsistemas Sub 1 e Sub 2. As especificações dos inversores Symo 15.0-3-M estão apresentadas na Tab. 1. Os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos CS6K com potência nominal de 320 Wp estão apresentados na Tab. 2. A distribuição das conexões dos módulos (strings) e da ligação com os inversores está apresentada na Tab. 3.

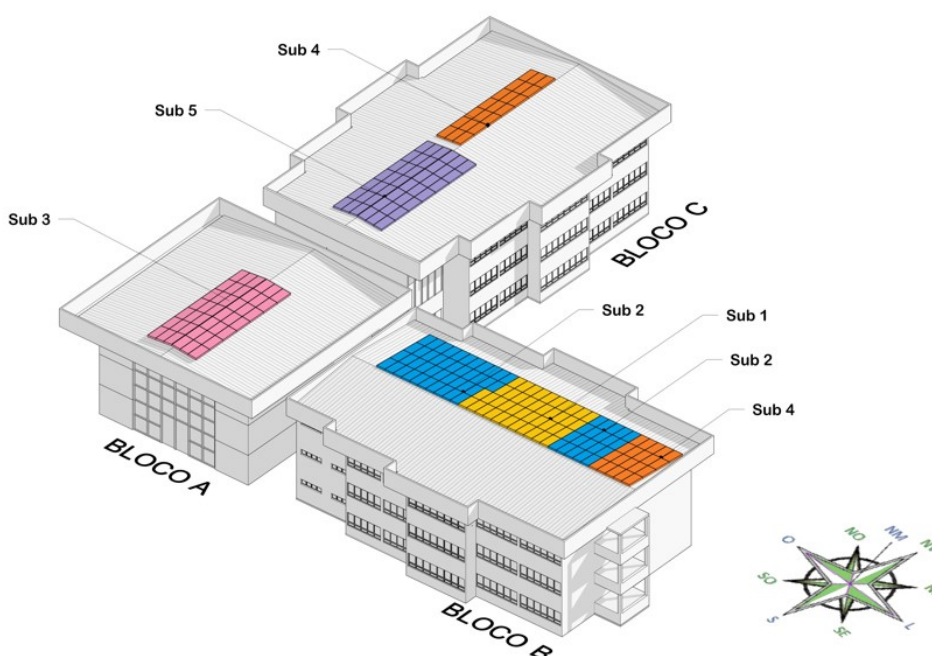


Figura 1 – Distribuição dos módulos fotovoltaicos do SFCR aplicados na cobertura das edificações do IFSC.

Tabela 1 – Especificações dos inversores

DADOS DOS INVERSORES	
Potência nominal [kW]	15,0
Faixa de tensão de operação [V]	3-NPE 220/127
Corrente nominal [A]	41,6
Fator de potência	> 0.99 ind/cap
Eficiência máxima [%]	98,1
Frequência de operação [Hz]	60
Máxima tensão de saída [V]	270
Distorção harmônica total [%]	< 3
Grau de proteção	IP - 54
Topologia	<i>Transformeless</i>
Resfriamento	Ventilação forçada
Comunicação	Wi-fi
Fabricante/Modelo	<i>Fronius/SYMO</i>

Tabela 2 – Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico CS6K nas condições STC.

CANADIAN 320 W - STC	
P_M (W)	320
V_{oc} (V)	45,3
I_{cc} (A)	9,26
I_{MP} (A)	8,69
V_{MP} (V)	36,8
η (%)	16,68

Tabela 3 – Distribuição das *strings* nos inversores.

INVERSORES	MÓDULOS	STRINGS	POTÊNCIA (kWp)	FDI
Inversor 1	42	2 x 21 módulos	13,44	1,12
Inversor 2	62	2 x 21 + 1 x 20 módulos	19,84	0,76
Inversor 3	42	2 x 21 módulos	13,44	1,12
Inversor 4	41	1 x 21 + 1 x 20 módulos	13,12	1,14
Inversor 5	42	2 x 21 módulos	13,44	1,12
Total	229		73,28	1,02

O monitoramento online do sistema é disponibilizado pela fabricante do inversor (*Fronius*). As principais grandezas relacionadas ao sistema de geração de energia elétrica podem ser visualizadas e acompanhadas, e relatórios podem ser emitidos. O sistema pode ser monitorado pelo acesso do site *SolarWeb.com*. As medidas que são disponibilizadas no relatório são de irradiância (W/m^2), velocidade do vento (km/h), temperatura ambiente ($^{\circ}C$), temperatura do módulo ($^{\circ}C$), corrente elétrica c.a. (A), corrente elétrica c.c. (A), tensão c.a. (V), tensão c.c. (V), energia produzida em c.c. (Wh), energia produzida em c.a. (Wh).

A instalação do sistema fotovoltaico de geração distribuída no campus do IFSC – Criciúma foi concluída em setembro de 2017. Os relatórios dos dados sobre o sistema de geração já estão disponíveis no sistema online a partir do mês de outubro de 2017. O horizonte de análise no presente trabalho está compreendido entre janeiro de 2018 e dezembro de 2020.

