

DESEMPENHO DIÁRIO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE OPERANDO COM DIFERENTES TECNOLOGIAS

Camila de Oliveira Silveira (UTFPR) - camila.osilveira@hotmail.com

Andreas Anael Pereira Gomes (UTFPR) - andreasp.gomes@gmail.com

Diego Vitoriano Freitas (UTFPR) - vitorianofreitas@gmail.com

Jair Urbanetz Junior (UTFPR) - urbanetz@utfpr.edu.br

Resumo:

O conhecimento das diferentes tecnologias de geradores fotovoltaicos é fundamental para identificar as diferenças de desempenho entre cada uma delas. Este artigo tem como objetivo analisar o desempenho de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) composto por quatro diferentes tecnologias: silício monocristalino (m-Si), silício policristalino (p-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). O SFCR é fruto de um projeto de P&D da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e se encontra instalado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba, Sede Neville. A metodologia adotada para realizar a análise de dados considerou valores diários do mês de outubro de 2019. Desta forma, o estudo possibilitou perceber detalhadamente as variações de desempenho conforme os diferentes níveis de irradiação disponíveis no local, cuja média foi superior àquela esperada na cidade neste mesmo período. O desempenho foi calculado por meio dos índices de mérito, denominados Fator de Capacidade, Produtividade e Taxa de Desempenho. As perdas ocasionadas por temperatura também foram analisadas a fim de verificar qual tecnologia de célula fotovoltaica apresenta melhor desempenho sob determinadas condições. Em geral, o gerador fotovoltaico de CdTe apontou resultados superiores de desempenho, além de apresentar as menores perdas causadas por temperatura. Os parâmetros envolvidos nos cálculos levaram em consideração os índices de irradiação no local e a energia gerada por cada tecnologia do sistema. A disponibilidade de dados relativos a um mês de operação em função da sua recente implantação não comprometeu os resultados obtidos, uma vez que o sistema não apresentou falhas neste período.

Palavras-chave: *Sistemas Fotovoltaicos, Tecnologias de Células Fotovoltaicas, Índices de Mérito.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

DESEMPENHO DIÁRIO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE OPERANDO COM DIFERENTES TECNOLOGIAS

Camila de Oliveira Silveira – camila.osilveira@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia - PPGSE,
Laboratório de Energia Solar - LABENS

Andreas Anael Pereira Gomes – andreasp.gomes@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Laboratório de Energia Solar - LABENS

Diego Vitoriano Freitas – vitorianofreitas@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Laboratório de Energia Solar - LABENS

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia - PPGSE,
Laboratório de Energia Solar - LABENS

Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

Resumo. O conhecimento das diferentes tecnologias de geradores fotovoltaicos é fundamental para identificar as diferenças de desempenho entre cada uma delas. Este artigo tem como objetivo analisar o desempenho de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) composto por quatro diferentes tecnologias: silício monocristalino (m-Si), silício policristalino (p-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). O SFCR é fruto de um projeto de P&D da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e se encontra instalado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba, Sede Neoville. A metodologia adotada para realizar a análise de dados considerou valores diários do mês de outubro de 2019. Desta forma, o estudo possibilitou perceber detalhadamente as variações de desempenho conforme os diferentes níveis de irradiação disponíveis no local, cuja média foi superior àquela esperada na cidade neste mesmo período. O desempenho foi calculado por meio dos índices de mérito, denominados Fator de Capacidade, Produtividade e Taxa de Desempenho. As perdas ocasionadas por temperatura também foram analisadas a fim de verificar qual tecnologia de célula fotovoltaica apresenta melhor desempenho sob determinadas condições. Em geral, o gerador fotovoltaico de CdTe apontou resultados superiores de desempenho, além de apresentar as menores perdas causadas por temperatura. Os parâmetros envolvidos nos cálculos levaram em consideração os índices de irradiação no local e a energia gerada por cada tecnologia do sistema. A disponibilidade de dados relativos a um mês de operação em função da sua recente implantação não comprometeu os resultados obtidos, uma vez que o sistema não apresentou falhas neste período.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Tecnologias de Células Fotovoltaicas, Índices de Mérito.

1. INTRODUÇÃO

A geração fotovoltaica pode estar presente de forma centralizada, como em usinas de grande porte, ou de forma distribuída, integrada em telhados e coberturas de edificações por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR). O cenário da geração distribuída atingiu crescimento exponencial em 2016, com a expressiva redução dos custos de geradores solares fotovoltaicos. Neste sentido, a oferta desta tecnologia através das concessionárias distribuidoras de energia elétrica deve tomar um grande impulso no país à medida que os benefícios vão sendo compreendidos pelo setor (Pereira *et al.*, 2017).

O SFCR é composto basicamente pelo gerador fotovoltaico e um inversor. As células fotovoltaicas que compõem os módulos são classificadas de acordo com as tecnologias empregadas. Destacam-se entre elas o silício cristalino, classificado em monocristalino (m-Si) ou policristalino (p-Si), e os filmes finos, os quais podem ser fabricados por diversos tipos de materiais, dentre eles o disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) (Rüther, 2004).

Em termos de viabilidade econômica e energética, é importante verificar a eficiência de conversão de energia solar em elétrica para cada tecnologia de células fotovoltaicas. Além disso, a localidade geográfica onde o SFCR está inserido, as condições de instalação, bem como os índices de irradiação no local são fundamentais para garantir a otimização do sistema (Pinho e Galdino, 2014).

Em parceria com a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), o Laboratório de Energia Solar (LABENS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) foi incumbido de projetar e analisar o desempenho de sistemas fotovoltaicos vinculados à quatro diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, implantados na própria universidade. Neste contexto, este artigo tem por objetivo analisar o comportamento do SFCR instalado na Sede Neoville do Câmpus Curitiba, a fim de comparar o comportamento entre as tecnologias por meio de índices de mérito.

