

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

RENATO HIDEO FUSANO

**ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

RENATO HIDEO FUSANO

**ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: **Professor Dr. Jair Urbanetz Junior**

**CURITIBA
2013**

Renato Hideo Fusano

Análise dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 02 de abril de 2013.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Coordenador dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica
do DAELT

ORIENTAÇÃO

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gerson Maximo Tiepolo, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique Karam Salata, Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

DEDICATÓRIA

À Cecilia e Mario, meus pais, por conduzirem minha educação e pelo exemplo de pessoas que são.

Aos meus irmãos, Cynhtia, Erika e Danilo, que, juntamente com suas famílias, são sempre uma referência e um porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo amor, dedicação e paciência para que esse sonho pudesse ser realizado.

À minha família e amigos, que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis. Vocês são responsáveis por eu ter chego até aqui. Agradeço por fazerem parte de minha vida.

Ao Professor Dr. Jair Urbanetz Junior pela maravilhosa oportunidade em trabalhar com o tema e por toda dedicação, apoio e paciência na orientação deste trabalho.

Aos professores da banca pela atenção e contribuição dedicadas para o aprimoramento deste trabalho

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”

(Albert Einstein)

RESUMO

FUSANO, Renato Hideo. Análise dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR. 2013. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR's) têm vasta aplicação na geração de energia elétrica, podendo estar integrados ao telhado de uma edificação, próximo aos consumidores, operando de forma limpa e silenciosa com elevada confiabilidade. Esta pesquisa apresenta a análise de desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) em operação no Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) durante o ano de 2012. A verificação do desempenho da instalação se dá principalmente por alguns indicadores, conhecidos como índices de mérito, que são: Produtividade, Fator de Capacidade e Desempenho Global. Neste trabalho verificou-se que a energia gerada no período está adequada com o esperado e os índices obtidos para este SFCR são compatíveis com outros sistemas em operação em diferentes localidades no Brasil.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos. Energia Solar Fotovoltaica. Geração Distribuída.

ABSTRACT

FUSANO, Renato Hideo. Merit Indices Analysis for the UTFPR's Green Office Grid-Connected Photovoltaic System. 2013. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Grid-connected photovoltaic systems have a wide application in electric power generation. Can be installed integrated in a roof of a building, next to the consumers, operating with no noise or emissions and a high reliability. This research shows the performance analysis for the grid-connected photovoltaic system located at Green Office of Federal Technological University of Paraná during the year 2012. The performance is estimated through some parameters, called merit indices. They are: Yield, Capacity Factor and Performance Ratio. This final paper has encountered that the power generation is consistent with the expectations, and the merit indices are compatible with other systems operating in other places of Brazil.

Palavras-chave: Grid-Connected PV Systems. Solar PV Energy. Distributed Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte em 2011.	16
Figura 2 - Potencia acumulada instalada dos SFCR e dos SFI no mundo entre 1992 e 2011	18
Figura 3 – Diagrama básico de um SFCR.	19
Figura 4 – Espessura da massa de ar que é atravessada pelos raios solares.	25
Figura 5 - Percurso da luz solar através da atmosfera.	25
Figura 6 – Piranômetro termoeletrico de primeira classe.	27
Figura 7 – Pireliômetros de Cavidade Absoluta e de Incidência Normal.	28
Figura 8 – Exemplo de Heliógrafo Campbell-Stokes.	28
Figura 9 - Mapa de irradiação solar global horizontal para o território brasileiro.	30
Figura 10 - Mapa de irradiação solar no plano inclinado para o território brasileiro.	31
Figura 11 - Símbolo de módulo fotovoltaico.	33
Figura 12 – Detalhes de uma célula fotovoltaica.	36
Figura 13 - Tipos de células fotovoltaicas de silício cristalino.	37
Figura 14 – Configurações de SFCR	39
Figura 15 - SFI da COELBA – Bahia – Programa Luz para Todos.	40
Figura 16 – Modelo ENCE para módulo fotovoltaico.	45
Figura 17 – Média mensal de irradiação solar diária em Curitiba.	46
Figura 18 – Ângulo de incidencia de um raio solar	47
Figura 19 – Posicionamento de painéis fotovoltaico com inclinação da superfície igual à latitude.	47
Figura 20 – Irradiância solar para sistemas fixos e com rastreador de sol.	48
Figura 21 – Painel fotovoltaico com sistema de rastreamento solar.	49
Figura 22 – Curvas características de vários modelos de inversores.	51
Figura 23 - Características típicas das curvas IxV e PxV de uma célula fotovoltaica.	52
Figura 24 – Fator de Capacidade de diferentes fontes.	54
Figura 25 – Fachada do Escritório Verde da UTFPR.	59
Figura 26 – Painel Fotovoltaico Instalado no EV.	60
Figura 27 – Comportamento da relação IxV do módulo KD210GX em diferentes temperaturas.	61
Figura 28 – Comportamento do módulo KD210GX em diferentes níveis de irradiância.	61
Figura 29 – Inversor do SFCR do EV.	62
Figura 30 – Localização do EV e sentido de instalação do painel FV.	63
Figura 31 – Entrada de dados no RADIASOL2.	63
Figura 32 – Piranômetro Fotovoltaico.	65
Figura 33 – Resposta Espectral do Piranômetro Fotovoltaico SP-214.	65
Figura 34 – Piranômetro instalado junto ao painel fotovoltaico do EV.	66
Figura 35 – <i>Datalogger LASCAR EL-USB-4</i>	66
Figura 36 – Curvas de irradiância incidente no plano do painel em julho.	67