Os parâmetros elétricos e energéticos do período de 2018 a 2020 foram compilados em tabelas do software Excel. Os dados apresentados nos relatórios são: corrente c.a. de saída de cada fase dos inversores trifásicos, corrente c.c. de entrada nos inversores, tensão c.a. de saída de cada fase dos inversores, tensão c.c. de entrada dos inversores, energia elétrica c.a. de saída de cada inversor, energia elétrica c.a. dos 5 subsistemas, velocidade do vento, irradiância solar, temperatura ambiente e temperatura dos módulos fotovoltaicos. Os dados são integralizados a cada 5 minutos. Os dados de interesse são tratados e integrados em dados horários, considerando como válidos os valores entre 06h e 20h para cada dia, sendo que a geração fotovoltaica se encontra dentro dessa faixa de horário. A partir desses novos dados foram encontrados os índices de desempenho dos subsistemas do sistema fotovoltaico.

Os subsistemas analisados no presente trabalho são Sub 1 e Sub 2. Estes subsistemas estão localizados com a mesma orientação -9° em relação ao Norte e ângulo de inclinação de 10° . A diferença entre o Sub 1 e o Sub 2 está no fator de dimensionamento de inversor. O Sub 1 apresenta um FDI de 1,12 enquanto o Sub 2 apresenta um FDI de 0,76.

2.2 Índices de mérito de desempenho

O desempenho dos subsistemas do SFCR foi avaliado por meio dos seguintes índices de desempenho:

1. Produtividade do sistema (YF): O índice de produtividade do sistema é definido pela razão entre a energia elétrica em corrente alternada (c.a.) a potência nominal do sistema ou subsistema fotovoltaico. Esse índice representa qual a produção em um período considerado, em kWh para cada kWp instalado. Este parâmetro também indica o número de horas que o sistema deveria operar, em sua potência nominal, para fornecer a mesma energia elétrica. Este índice normaliza a energia elétrica produzida em relação à potência do sistema; consequentemente, é uma maneira conveniente de comparar a energia elétrica produzida por sistemas fotovoltaicos de potências diferentes. A Eq. (1) representa YF :

$$YF = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_{nom}} \quad (1)$$

onde: $P(t)$ é a potência entregue pelo sistema no instante t , em kW; P_{nom} é a potência nominal do sistema, em kWp e T é o período de integração

2. *Performance Ratio (PR)*: A *performance ratio (PR)* também é conhecido como taxa de desempenho e é representado pela real capacidade do sistema de converter a energia solar disponível no plano do gerador fotovoltaico em energia elétrica. É a razão entre a a produtividade do sistema fotovoltaico e a produtividade de referência. A PR é representada pela Eq. (2):

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (2)$$

onde: Y_R representa a produtividade de referência. Este parâmetro é dado pela irradiação solar no plano (H_t) dividida pela irradiância de referência (G_{ref}). Ele representa um número equivalente de horas na irradiância de referência. Tomando-se G_{ref} como $1.000 W/m^2$, tem-se então Y_R como o número de horas de pico de sol ou a irradiação solar em unidades de kWh/m². Y_R é mostrado na Eq. (3):

$$Y_R = \frac{H_t}{G_{ref}} \quad (3)$$

onde: H_t representa a irradiação solar medida no plano do arranjo, em kWh/m² no período considerado; G_{ref} representa a irradiância de referência na condição padrão de testes, sendo igual a $1.000 W/m^2$.

3. Eficiência dos inversores (η_{INV}): A eficiência do inversor é a razão entre a energia elétrica em corrente alternada (c.a.) medida na saída do inversor e a energia elétrica em corrente contínua (c.c.) medida na entrada do inversor. A Eq. (4), apresenta a eficiência do inversor (η):

$$\eta_{INV} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} \times 100 \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curva das potências c.c. dos subsistemas

Para o levantamento das curvas de potências c.c. dos subsistemas em relação a irradiância solar (Fig. 2), foi escolhido um dia de céu claro (sem presença de nuvens) na estação de verão. O dia escolhido foi o dia 3 de janeiro do ano de 2018.