2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O desempenho de células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral, bem como pela temperatura de operação da célula. As condições padrão de ensaio (STC) consideram a irradiância (G) de 1000 W/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para massa de ar (AM) de 1,5 e temperatura da célula de 25°C (Pinho e Galdino, 2014).

Entre as tecnologias desenvolvidas para células e módulos fotovoltaicos, destacam-se a de silício cristalino e a de filmes finos. Em termos de viabilidade econômica e energética, é importante observar a eficiência, em laboratório, de cada tecnologia, a qual pode ser visualizada na Tabela 1 (Center for Sustainable Systems, 2019).

Tabela 1 – Eficiências, em laboratório, de diferentes tecnologias de células e módulos fotovoltaicos.

Tecnologias		Eficiência de conversão das células	Eficiência de conversão dos módulos
Cristalino	m-Si	26,1%	22,7 – 24,4%
	p-Si	22,3%	19,9%
Filmes Finos	CIGS	23,4%	16,6% - 19,2%
	CdTe	22,1%	18,6%

Os índices de eficiência de conversão de energia de uma célula fotovoltaica têm grande relevância em análises de desempenho de um SFCR. Para efeitos de projeto, o custo e o tipo do gerador que se pretende empregar, bem como o local onde será realizada a instalação, são fatores fundamentais para otimizar o desempenho do SFCR (TONIN, 2015).

3. ÍNDICES DE MÉRITO

Para avaliar o desempenho de um SFCR é necessário conhecer alguns parâmetros que influenciam no seu resultado, como a potência instalada, a geração de energia e a irradiação no local onde o sistema se encontra instalado. Através dos índices de mérito, é possível determinar o comportamento operacional do sistema calculando-se o Fator de Capacidade (FC), a Produtividade ou *Final Yield* (YF) e a Taxa de Desempenho ou *Performance Ratio* (PR) (Zilles, 2012).

O fator de capacidade admite a capacidade de geração de energia caso o sistema operasse com sua potência nominal durante 24 horas por dia, sem interrupção (Benedito, 2009). Este índice é calculado conforme a Eq. (1) e é expresso em porcentagem, onde:

$$FC = \frac{E}{P_{FV} t} \quad (1)$$

FC = fator de capacidade [%];
 E = energia gerada [kWh];
 P_{FV} = potência do gerador fotovoltaico [kWp];
 t = tempo [h].

A produtividade apresenta, de forma normalizada, a geração de energia de um sistema em função de cada 1kWp de potência instalada (Benedito, 2009). A Eq. (2) apresenta como este índice é calculado, sendo expresso em kWh/kWp, em que:

$$YF = \frac{E}{P_{FV}} \quad (2)$$

YF = *final yield* [kWh/kWp];
 E = energia gerada [kWh];
 P_{FV} = potência do gerador fotovoltaico [kWp].

A Taxa de Desempenho ou *Performance Ratio* (PR) expressa, em porcentagem, a energia solar convertida em energia elétrica. Este índice considera as perdas ocorridas neste processo de conversão, admitindo as perdas causadas por temperatura, sombreamento, sujidade, entre outras (Benedito, 2009). A Eq. (3) determina como a taxa de desempenho é calculada, onde:

$$PR = \frac{YF}{H_{tot}/G} \quad (3)$$

PR = *performance ratio* [%];
 YF = *final yield* [kWh/kWp];
 H_{tot} = irradiação total em 1 dia [kWh/m²];
 G = irradiância de 1 kW/m².

4. METODOLOGIA

O SFCR apresentado neste artigo está localizado nas dependências da UTFPR Câmpus Curitiba – Sede Neville, cujas coordenadas geográficas são: latitude 25,50 sul e longitude 49,32 oeste. O sistema segue as condições ótimas de instalação: todos os geradores fotovoltaicos estão orientados para o norte geográfico, bem como estão inclinados com a mesma latitude do local. A Figura 1 ilustra a área onde o sistema está instalado. O SFCR em estudo está destacado em vermelho, onde também é possível observar a presença de uma estação solarimétrica padrão Sistema de Organização de Dados Ambientais (SONDA) ao fundo. Na mesma imagem há um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia, além de uma estação solarimétrica padrão Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que não serão objetos de estudo neste artigo.



Figura 1 – SFCR com diferentes tecnologias e estação SONDA destacados em vermelho. As quatro fileiras de geradores fotovoltaicos, correspondem às tecnologias de: m-Si, p-Si, CIGS e CdTe.

O SFCR totaliza uma potência instalada de 13,1 kWp. A Tabela 2 apresenta a potência instalada por tecnologia, além do coeficiente de temperatura em relação à potência nominal de cada célula fotovoltaica.

Tabela 2 – Potência instalada e coeficientes de temperatura de cada tecnologia.

Tecnologias		Potência nominal instalada	Coeficiente de temperatura
Cristalino	m-Si	5,11 kWp	-0,39 %/°C
	p-Si	4,69 kWp	-0,40 %/°C
Filmes Finos	CIGS	1,68 kWp	-0,32 %/°C
	CdTe	1,53 kWp	-0,25 %/°C

Em razão da recente implantação do SFCR, bem como da estação solarimétrica, a aquisição de dados de irradiância, energia gerada e temperatura foi realizada entre os dias 01/10/2019 e 31/10/2019. Portanto, a metodologia abordada neste artigo irá contemplar esta periodicidade de coleta para todos os dados que serão expostos neste trabalho. Para o cálculo dos índices de mérito foram utilizados os valores nominais fornecidos pelo fabricante dos módulos fotovoltaicos. Durante a coleta, o sistema não apresentou qualquer falha de operação.

4.1. Irradiação

A estação SONDA, que se encontra adjacente ao SFCR, possui piranômetros de padrão secundário, modelo CMP10 fabricado pela *Kipp & Zoenen*, para a medição da irradiância global horizontal, difusa, direta normal e no plano inclinado, sendo este com ângulo de inclinação de 25° e orientado para o norte geográfico. Os dados são fornecidos em intervalos de um minuto e foram integrados para a obtenção da irradiância diária global horizontal e no plano inclinado na latitude, os quais estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Irradiação média diária global horizontal e no plano inclinado na latitude.