Figura 37 – Curva da irradiância incidente no plano do painel em dezembro.	67
Figura 38 – Irradiação diária no mês de Julho/2012	68
Figura 39 - Irradiação diária no mês de Agosto/2012	68
Figura 40 - Irradiação diária no mês de Setembro/2012.....	68
Figura 41 - Irradiação diária no mês de Outubro/2012	69
Figura 42 - Irradiação diária no mês de Novembro/2012.....	69
Figura 43 - Irradiação diária no mês de Dezembro/2012.....	69
Figura 44 – Irradiação diária média.....	70
Figura 45 – Curva de irradiância ao longo do dia.	71
Figura 46 – Totalizador de energia.....	73
Figura 47 – Geração diária.....	73
Figura 48 – Irradiação diária média para diferentes ângulos de inclinação do painel.	78
Figura 49 – Sujeira sobre o painel do EV.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Albedo em função da superfície circundante à instalação FV,	26
Tabela 2 – Classe de Eficiência de Módulos Fotovoltaicos	45
Tabela 3 – Fator de Capacidade em SFCR instalados no Brasil.	55
Tabela 4 – Índice de produtividade em SFCR instalados no Brasil.	56
Tabela 5 – Fatores de perdas em um SFCR com tecnologia cristalina.	58
Tabela 6 - Características do Módulo KD210GX em condição padrão de teste (STC)	60
Tabela 7 – Características Elétricas do Inversor de frequência PVP2000.....	62
Tabela 8 – Irradiação Média (Atlas Brasileiro de Energia Solar).....	64
Tabela 9 – Irradiação Média (Estação A807 do INMET)	64
Tabela 10 – Geração mensal estimada pelo SFCR do EV	72
Tabela 11 – Geração mensal real do SFCR do EV.....	74
Tabela 12 – Índice de Produtividade Final do SFCR do EV.....	74
Tabela 13 – Fator de Capacidade do SFCR do EV.....	75
Tabela 14 – Desempenho Global do SFCR do EV	76
Tabela 15 – Índices de mérito para diferentes tempos e climas	76
Tabela 16 – Geração para inclinação ideal	78

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

a-Si – silício amorfo;

CA – corrente alternada;

CC – corrente contínua;

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;

CdTe – telureto de cádmio;

C_F – fator de capacidade;

COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia;

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito;

c-Si – silício cristalino;

DGS - *Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie*;

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética;

EPIA – *European Photovoltaic Industry Association*;

EV – Escritório Verde;

FDI – Fator de dimensionamento de Inversores;

FV – fotovoltaico;

GD – geração distribuída;

Gcs – constante solar;

IEA – *International Energy Agency*;

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial;

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;

LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar;

p-Si – silício policristalino;

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem ;

P_R – desempenho global;

REN21 – *Renewable Energy Policy Network for de 21st Century*;

SFCR – sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica;

SFI – sistema fotovoltaico isolado;

SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment*;

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;

USP – Universidade de São Paulo;