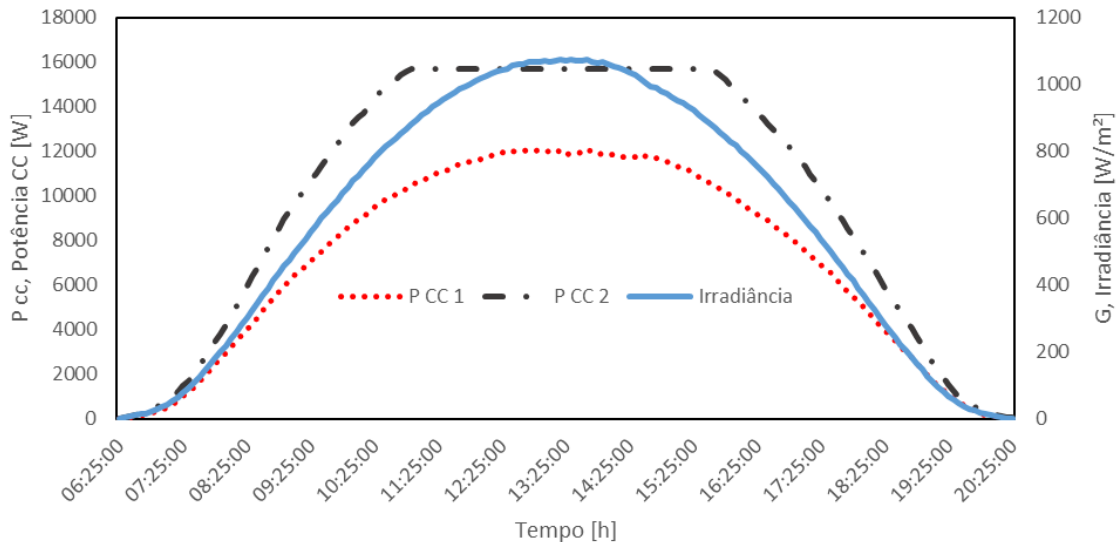


Figura 2 – Potência fotovoltaica dos dois subsistemas em um dia totalmente ensolarado e de verão (03/01/2018).

Pode-se observar na Fig. 2 que a potência possui uma correlação com a irradiância. A partir da Fig. 2 observa-se que o sistema fotovoltaico com FDI menor apresenta um corte de potência em irradiâncias mais altas. A Fig. 2 apresenta o momento em que ocorre a sobrepotência do inversor 2. O corte de potência, nestas condições, ocorre em irradiâncias próximas de 900 W/m² e aproximadamente das 11:00h até as 15:30h.

No período em que ocorre a sobrepotência, verifica-se também uma redução de corrente elétrica na entrada do inversor, como pode ser observado na Fig. 3. A razão é que em valores acima de 850 W/m² o inversor do Sub 2 opera em sua potência máxima de saída, por medida de segurança o inversor sai do P_{MP} (Ponto de máxima potência) em direção a V_{OC} (Tensão de circuito aberto), reduzindo a corrente elétrica em sua entrada e aumentando a tensão. O inversor subdimensionado apresenta maiores frequências de sobrepotência e, conseqüentemente, atinge maiores níveis de temperatura de operação, o que pode reduzir a vida útil do inversor. A Fig. 3 apresenta o momento da redução de corrente elétrica do Sub 2. Pode-se observar a partir da Fig. 3 que a corrente elétrica possui uma correlação linear com a irradiância.

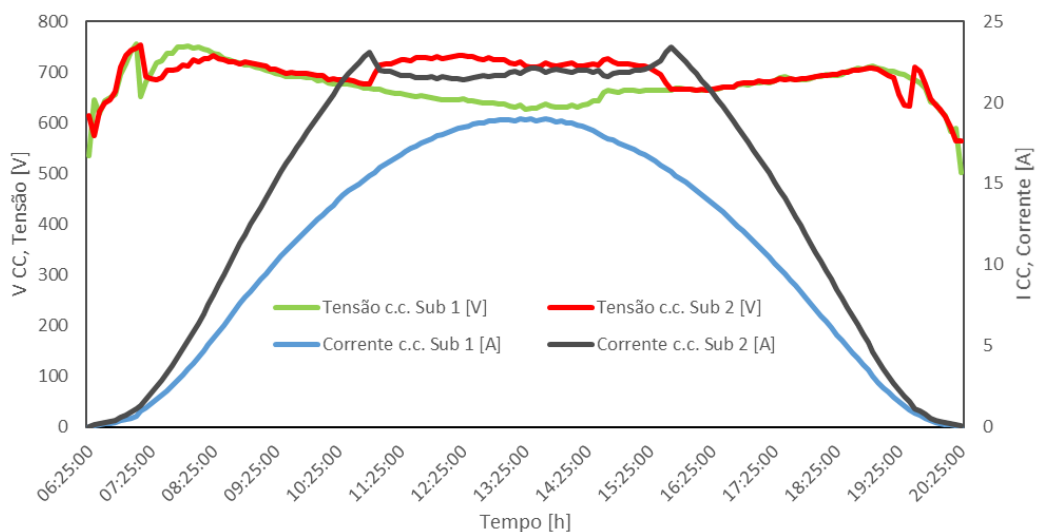


Figura 3 – Relação da corrente (c.c.) e a tensão (c.c.) no dia ensolarado (03/01/2018).