Dia	Global Horizontal [kWh/m ²]	Plano Inclinado [kWh/m ²]
01/10/2019	7,48	7,98
02/10/2019	7,02	7,48
03/10/2019	6,13	6,31
04/10/2019	6,68	7,01
05/10/2019	6,67	7,04
06/10/2019	0,67	0,63
07/10/2019	1,87	1,74
08/10/2019	5,52	5,62
09/10/2019	7,53	7,75
10/10/2019	7,58	7,78
11/10/2019	7,62	7,78
12/10/2019	7,53	7,70
13/10/2019	7,02	7,17
14/10/2019	4,62	4,68
15/10/2019	2,15	1,99
16/10/2019	3,52	3,39
17/10/2019	4,80	4,68
18/10/2019	6,00	6,03
19/10/2019	3,71	3,54
20/10/2019	5,34	5,21
21/10/2019	1,72	1,62
22/10/2019	6,17	5,95
23/10/2019	3,68	3,41
24/10/2019	7,54	7,38
25/10/2019	7,22	7,07
26/10/2019	5,57	5,24
27/10/2019	7,68	7,54
28/10/2019	5,26	5,19
29/10/2019	7,03	6,82
30/10/2019	7,56	7,41
31/10/2019	3,58	3,48

Com base na metodologia descrita em (Mariano, 2017), foi aplicado um histograma para demonstrar frequências de dias com um determinado intervalo de irradiação. O intervalo adotado de 0,5 corresponde a variações de 0,0 a 7,0 kWh/m².dia. Desta forma, pode-se identificar na Figura 2 qual faixa de irradiação no plano inclinado foi predominante no mês de outubro.

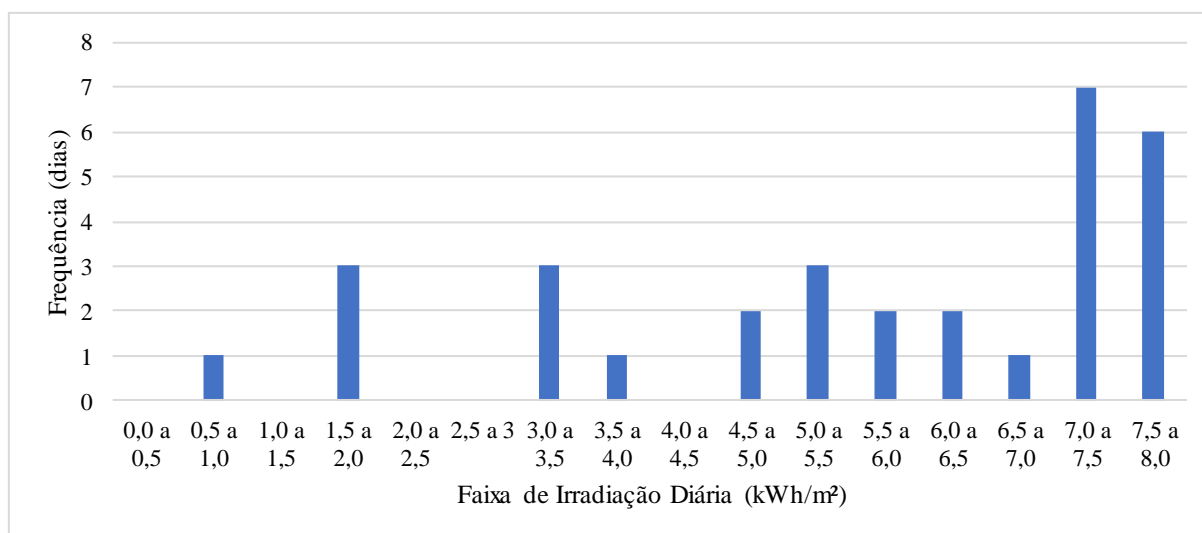


Figura 2 – Histograma de irradiação no plano inclinado para o mês de outubro de 2019.

De acordo com o histograma pode-se identificar que o intervalo de 7,0 a 7,5 kWh/m² corresponde a faixa com maior predominância de irradiação diária no plano inclinado em outubro de 2019, sendo que 7 dias compreendem este intervalo. A segunda maior faixa corresponde a irradiações entre 7,5 a 8,0 kWh/m², totalizando 6 dias neste intervalo. A média dos valores diários para este mês foi de 5,57 kWh/m², valor que pode ser considerado alto nesta época do ano, uma vez que a irradiação média em outubro é de 4,97 kWh/m² (Tiepolo *et al.*, 2017). Nesta análise, os dias que apresentaram os valores mais aproximados em relação a esta média foram 14/10/2019 e 17/10/2019, ambos com 4,68 kWh/m².

4.2. Geração de energia

O acesso aos dados de geração de energia é realizado por meio da memória de massa dos inversores presentes no SFCR. Os inversores presentes no sistema foram alocados sob os geradores fotovoltaicos e foram fornecidos pela NHS Solar, modelos 1K5 – GSM1 e 3K – GSM1. O computador de supervisão (*ST-One*) presente na usina coleta informações dos inversores com periodicidade de um minuto. A comunicação é realizada através do padrão de comunicação RS485, onde todos os inversores e o *ST-One* são interligados. Quando o *ST-One* manda uma requisição de leitura, apenas o inversor que possuir o endereço que está junto da requisição responderá. Na requisição de dados, o inversor responde informações agregadas internamente, como por exemplo, os valores de tensão e corrente fornecidos pelos geradores ou a potência da rede CA.

Para este trabalho, os valores de energia diários apresentados na Tabela 4 foram calculados através da análise dos dados de periodicidade de um minuto coletados no período de 24 horas. Essa análise de dados foi feita na linguagem *Python*.

Tabela 4 – Geração de energia diária em kWh de cada tecnologia do SFCR.