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Y_F – produtividade anual;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. TEMA DE PESQUISA	16
1.1.1. Delimitação do Tema.....	19
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS.....	20
1.3. OBJETIVOS	20
1.3.1. Objetivo Geral	20
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. JUSTIFICATIVA	21
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2. REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	24
2.1.1 Instrumentos de Medição de Irradiação Solar	26
2.1.2 Fonte de Dados de Radiação Solar	29
2.1.2.1 Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	29
2.1.2.2 Estações solarimétricas.....	32
2.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	19
2.2.1 Terminologia.....	33
2.2.2 Células Fotovoltaicas	35
2.2.3 Inversores.....	38
2.3 Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	40
2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados	40
2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica	41
2.4 LEGISLAÇÃO.....	42
2.5 DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	44
2.5.1 Posicionamento do Painel Fotovoltaico.....	46
2.5.2 Perdas nos SFCR	49
2.5.2.1 Temperatura das células FV	49
2.5.2.2 Descasamento espectral	49
2.5.2.3 Degradação das células FV	50
2.5.2.4 Sombreamento parcial	50
2.5.2.5 Eficiência dos inversores.....	51

2.5.2.5.1 Limitação de potência pelo inversor.....	52
2.5.2.5.2 Perdas devido à rede da concessionária	52
2.5.2.6 Disponibilidade do sistema.....	53
2.5.3 Índices de Mérito Utilizados na Avaliação de um SFCR.....	53
2.5.3.1 Fator de capacidade de um SFCR	54
2.5.3.2 Produtividade Anual de um SFCR.....	55
2.5.3.3 Desempenho Global de um SFCR	56
3. DESEMPENHO DO SFCR DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR	59
3.1 O ESCRITÓRIO VERDE	59
3.2 O SFCR DO EV.....	60
3.3 IRRADIAÇÃO SOLAR NO PAINEL FOTOVOLTAICO DO EV	62
3.3.1 Piranômetro Fotovoltaico.....	65
3.4 GERAÇÃO DO SFCR DO EV	71
3.4.1 Estimação da Energia Gerada pelo SFCR do EV	71
3.4.2 Energia Entregue pelo SFCR do EV	72
3.5 ÍNDICES DE MÉRITO DO SFCR DO EV.....	74
3.5.1 Produtividade Final (<i>Final Yield</i>).....	74
3.5.2 Fator de Capacidade	75
3.5.3 Desempenho Global (<i>Performance Ratio</i>).....	75
3.5.4 Análise das variações encontradas	76
3.6 POSSÍVEIS MELHORIAS	77
3.6.1 Alteração da Inclinação do Painel	77
3.6.2 Substituição do Inversor	79
3.6.3 Implantação de rotina de limpeza do painel	79
3.6.4 Sugestões de Trabalhos Futuros	80
4. CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS.....	83
ANEXOS	86
ANEXO A	86
ANEXO B	88
ANEXO C	90
ANEXO D	92

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA DE PESQUISA

O Brasil, com aproximadamente 8,5 milhões de metros quadrados, 7 mil quilômetros de litoral e condições geológicas e climáticas muito favoráveis, possui um dos maiores e melhores potenciais energéticos do mundo. Além das reservas de combustíveis fósseis, a grande participação das fontes renováveis de energia, destacando-se entre elas a hidroeletricidade e a biomassa, são abundantes para garantir a auto-suficiência energética do país, considerado como uma das referências no uso de energias limpas (ANEEL, 2008).

Na geração de energia elétrica, o Brasil apresenta uma matriz predominantemente renovável. Em 2011, a oferta interna de energia elétrica foi de 567,6TWh, sendo que 89% da eletricidade gerada no país foi originada de fontes renováveis (EPE, 2012). A figura 1 mostra a divisão da oferta interna de energia elétrica por fonte no país