3.2 Índice de produtividade, YF

A Fig. 4 apresenta os valores mensais do índice YF dos dois subsistemas e da irradiação solar para os anos de 2018, 2019 e 2020. Analisando a Fig. 4, pode-se observar que os Sub 1 e Sub 2 apresentaram uma maior produtividade nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro e uma menor produtividade nos meses junho e julho. Outra análise que pode ser destacada é que o Sub 2 tem uma produtividade nos meses de verão quando comparado com a produtividade do Sub 1. Essa menor produtividade é consequência FDI que implica em maior ocorrência dos períodos de sobrepotência.

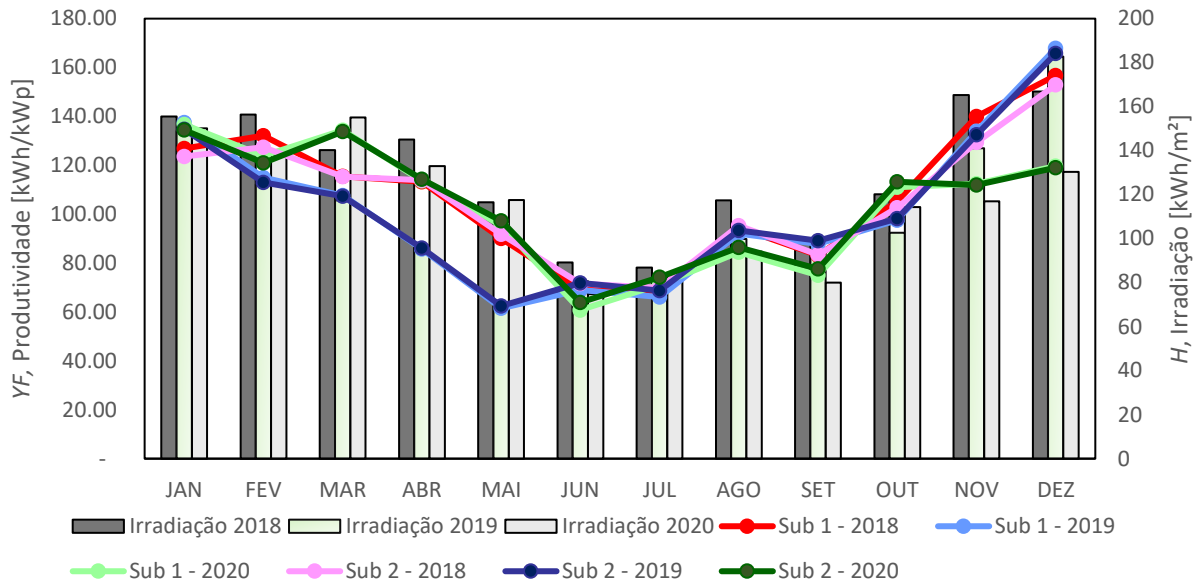


Figura 4 – Índice de YF com a irradiação dos Sub 1 e Sub 2 para os anos de 2018, 2019 e 2020.

Pode-se observar que quando comparado o ano de 2019 com os anos de 2018 e 2020, os subsistemas apresentaram uma YF menor nos meses entre fevereiro e maio. Essa produtividade menor é devido a irradiação solar do ano de 2019, neste período, ter sido menor em comparação a irradiação solar verificada nos anos de 2018 e 2020. Analisando a Fig. 5, o Sub 2 apresentou uma menor variação mensal anual do indicador de desempenho YF em todos os três anos. O Sub 2 apresentou a menor variação mensal anual, com um valor de 70,53 kWh/kWp, enquanto o Sub 1 apresentou uma variação de 75,87 kWh/kWp, ambos para o ano de 2020. A maior variação mensal anual foi no ano de 2019. O Sub 1 apresentou uma variação de 106,28 kWh/kWp enquanto o Sub 2 uma variação de 103,26 kWh/kWp.