Dia	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
01/10/2019	32,6	29,6	11,1	10,0
02/10/2019	30,4	27,6	10,4	9,5
03/10/2019	26,6	24,0	9,1	8,2
04/10/2019	28,6	26,1	9,6	9,0
05/10/2019	28,7	26,1	9,9	9,1
06/10/2019	3,0	2,7	0,6	0,7
07/10/2019	7,9	6,9	2,4	2,4
08/10/2019	24,0	21,7	7,9	7,2
09/10/2019	32,2	29,3	10,9	10,1
10/10/2019	32,2	29,2	11,0	9,9
11/10/2019	31,9	28,9	10,9	6,2
12/10/2019	31,0	28,0	10,6	10,0
13/10/2019	28,7	26,0	9,9	9,4
14/10/2019	19,6	17,6	6,5	6,3
15/10/2019	9,0	8,1	2,7	2,7
16/10/2019	14,8	13,5	4,8	4,7
17/10/2019	19,6	17,7	6,1	6,2
18/10/2019	24,8	22,3	8,2	8,0
19/10/2019	14,8	13,6	4,9	4,7
20/10/2019	22,4	20,2	7,4	7,0
21/10/2019	7,4	6,7	2,3	2,3
22/10/2019	24,7	22,3	7,9	7,6
23/10/2019	14,4	12,8	4,7	4,5
24/10/2019	30,2	27,4	9,4	9,7
25/10/2019	28,7	26,1	9,8	9,2
26/10/2019	21,9	19,5	7,1	6,8
27/10/2019	31,1	28,3	11,0	10,0
28/10/2019	21,7	19,8	7,1	6,9
29/10/2019	27,7	25,1	9,4	8,9
30/10/2019	29,7	26,9	10,5	9,6
31/10/2019	15,5	14,0	5,2	4,8

Analisando os dados, pode-se verificar que geração de energia das tecnologias de m-Si, p-Si, CIGS e CdTe foram, em um mês, 715,8 kWh, 648,0 kWh, 239,3 kWh e 221,6 kWh, respectivamente.

Considerando todas as tecnologias, o total de energia gerada para o sistema em outubro de 2019 foi de 1,82 MWh. Analisando a Figura 3, pode-se perceber que a geração de energia diária foi proporcional aos níveis de irradiação incidentes no plano dos geradores fotovoltaicos.

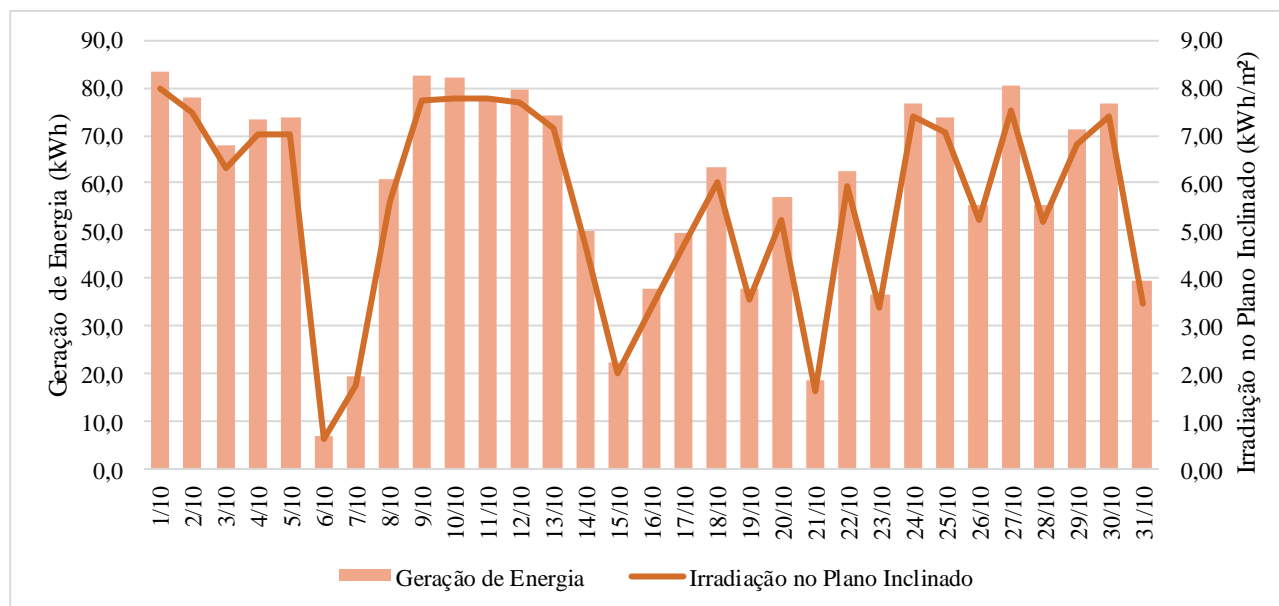


Figura 3 – Comparação da produção de energia do SFCR com os níveis de irradiação disponíveis no local.

4.3. Sensores de temperatura

Os valores de temperatura nos geradores fotovoltaicos apresentados na Figura 4 foram obtidos por sensores modelo CS240 fornecido pela *Campbell Scientific*, alocados na parte posterior de um dos módulos para cada tecnologia, totalizando então, quatro sensores de temperatura. Os dados foram registrados a cada minuto e a coleta foi realizada durante o mês de outubro. A partir deles foi calculada a temperatura média diária no gerador para cada tecnologia, considerando o intervalo entre às 8 horas da manhã e às 17 horas da tarde. Isso possibilitou uma análise de temperatura apenas no intervalo de tempo relevante para o estudo da eficiência dos módulos, visto que são os horários que apresentam uma geração de energia mais significativa.