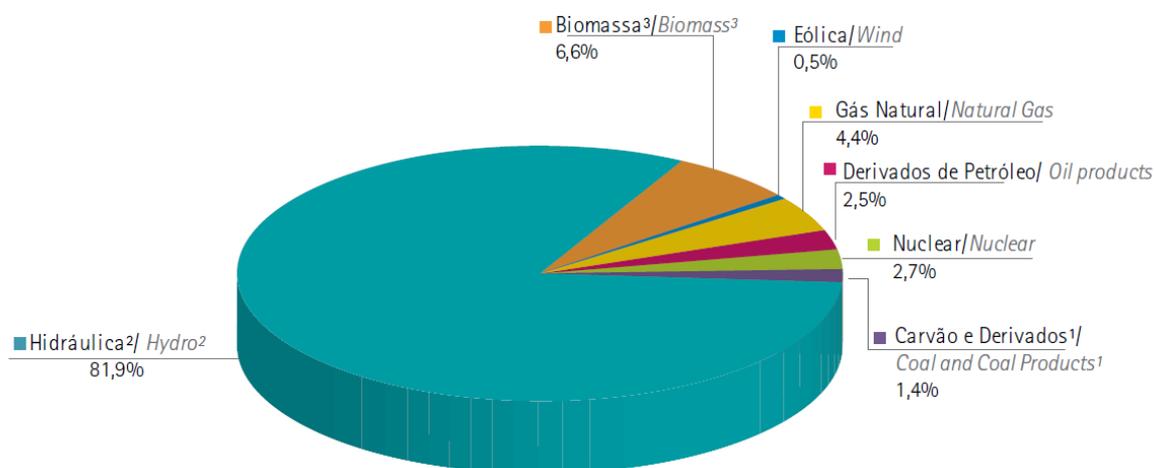


Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte em 2011.
Fonte: EPE (2012).

É de extrema importância que a disponibilidade de energia elétrica se mantenha compatível com o aumento do consumo, provocado pelo atual ciclo de crescimento econômico. Entretanto, para esta expansão, a participação das fontes tradicionais, como as hidroelétricas, que causam o alagamento de grandes áreas, e os combustíveis fósseis, que emitem gases de efeito estufa, deve ser gradualmente reduzida, utilizando-se outros recursos menos agressivos ao meio ambiente e que

favoreçam a diversificação da matriz energética, como, por exemplo, o uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica – SFCR. (ANEEL, 2008).

Sob o ponto de vista ambiental, a tecnologia fotovoltaica pode ser considerada uma das opções que menos causam impactos, pois não geram poluentes durante sua operação e os resíduos de fabricação ou de descarte dos módulos fotovoltaicos podem ser reaproveitados pelos fabricantes. Já sob o ponto de vista técnico e econômico, estes sistemas favorecem a descentralização da geração de energia elétrica, diminuindo perdas na transmissão e distribuição e gastos com manutenção (BOYLE, 2004).

A produção de energia elétrica utilizando a energia solar através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede é uma prática muito difundida e utilizada em diversos países, como a Alemanha, a Itália, o Japão, a Espanha e os Estados Unidos (REN21, 2012). No Brasil, no entanto, a maior parte da produção fotovoltaica conectada à rede elétrica está basicamente restrita aos laboratórios e centros de pesquisa, não tendo maior número de aplicações devido à falta de políticas de incentivo ao uso desse recurso, já que a implementação da tecnologia se encontra tecnicamente bem difundida

Segundo dados do *Market Report* da EPIA (2012), em 2011 teve-se o acréscimo de 27,7GW da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em todo o mundo, contra 17,0GW em 2010, totalizando cerca de 67,4GW. Globalmente, a capacidade atual de geração fotovoltaica é cerca de doze vezes maior do que a existente há seis anos atrás, impulsionada, principalmente, pelos países da união européia, que detêm cerca de 75% desta capacidade, e pela grande queda no valor dos módulos fotovoltaicos, que ano após ano têm seus custos diminuídos devido à produção em grande escala, sobretudo por países asiáticos (EPIA, 2012).

A figura 2 mostra a evolução da potência acumulada das instalações fotovoltaicas no mundo.