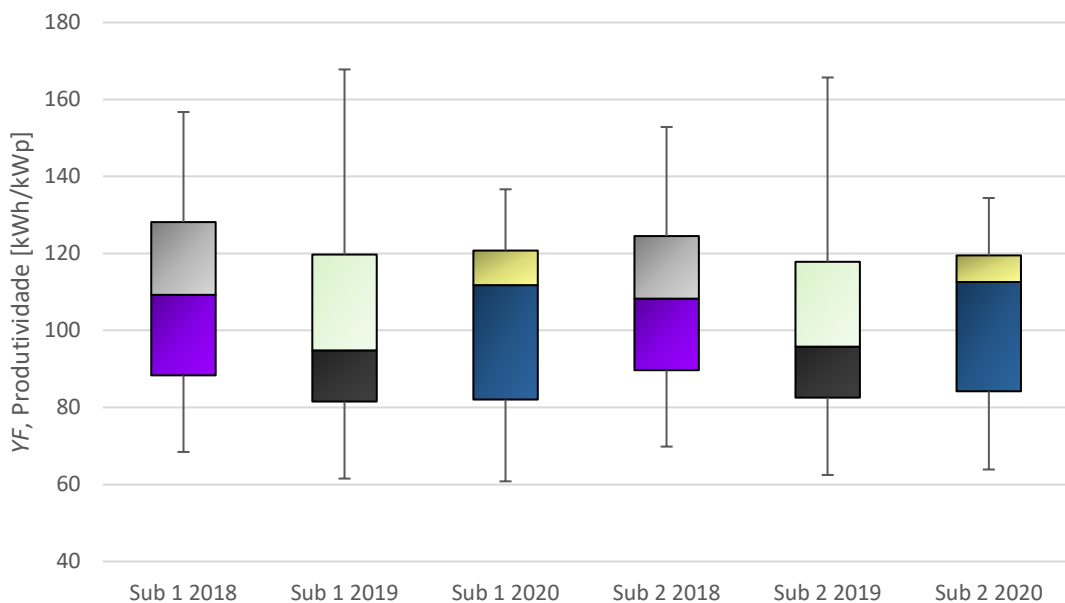


Figura 5 – Produtividade em base mensal para os dois Subsistemas nos anos de 2018, 2019 e 2020.

O Sub 1 apresentou um valor máximo de 167,81 kWh/kWp para ano de 2019. O valor máximo do Sub 2 também foi para o ano de 2019, com um valor de 165,72 kWh/kWp. O valor mínimo foi de 60,81 kWh/kWp para o Sub 1 no ano de 2020. O valor mínimo para o Sub 2 foi de 62,46 kWh/kWp no ano de 2019.

A Tab. 4 e Tab. 5 apresentam os valores de irradiação solar, taxa de desempenho e produtividade para os Sub 1 e Sub 2 nos anos de 2018, 2019 e 2020. Para o ano de 2018, o Sub 1 apresentou uma *PR* média de 82,53 %, enquanto o Sub 2 de 81,78 %. No ano de 2019, o Sub 1 apresentou uma *PR* média de 91,31 %, enquanto o Sub 2 de 91,86 %. Para o ano de 2020, o Sub 1 apresentou uma *PR* média de 89,06 %, enquanto o Sub 2 de 90,08 %. Para os três anos analisados, o Sub 1 apresentou um desvio padrão de *PR* que variou de 2,72 % a 5,29 %. O Sub 2 apresentou uma variação de 2,24 % a 5,03 %.

Tabela 4 – Índices de desempenho mensais do Sub 1 para os anos de 2018, 2019 e 2020.

Sub 1									
MESES	2018			2019			2020		
	H (kWh/m ²)	YF (kWh/kWp)	PR (%)	H (kWh/m ²)	YF (kWh/kWp)	PR (%)	H (kWh/m ²)	YF (kWh/kWp)	PR (%)
JAN	155,57	126,84	81,53	148,91	137,45	92,30	150,14	136,68	91,03
FEV	156,44	132,11	84,44	124,69	114,98	92,21	138,11	123,85	89,67
MAR	140,24	115,50	82,36	117,40	107,62	91,67	155,10	134,36	86,63
ABR	145,01	113,20	78,06	96,91	85,72	88,45	132,91	113,58	85,46
MAI	116,56	90,06	77,26	69,34	61,52	88,73	117,58	95,44	81,17
JUN	89,17	69,16	77,56	80,68	68,97	85,49	74,75	60,81	81,34
JUL	86,82	68,44	78,83	73,23	66,12	90,29	83,86	71,17	84,86
AGO	117,45	94,54	80,50	99,84	92,07	92,22	94,19	84,42	89,62
SET	99,47	83,19	83,63	94,83	87,82	92,60	79,94	74,97	93,78
OUT	120,19	105,31	87,62	102,67	97,57	95,03	114,34	111,03	97,11
NOV	165,28	139,93	84,66	141,08	133,93	94,93	116,99	112,52	96,18
DEZ	166,83	156,74	93,96	182,75	167,81	91,82	130,30	119,72	91,88
TOTAL	1.559,03	1.295,00	-	1.332,35	1.221,58	-	1.388,21	1.238,54	-
\bar{x}	129,92	107,92	82,53	111,03	101,80	91,31	115,68	103,21	89,06
<i>S</i>	28,89	27,98	4,83	33,64	32,20	2,72	27,28	5,29	5,29

Tabela 5 – Índices de desempenho mensais do Sub 2 para os anos de 2018, 2019 e 2020.