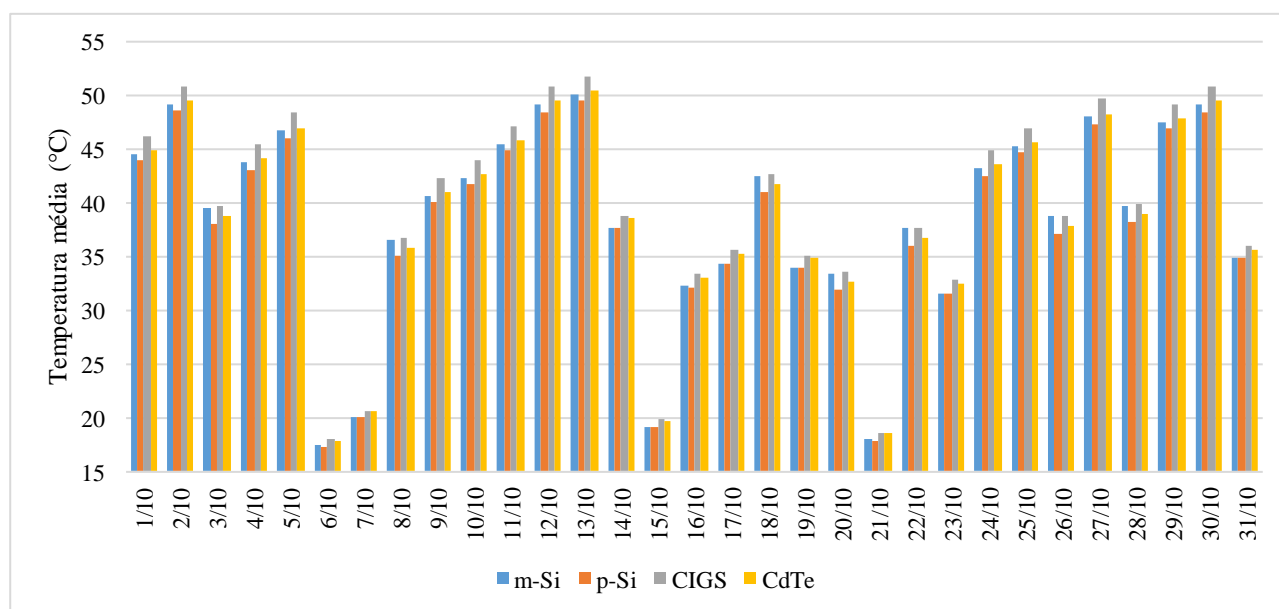


Figura 4 – Temperatura média nos geradores fotovoltaicos no período diurno.

Em outubro de 2019, as médias de temperatura nos geradores de m-Si, p-Si, CIGS e CdTe foram, respectivamente: 38,5°C, 37,8°C, 39,6°C e 38,7°C. De forma complementar, a Figura 5 apresenta estes mesmos valores de temperatura em função da irradiação global no plano inclinado na latitude.

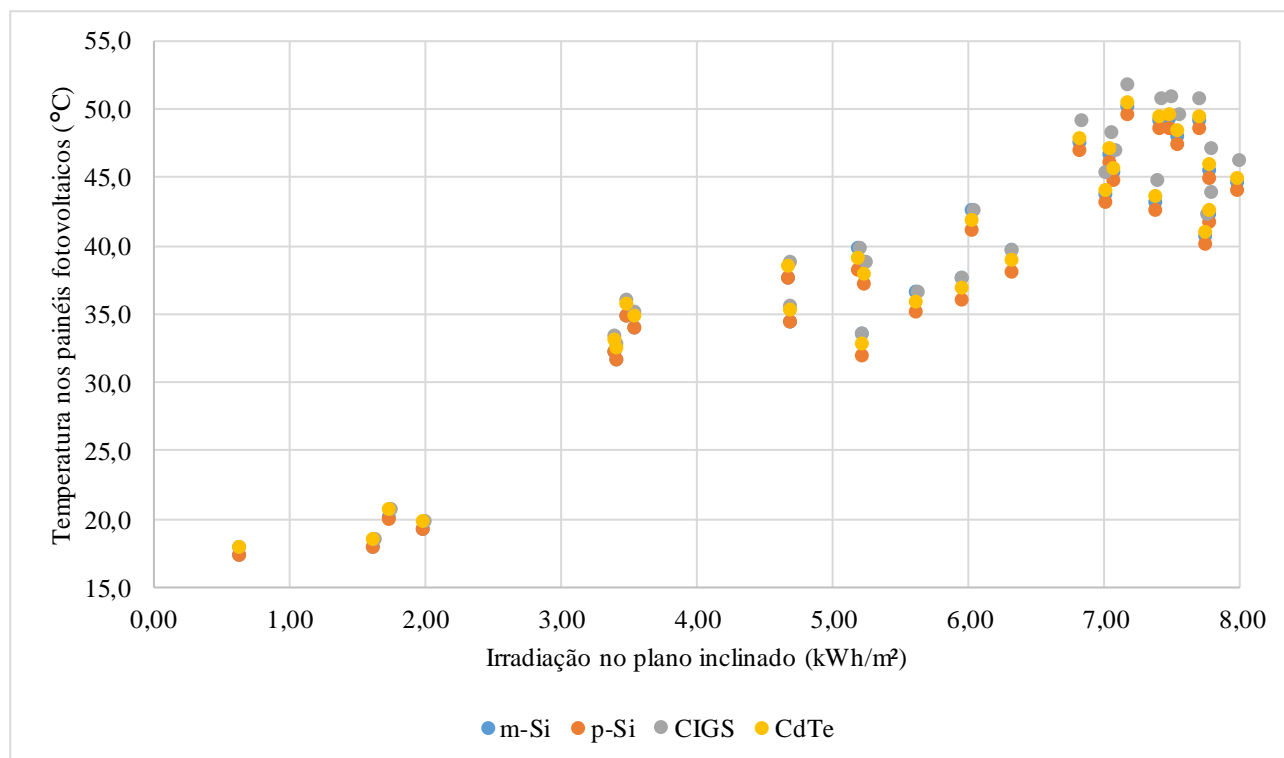


Figura 5 – Temperatura média nos geradores fotovoltaicos em função da irradiação.