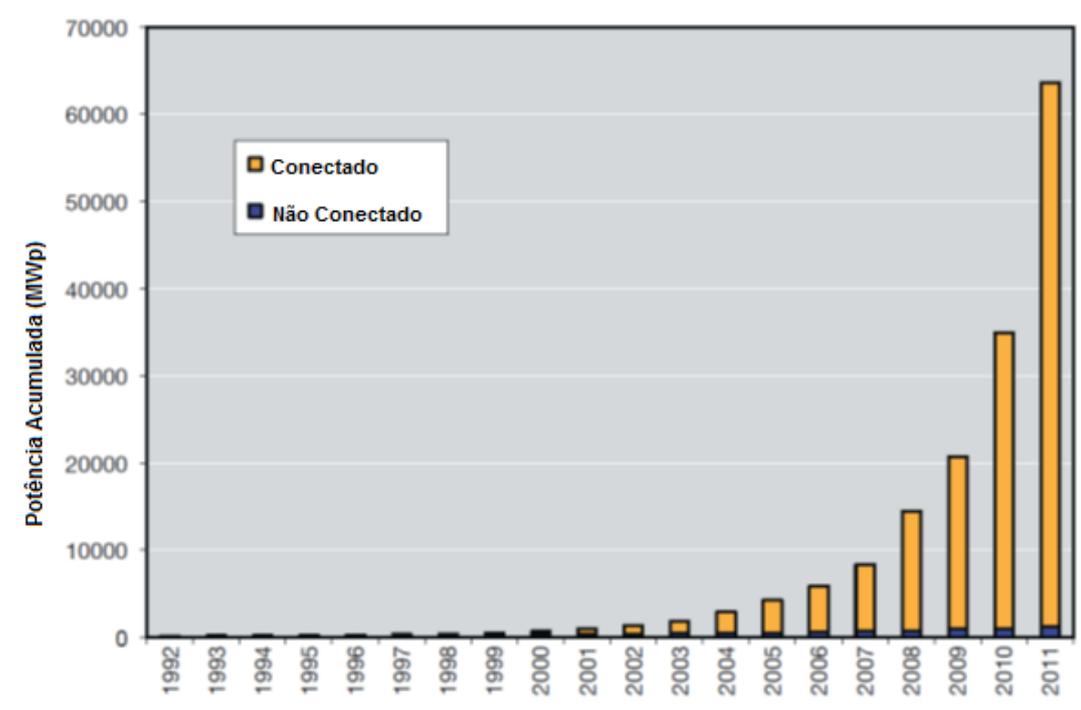


Figura 2 - Potencia acumulada instalada dos SFCR e dos SFI no mundo entre 1992 e 2011

Fonte: IEA – PVPS (2012)

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos: Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR). O primeiro é bastante utilizado em áreas isoladas, onde o acesso à rede pública de energia elétrica é técnica e economicamente inviável, e normalmente utilizam sistema de armazenamento de energia para que esta possa ser utilizada quando o painel fotovoltaico não estiver recebendo radiação solar.

Já os sistemas fotovoltaicos conectados à rede operam sem a necessidade do uso de baterias, evitando os riscos que estas poderiam oferecer ao meio ambiente e à saúde pública, tendo o suprimento de energia pela rede da concessionária nos momentos em que a geração é menor do que o consumo da edificação ou quando o painel não estiver recebendo luz solar. Além disso, podem entregar o excedente de energia gerada à rede da concessionária. A figura 3 mostra um diagrama simplificado de um SFCR.

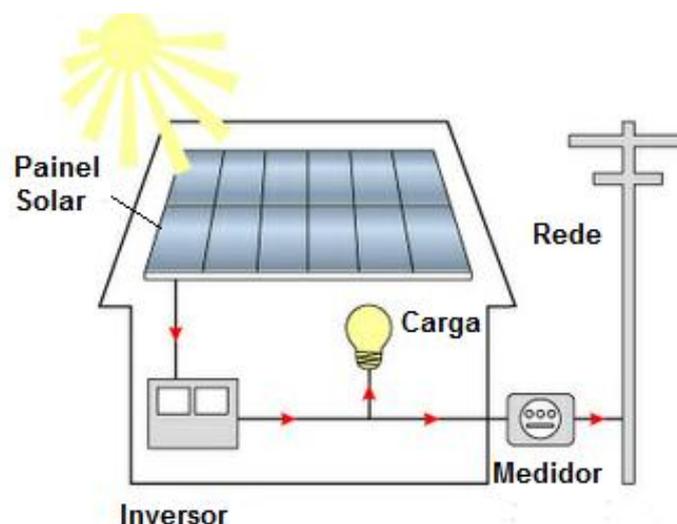


Figura 3 – Diagrama básico de um SFCR.

Fonte: *Awesome Sun Power* (2012).