Sub 2									
MESES	2018			2019			2020		
	H (kWh/m ²)	YF (kWh/kWp)	PR (%)	H (kWh/m ²)	YF (kWh/kWp)	PR (%)	H (kWh/m ²)	YF (kWh/kWp)	PR (%)
JAN	155,57	123,56	79,42	148,91	134,71	90,46	150,14	134,41	89,52
FEV	156,44	127,39	81,43	124,69	112,96	90,59	138,11	121,01	87,62
MAR	140,24	115,33	82,24	117,40	107,40	91,49	155,10	133,82	86,28
ABR	145,01	113,86	78,52	96,91	86,09	88,83	132,91	114,34	86,03
MAI	116,56	91,76	78,72	69,34	62,46	90,08	117,58	97,29	82,74
JUN	89,17	71,57	80,27	80,68	71,93	89,16	74,75	63,88	85,46
JUL	86,82	69,83	80,43	73,23	68,80	93,95	83,86	74,23	88,51
AGO	117,45	95,28	81,13	99,84	93,33	93,47	94,19	86,41	91,74
SET	99,47	83,41	83,86	94,83	89,21	94,07	79,94	77,58	97,05
OUT	120,19	102,66	85,42	102,67	98,25	95,70	114,34	113,20	99,01
NOV	165,28	129,36	78,27	141,08	132,44	93,88	116,99	111,98	95,72
DEZ	166,83	152,86	91,63	182,75	165,72	90,68	130,30	118,99	91,32
TOTAL	1559,03	1276,89	-	1332,35	1223,30	-	1388,21	1247,15	-
\bar{x}	129,92	106,41	81,78	111,03	101,94	91,86	115,68	103,93	90,08
<i>S</i>	28,89	25,20	3,78	33,64	30,57	2,24	27,28	23,61	5,03

Analisando a Tab. 4 e a Tab. 5, pode-se observar que a *YF* anual para ambos os subsistemas está variando entre 1221,58 kWh/kWp até 1295,00 kWh/kWp. De acordo com Pereira, 2017, pode-se observar no mapa de potencial de geração fotovoltaica que para o sul do estado de Santa Catarina o potencial de geração solar fotovoltaica em termos da produtividade anual varia de 1200 kWh/kWp a 1300 kWh/kWp, considerando sistemas fotovoltaicos com uma *PR* de 80 %.

Analisando a produtividade YF anual para os Sub 1 e Sub 2, percebe-se que o Sub 1 com o FDI maior não necessariamente apresenta menores produtividades. Observando o ano de 2018 o Sub 1 apresentou uma YF anual de 1295,00 kWh/kWp enquanto a produtividade anual do Sub 2 foi de 1276,89 kWh/kWp. No ano de 2019, a YF anual dos dois subsistemas foi similar, com um valor de 1221,58 kWh/kWp para o Sub 1 e um valor de 1223,30 kWh/kWp para o Sub 2. Para o ano de 2020, o Sub 1 apresentou uma YF anual de 1238,54 kWh/kWp enquanto a produtividade do Sub 2 foi de 1247,00 kWh/kWp. Segundo Scarabelot, 2020 os inversores atuais apresentam elevadas eficiências em praticamente todos os níveis de carregamento. Scarabelot, 2020 comprovou a mudança no comportamento dos inversores em questões de eficiência média, sendo que em inversores da década de 90 as maiores eficiências eram encontradas em cenários de subdimensionamento do inversor.

3.3 Relação do índice de produtividade, YF com a eficiência dos inversores, η

A eficiência de conversão média mensal dos inversores dos subsistemas Sub 1 e Sub 2 e a produtividade mensal dos subsistemas Sub 1 e Sub 2 são apresentadas nas Figs. 6, 7 e 8 para os anos de 2018, 2019 e 2020, respectivamente. Os valores de eficiência de conversão média mensal do inversor do Sub 1 são similares aos valores de eficiência de conversão média mensal do inversor do Sub 2 em todo o horizonte de análise. A diferença da eficiência média anual é de 0,28 % para o ano de 2018, de 0,24 % para o ano de 2019 e de 0,24 % para o ano de 2020. Inversores sobredimensionados apresentam desempenho similar à inversores subdimensionados, sendo que em inversores subdimensionados as temperaturas operacionais são maiores que em inversores sobredimensionados.

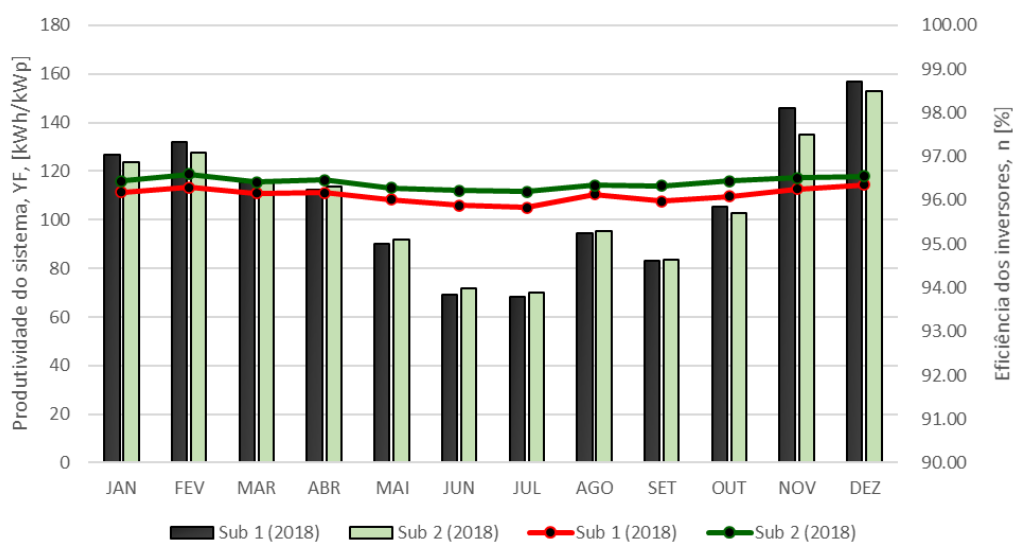


Figura 6 – Correlação da YF com a eficiência dos inversores dos Sub 1 e Sub 2 para o ano de 2018.