Pode-se observar que há uma relação aproximadamente linear quando a irradiação é comparada com a temperatura nos geradores fotovoltaicos. Além disso, é possível notar que os módulos fotovoltaicos quando expostos nas mesmas condições de irradiação devem apresentar variações de temperatura de acordo com as suas tecnologias. Módulos CIGS tendem a apresentar uma temperatura mais elevada enquanto módulos de silício policristalino apresentam temperaturas mais baixas quando comparadas às demais tecnologias.

5. RESULTADOS

O desempenho do SFCR foi avaliado de acordo com os índices de mérito, calculando-se o fator de capacidade, a produtividade a taxa de desempenho do sistema.

A Figura 6 apresenta o fator de capacidade diário das diferentes tecnologias do SFCR. A média mensal para o sistema como um todo foi de 19%. Já as médias por tecnologia foram: 18,83% para m-Si, 18,57% para p-Si, 19,15% para CIGS e 19,47% para CdTe.

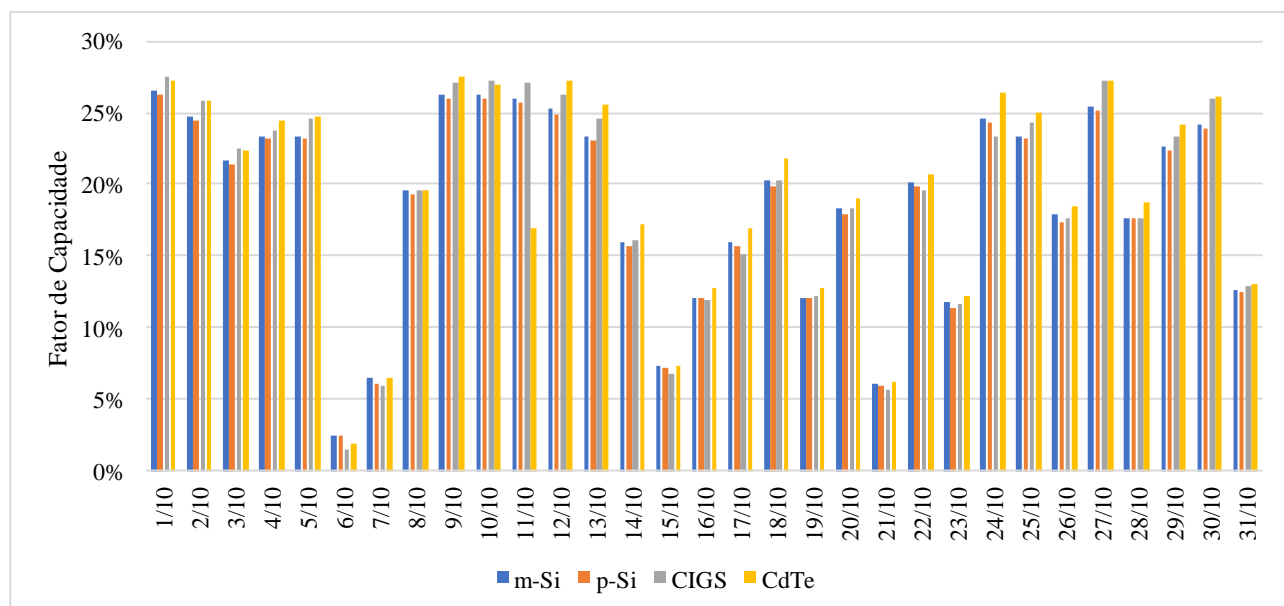


Figura 6 – Fator de capacidade diário das diferentes tecnologias.

A produtividade das diferentes tecnologias do SFCR está retratada na Figura 7. A média diária calculada para o sistema foi de 4,56 kWh/kWp, a qual pode ser considerada alta uma vez que a média diária esperada na cidade de Curitiba para o mês de outubro é de 3,2 kWh/kWp. Percebe-se que o comportamento do gráfico é semelhante ao fator de capacidade, em que há uma relação proporcional dos resultados com os dias em que há menores ou maiores índices de irradiação. As produtividades médias calculadas para as tecnologias de m-Si, p-Si, CIGS e CdTe foram, respectivamente: 4,52 kWh/kWp, 4,46 kWh/kWp, 4,59 kWh/kWp e 4,67 kWh/kWp.