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através da Resolução Normativa nº. 482, estabeleceu as condições gerais de micro e mini geração, permitindo que o excedente de energia gerada seja injetado na rede com o benefício do sistema de compensação. Desta forma, existe o acúmulo de créditos nos períodos em que a geração é maior que o consumo da edificação, podendo ser utilizados posteriormente, através do consumo de energia da concessionária, em períodos em que haja déficit na produção, dentro do prazo de até 36 meses.

1.1.1. Delimitação do Tema

O presente trabalho visa estudar as características dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, através do acompanhamento e da análise de alguns indicadores de produtividade, conhecidos como índices de mérito, e que permitem a avaliação do desempenho de uma instalação fotovoltaica.

O SFCR a ser avaliado neste trabalho está instalado no Escritório Verde da UTFPR. Este escritório tem o propósito de servir como referência em construção sustentável, tendo como princípio incentivar programas e implementar o uso de tecnologias que reduzam o impacto ambiental e promovam o desenvolvimento sustentável. O sistema consiste em um painel composto por 10 módulos fotovoltaicos Kyocera KD-210GX-LPU de 210 Watts cada, totalizando uma potência

de pico de 2,1kWp, conectado à rede elétrica, sem o uso de baterias, através de um inversor de 2,0kW.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Devido às questões políticas, econômicas, energéticas e ambientais, é necessário que cada vez mais seja estudado e incentivado o uso de fontes alternativas de energia.

Faltam estudos com relação ao SFCR da UTFPR. Deste modo, podem ser feito, os seguintes questionamentos:

A energia real gerada é compatível com a energia esperada?

O sistema opera de forma otimizada, ou necessita de reconfiguração para que haja o máximo aproveitamento do recurso disponível?

Os indicadores de desempenho do sistema são compatíveis com outras instalações similares?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Acompanhar e analisar os índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do Escritório Verde da UTFPR, com o intuito de verificar o desempenho da instalação, seguindo as metodologias de projeto e da literatura especializada, através da comparação com instalações similares.

1.3.2. Objetivos Específicos

Estudar as tecnologias e os equipamentos disponíveis no mercado para a geração de energia elétrica através de células fotovoltaicas;

Realizar coleta de dados e medições da irradiância solar incidente no painel fotovoltaico e da energia elétrica gerada;

Levantar e analisar dados de instalações semelhantes em operação;

Realizar o acompanhamento e a estimativa da energia esperada e da energia real gerada;

Verificar o desempenho do sistema, através dos índices de produtividade (*yield*), fator de capacidade e taxa de desempenho (*performance ratio*) comparando-os com o de outras instalações;

Identificar discrepâncias e avaliar as possíveis causas para as diferenças apresentadas, caso elas existam.

1.4. JUSTIFICATIVA

Constata-se que a demanda de energia elétrica aumenta cada vez mais à medida que o país se desenvolve. Porém, o uso de combustíveis fósseis, ditos não renováveis, tem como consequência a degradação do meio ambiente, contribuindo de forma impactante para o aquecimento global. Portanto, é importante o estudo e o incentivo ao uso de fontes renováveis de energia que permitam o desenvolvimento sustentável. Entre estas fontes, está a energia solar, que pode ser utilizada para geração de energia elétrica de forma direta através do efeito fotovoltaico. A geração de energia através de painéis fotovoltaicos tem a grande vantagem de apresentar mínimo impacto ambiental, pois não emitem poluentes, não produzem ruído e podem ser instaladas em usinas geradoras próximas aos centros urbanos, ou ainda, em telhados residenciais, comerciais e industriais, reduzindo os custos e os impactos das longas linhas de transmissão e distribuição.

A realização deste estudo possibilitará a verificação do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede pública de eletricidade de 2,1kWp, instalado no telhado do Escritório Verde da UTFPR. Através da obtenção e manipulação dos dados necessários serão gerados indicadores que permitirão a comparação da performance deste sistema com outros, operando em diferentes localidades sob diferentes configurações, identificando possíveis variáveis que possam interferir na geração de energia elétrica prevista.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização deste trabalho dar-se-á através das seguintes etapas:

Pesquisa de referência bibliográfica, através da busca de livros, artigos e trabalhos técnicos em acervos e na Internet, selecionando as obras com maior relevância sobre o assunto. Também serão consultados fabricantes e empresas especializadas;