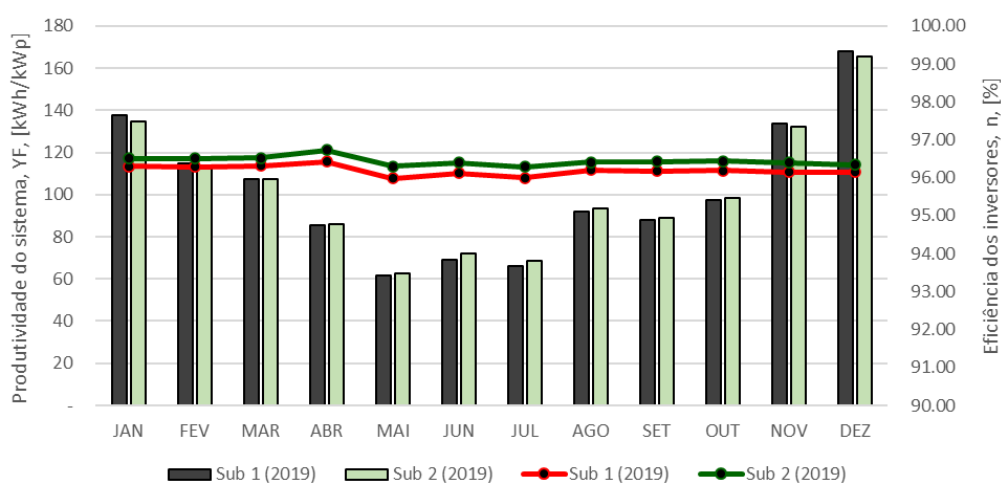


Figura 7 – Correlação da YF com a eficiência dos inversores dos Sub 1 e Sub 2 para o ano de 2019.

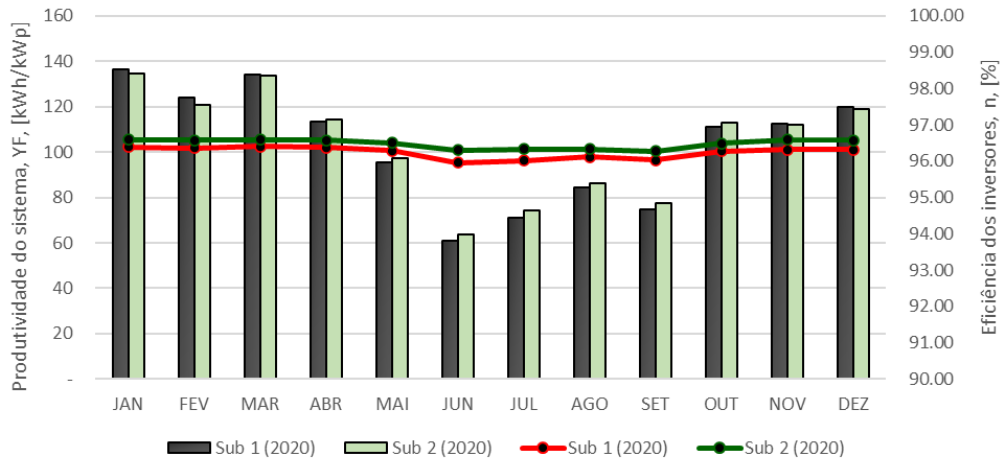


Figura 8 – Correlação da YF com a eficiência dos inversores dos Sub 1 e Sub 2 para o ano de 2020.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise de desempenho de dois subsistemas com distintos fatores de dimensionamento de inversor de um SFCR instalado na cidade de Criciúma/SC. Os Sub 1 e Sub 2 compõem um sistema fotovoltaico com um total de 5 subsistemas. O subsistema Sub 1 tem FDI de 1,12 enquanto o subsistema Sub 2 tem FDI de 0,76.

Nos dias de irradiâncias maiores, o Sub 2 apresenta um corte de potência, que ocorre em irradiâncias próximas de 900 W/m^2 e aproximadamente das 11:00h até as 15:30h.