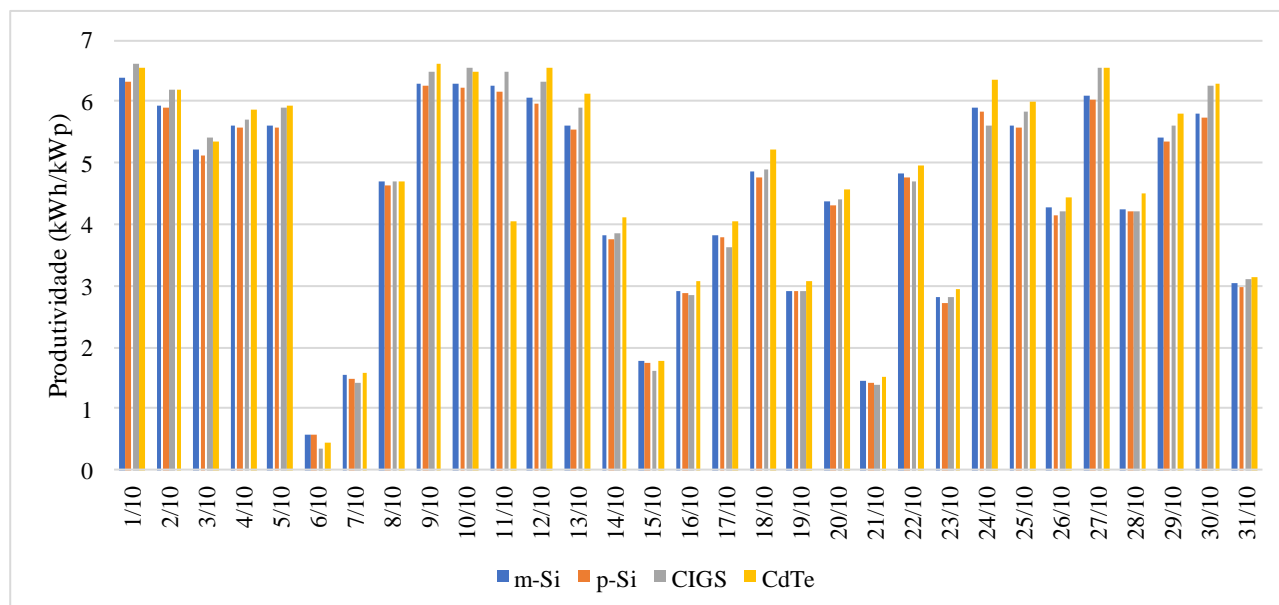


Figura 7 – Produtividade diária das diferentes tecnologias.

Ao contrário do fator de capacidade e da produtividade, a taxa de desempenho exposta na Figura 8 apresenta os melhores resultados justamente nos dias em que o índice de irradiação é menor. A taxa de desempenho média para o SFCR em outubro foi de 82,45%. A maior média encontrada foi de 88,67%, no dia 21/10/2019. Já a menor média foi de 73,78%, registrada no dia 11/10/2019. Em uma comparação entre as diferentes tecnologias, as médias foram de 82,34%, 81,09%, 81,78% e 84,59% para módulos de m-Si, p-Si, CIGS e CdTe, respectivamente. As menores perdas ocorridas por temperatura nos módulos de CdTe podem justificar os melhores resultados de *performance ratio* desta tecnologia. Embora o aquecimento nos módulos de p-Si seja menor, o seu coeficiente de temperatura em relação à potência nominal da célula é o mais elevado em relação às outras tecnologias, contribuindo para que a taxa de desempenho destes módulos seja menor.

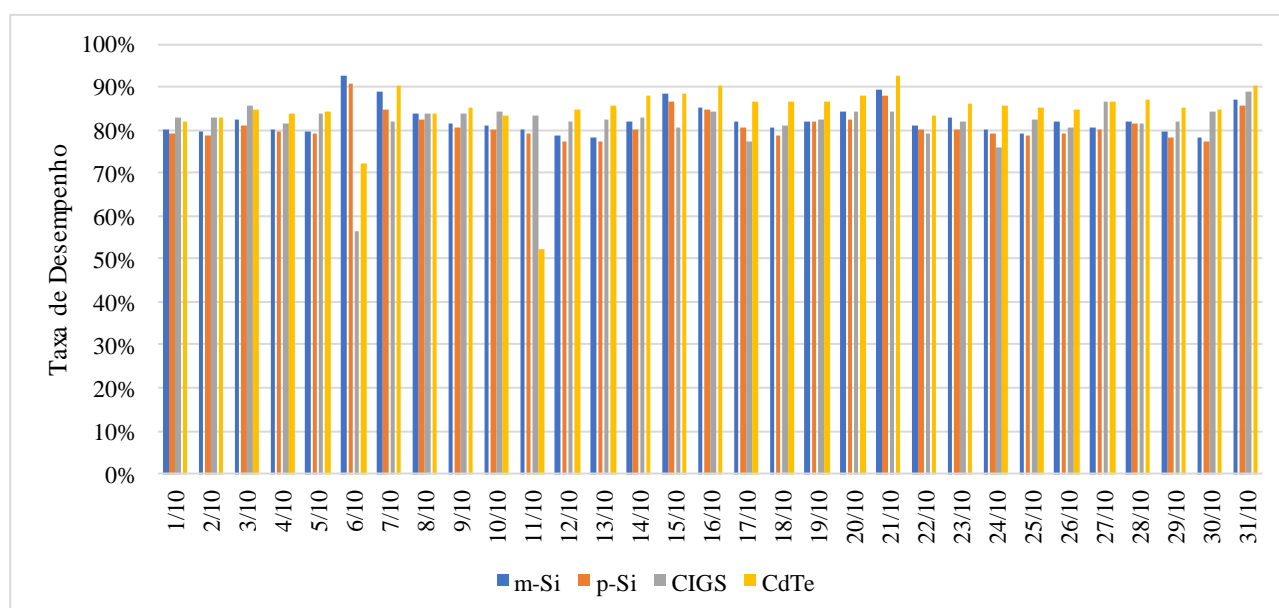


Figura 8 – Taxa de desempenho diária das diferentes tecnologias.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir da análise dos dados pode-se identificar que os dias 06/10/2019, 07/10/2019, 15/10/2019 e 21/10/2019 foram os que registraram menores valores de irradiação e, conseqüentemente, a geração de energia nesses dias foi menor para todas as tecnologias, impactando diretamente no desempenho do sistema com resultados inferiores de fator de capacidade e produtividade quando comparado aos outros dias.

O fator de capacidade, tal como a produtividade, apresentou comportamento semelhante em relação às tecnologias estudadas. Os módulos de filmes finos registraram médias superiores para estes dois índices de mérito quando comparados aos de silício cristalino. Em ordem crescente de resultados por tecnologia, tem-se: p-Si, m-Si, CIGS e CdTe. Vale ressaltar que os módulos de m-Si são de tecnologia PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*), em que a presença de uma camada de passivação permite o aumento da eficiência da célula. Segundo (Villalva, 2019), a passivação permite o aumento da reflexão dos raios solares nas células, melhorando a captação de energia da radiação e fazendo com que estas células sejam mais eficientes que as convencionais de silício cristalino não passivado.