Coletas de dados de potência instantânea e energia elétrica gerada, além da medição da irradiância recebida pelo painel em vários horários e dias ao longo do ano;

Cálculo da energia elétrica estimada a ser gerada mês a mês em função de dados históricos e outros requisitos técnicos;

Análise dos dados coletados e sua manipulação para obtenção dos índices necessários para verificação do desempenho do sistema;

Estudo dos indicadores de acompanhamento em instalações semelhantes, permitindo a comparação com os dados obtidos no SFCR do Escritório Verde.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos contemplando:

O capítulo introdutório, que consiste na introdução ao assunto, com a definição do tema, dos problemas, da justificativa para execução deste trabalho, dos objetivos a serem atingidos e a linha geral de pesquisa a ser adotada;

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, consistindo de uma revisão bibliográfica fundamental sobre o assunto. Nele, são descritos os conceitos básicos a serem utilizados ao longo do trabalho, permitindo a compreensão da natureza da radiação solar, a tecnologia e o funcionamento dos módulos e demais equipamentos e as diferentes aplicações deste sistema;

No capítulo 3 são apresentados os equipamentos e os dados gerados através da análise e do acompanhamento do SFCR do Escritório Verde da UTFPR, detalhando-se os índices de produtividade (*yield*), fator de capacidade e desempenho global (*performance ratio*), explicitando dos resultados obtidos, com as

definições sobre o desempenho, a identificação as possíveis perdas e propostas de melhorias do sistema em estudo.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e discussões em relação ao trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O sol fornece energia na forma de radiação, sem a qual a vida na Terra não seria possível. A energia é gerada no núcleo solar, predominantemente através das reações de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogênio em átomos de hélio. Nestas reações, devido à conversão de matéria, uma quantidade gigantesca de energia é liberada. Contudo, devido à grande distância da Terra, somente uma pequena porção da radiação solar atinge sua superfície, na grandeza de 1×10^{18} kWh/ano (HINRICHS, 2003).

A irradiância, também chamada de intensidade de radiação solar, é a potência solar instantânea que atinge uma determinada área na superfície terrestre, sendo geralmente indicada em W/m^2 , e seu valor irá depender da distância entre o sol e a Terra, variando de acordo com a posição relativa entre ambos ao longo do ano devido ao movimento elíptico de translação que o planeta descreve. Na média esta intensidade tem o valor de $1367 W/m^2$, denominada de constante solar (G_{CS}). Este nível de irradiância não é alcançado na superfície terrestre devido aos efeitos atenuantes da atmosfera, através da reflexão, absorção (por ozônio, vapor de água, oxigênio e gás carbônico) e espalhamento (por moléculas de ar, partículas em suspensão e poluição). Portanto, quanto maior a latitude do local, maior será o desvio em relação ao zênite e a atenuação devido ao aumento da camada da atmosfera que os raios solares devem atravessar (BOYLE, 2004). A figura 4 indica a variação da camada da atmosfera que é atravessada pelos raios solares em função do ângulo de incidência.

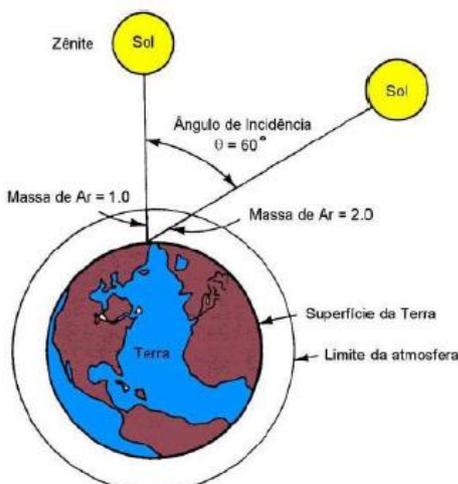


Figura 4 – Espessura da massa de ar que é atravessada pelos raios solares.

Fonte: CECRESB(2012).

A disponibilidade de radiação solar também irá depender das condições climáticas e da posição relativa do ponto estudado em relação ao sol. A irradiância média que atinge a superfície da Terra, ao meio dia, sem nuvens, é de aproximadamente 1000 W/m^2 , sendo este valor geralmente o utilizado como parâmetro para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (BOYLE, 2004).