Ambos os Sub 1 e 2 apresentaram uma YF maior nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro devido a YF possuir uma correlação com a irradiação. Nos demais meses a YF foi menor para ambos os subsistemas. O Sub 2 apresentou uma perda de produtividade na estação de verão em todos os anos quando comparado com o Sub 1. A perda de YF do Sub 2 nos meses que possuem irradiação mais altas, é devido o Sub 2 apresentar um FDI menor e ocorrer os cortes de potência. Nos meses de irradiação mais baixas, o Sub 2 apresentou uma maior YF quando comparado com o Sub 1.

No ano de 2019 os subsistemas apresentaram uma YF menor entre os meses de janeiro à maio quando comparado com os anos de 2018 e 2020. A YF menor nesses meses de 2019 é devido a irradiação ser menor quando comparado com os meses dos anos de 2018 e 2020.

O Sub 1 e 2 apresentaram a menor variação mensal anual de YF no ano de 2020. A maior variação mensal anual foi no ano de 2019 para ambos os sistemas. A YF anual para ambos os subsistemas variou de 1.221,58 kWh/kWp até 1295,00 kWh/kWp, o que está de acordo quando comparada com a literatura para o sul do estado de Santa Catarina.

Foi observado que o Sub 1 com o FDI maior não implicou que a produtividade iria ser menor. No ano de 2019 e 2020 a YF anual dos dois subsistemas foi próxima uma da outra. No ano de 2018 o Sub 1 apresentou uma maior YF anual. Essa situação ocorre devido os inversores atuais apresentarem elevadas eficiências em praticamente todos os níveis de carregamento. O valor de eficiência do inversor do Sub 1 é um valor próximo ao valor de eficiência do inversor do Sub 2 em todos os anos, apesar de o Sub 1 ter uma eficiência menor

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Agradecimentos também ao Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC/Criciúma-SC pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS

- Deschamps, E. M.; Rüther, R., 2019. Optimization of inverter loading ratio for grid connected photovoltaic systems, *Solar Energy*, vol. 179, pp. 106-118.
- International Electrotechnical Commission (IEC 61724-1). Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. 2017.
- Marion, B.; Adelstein, J.; Boyle, K.; Hayden, H.; Hammond, B.; Fletcher, T.; Canada, B.; Narang, D.; Shugar, D.; Wenger, H.; Kimber, A.; Mitchell, L.; Rich, G.; Townsend, T., 2005. Performance parameters for grid-connected

- PV systems. In: 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, pp. 1601–1606. NREL/CP-520-37358, Lake Buena Vista, Florida.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. 2017. Atlas brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, pp. 88. São José dos Campos.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A., Prieb, C. W. M., 2007. Influência do fator de dimensionamento do inversor na correlação entre energia elétrica e irradiância solar em uma usina fotovoltaica conectada à rede. In: 22 Eur. Photovolt. Sol. Energy Conference.
- Rüther, R. 2004. Edifícios Solares Fotovoltaicos. O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil, 1ª edição, pp. 113. Florianópolis.
- Scarabelot, L., 2020. Influência do fator de dimensionamento de inversor no desempenho termoenergético de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis.
- Zomer, C.; Custódio, I.; Goulart, S.; Mantelli, S.; Martins, G.; Campos, R.; Pinto, G.; Rüther, R., 2020. Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre, Solar Energy, vol. 212, pp. 258-274.

FORMAT INSTRUCTIONS FOR PAPERS SUBMITTED TO THE CONGRESS

INFLUENCE OF THE INVERTER SIZING FACTOR ON THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID IN OPERATION IN SOUTH OF BRAZIL

Abstract. *In recent years, distributed generation with photovoltaic systems has shown exponential growth based on technical, economic and regulatory aspects. The performance of a photovoltaic system depends, in particular, on environmental factors, solar radiation and ambient temperature, and on the electrical characteristics of components, modules and inverters. The inverter sizing factor (FDI) is defined as the ratio between the inverter's AC power and the PV generator's rated power. The inverter's conversion efficiency is a function of the relative power, that is, the inverter charging level and the dc voltage input. Monitoring and analyzing photovoltaic systems is important to verify the technology's performance and reliability. Merit indices are related to system efficiency, productivity, system losses and the electrical energy produced. This article presents a study of the productivity (YF), performance rate (PR) and inverter conversion efficiency indices of two subsystems (Sub 1 and Sub 2) of a grid-connected photovoltaic system (SFCR) installed at the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC) in Criciúma/SC. The analysis horizon is between 2018 and 2020. The modules of Sub 1 and Sub 2 subsystems present the same inclination and azimuth angles. The Sub 1 subsystem has an FDI of 1.12 while the Sub 2 subsystem has an FDI of 0.76. The annual productivity of Sub 1 ranged between 1221 kWh/kWp and 1295 kWh/kWp while the annual productivity of Sub 2 ranged between 1223 kWh/kWp and 1277 kWh/kWp. The monthly average conversion efficiency values of the Sub 1 inverter are similar to the monthly average conversion efficiency values of the Sub 2 inverter over the entire analysis horizon.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Merit Indices, Inverter Sizing Factor.*