Em uma análise anual, a cidade de Curitiba apresenta produtividade média de 1207 kWh/kWp (Tiepolo *et al.*, 2017). Este fato demonstra que a produtividade do SFCR calculada para o mês de outubro está além da esperada, pois efetuando-se o somatório de energia gerada em razão da potência total instalada, o resultado é de 139,29 kWh/kWp.

Em relação a taxa de desempenho, a grande maioria das médias diárias do SFCR foi superior à 75%, ultrapassando o valor típico adotado para efeitos de projeto. As perdas ocorridas por temperatura no processo de conversão de energia impactaram significativamente nos resultados obtidos, uma vez que módulos de silício cristalino tendem a apresentar um menor desempenho quando expostos a uma temperatura ambiente superior à 25°C devido aos maiores coeficientes de temperatura em relação à sua potência nominal. Por sua vez, apesar dos módulos de CdTe apresentarem menores índices de eficiência de conversão de energia, estes apresentam as menores perdas causadas por temperatura, apresentando resultados superiores de desempenho na maioria dos dias analisados.

Outro parâmetro importante a se considerar é o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI). Os geradores fotovoltaicos de m-Si e p-Si foram instalados com dois inversores de 3 kW para cada tecnologia, enquanto os geradores de CIGS e CdTe necessitaram de um inversor de 1,5 kW para cada. Considerando que o FDI é a razão entre a potência nominal do inversor e a potência nominal do gerador fotovoltaico, o FDI calculado é de 1,17 para a tecnologia de m-Si, 1,28 para p-Si, 0,89 para CIGS e 0,98 para CdTe. Nota-se que os inversores alocados sobre os geradores de silício cristalino operam de forma subcarregada, enquanto os inversores das tecnologias de filmes finos operam sobrecarregados. Com esta informação, nota-se que a produtividade e a taxa de desempenho do SFCR podem ser afetadas, uma vez que estes índices são afetados pelos valores de irradiação, condições do local de instalação, sujidade, temperatura e sombreamento. Portanto, pode haver perdas de eficiência dos sistemas sobrecarregados nos momentos de altos valores de irradiação devido a limitação da potência transferida pelos inversores.

7. CONCLUSÃO

As diferentes tecnologias de geradores fotovoltaicos do SFCR, instalado na Sede Neville do Câmpus Curitiba, apresentaram resultados distintos de desempenho durante a análise realizada no mês de outubro de 2019. Em razão da disponibilidade de dados ser recente até então, adotou-se uma metodologia em que a análise passou a ser diária. Este fato não comprometeu os resultados obtidos, uma vez que o sistema não apresentou falhas. Os índices de mérito do sistema, comumente utilizados com uma periodicidade maior, sendo calculados mensalmente ou anualmente, podem ser considerados satisfatórios durante o período analisado.

A análise de desempenho de um SFCR operando com diferentes tecnologias contribuiu para comparar o comportamento diário de cada uma delas em função da irradiação disponível no local, da energia gerada e da temperatura nos módulos. Foi possível perceber como estes fatores podem contribuir de forma positiva ou negativa para o sistema, dependendo da tecnologia empregada e do local onde o sistema se encontra instalado. Para uma análise mais profunda, é interessante um estudo a longo prazo no decorrer dos anos em que o sistema estará em operação.

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

- Benedito, R. S., 2009. Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório. Dissertação de Mestrado, PPGE, USP, São Paulo.
- Center For Sustainable Systems, 2019. Photovoltaic Energy Factsheet, University of Michigan. Disponível em: <http://css.umich.edu/sites/default/files/Photovoltaic%20Energy_CSS07-08_e2019.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2019.

- Mariano, J. D'A., 2017. Análise do Potencial da Geração de Energia Fotovoltaica para Redução dos Picos de Demanda e Contribuição Energética nas Edificações da UTFPR em Curitiba, Dissertação de Mestrado, PPGEC, UTFPR, Curitiba.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Ruther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2 ed., São José dos Campos: INPE.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, 1 ed., Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB.
- Rüther, R., 2004. Edifícios solares fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil, 1 ed., Florianópolis: UFSC/LABSOLAR.
- Tonin, F. S., 2015. Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica na cidade de Curitiba, Dissertação de Mestrado, PPGSE, UTFPR, Curitiba.
- Villalva, M. G., 2019. Tecnologia PERC – a nova geração de células fotovoltaicas, Artigos Técnicos, Canal Solar. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/64-tecnologia-perc-a-nova-geracao-de-celulas-fotovoltaicas>>. Acesso em: 05 dez. 2019
- Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F., 2012. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, 1 ed., São Paulo: Oficina de Textos.

DAILY PERFORMANCE OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM OPERATING WITH DIFFERENT TECHNOLOGIES

Abstract. *The knowledge of different technologies of photovoltaic generators is essential to identify the performance differences between each ones. This article aims to analyze the performance of a Grid-Connected Photovoltaic System (GCPV) composed by four different technologies: monocrystalline silicon (m-Si), polycrystalline silicon (p-Si), copper, indium and gallium diselenide (CIGS) and cadmium telluride (CdTe). The GCPV is the result of a R&D project by Companhia Paranaense de Energia (COPEL) and is installed on the premises of Federal Technological University of Paraná, Campus Curitiba, Headquarters Neville. The methodology adopted to perform the data analysis considered daily values for the month of October 2019. In this way, the study made it possible to perceive the variations in performance according to the different levels of irradiation available at the site, whose average was higher than that expected in the city in this year in the same period. Performance was calculated using figures of merit, denominated Capacity Factor, Final Yield and Performance Ratio. The losses caused by temperature were also analyzed in order to verify which photovoltaic cell technology performs better under certain conditions. In general, the CdTe photovoltaic generator presented superior performance results, in addition to having the lowest losses caused by temperature. The parameters involved in the calculations took into account the radiation levels at the site and the energy generated by each technology installed in the system. The availability of data related to a month of operation due to its recent implementation did not compromise the results obtained, since the system did not present any flaws in this period.*

Keywords: *Photovoltaic Systems, Photovoltaic Cell Technologies, Figures of Merit.*