A luz solar que atinge a superfície da Terra é composta por uma fração direta e uma fração difusa, conforme mostrado na figura 5. A radiação direta é a que chega segundo a direção do sol, sem sofrer processo de espalhamento ou reflexão, produzindo sombras bem definidas em objetos a ela exposta. Já a radiação difusa é resultado do espalhamento da radiação direta, causado por nuvens e outros componentes da atmosfera (DGS, 2008).

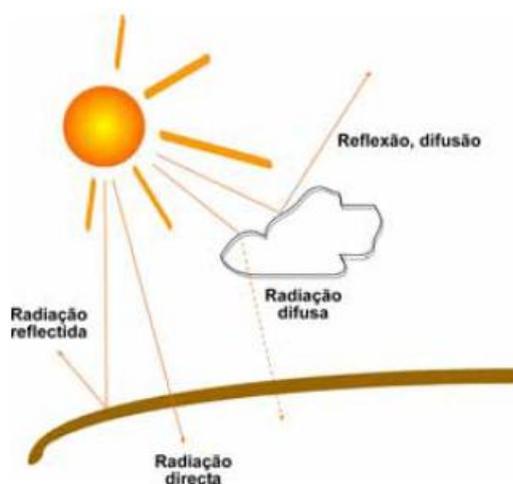


Figura 5 - Percurso da luz solar através da atmosfera.

Fonte: DGS (2008).

O albedo é a parcela da luz solar que sofre reflexão pela superfície da terra. Geralmente é um dos dados iniciais solicitados por softwares de simulação de irradiação solar e irá variar de acordo com a composição da superfície terrestre. Quanto maior o albedo, maior é a reflexão da radiação solar nas zonas adjacentes à instalação e, conseqüentemente, maior a radiação difusa incidente no local. A tabela 1 indica valores de albedo comuns para diferentes tipos de superfícies. Normalmente pode se assumir um valor geral de 0,2 para o albedo (DGS, 2008).

Tabela 1 - Albedo em função da superfície circundante à instalação FV,

Superfície	Albedo	Superfície	Albedo
Pastos	0,25	Asfalto	0,15
Gramado	0,18 a 0,23	Florestas	0,05 a 0,18
Pastos secos	0,28 a 0,32	Areais	0,10 a 0,25
Campo lavrado	0,26	Superfície da água ($\delta_s > 45^\circ$)	0,05
Terra estéril	0,17	Superfície da água ($\delta_s > 30^\circ$)	0,08
Pedregulhos	0,18	Superfície da água ($\delta_s > 20^\circ$)	0,12
Concreto Liso	0,30	Superfície da água ($\delta_s > 10^\circ$)	0,22
Concreto sob efeito da erosão	0,20	Camada de neve fresca	0,80 a 0,90
Cimento liso	0,55	Camada de neve envelhecida	0,45 a 0,70

Fonte: Adaptado de DGS (2008).

2.1.1 Instrumentos de Medição de Irradiação Solar

A medição da radiação solar global e de suas componentes direta e difusa, na superfície terrestre é essencial para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com o histórico destas medidas é possível analisar a viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema fotovoltaico. As medições padrões para radiação solar são: radiação global no plano horizontal, radiação direta normal e radiação global inclinada (com inclinação igual à latitude local).

Dentre os equipamentos mais utilizados para medição solar, estão o piranômetro, o pireliômetro e o heliógrafo.

Os piranômetros medem a radiação global. Existem dois tipos destes instrumentos:

- Baseado em termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca uma diferença de potencial que ao ser medida possibilita a relação do valor da irradiância solar incidente. Apresentam grande precisão, linearidade, uniformidade e ótima resposta espectral, sendo considerados instrumentos de primeira classe. A figura 6 mostra um exemplo de piranômetro termopilha de primeira classe.



Figura 6 – Piranômetro termoeletrico de primeira classe.

Fonte: Vaisala (2012)

- Baseado em fotocélula, que basicamente utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para fazer a medição de irradiância solar. Este tipo de piranômetro possui limitações quanto à sensibilidade em certos comprimentos de onda (CRESESB, 2004). De qualquer forma, é largamente utilizado devido ao custo reduzido (cerca de 10% do valor de um piranômetro de termopilha) e pela facilidade de uso, sendo particularmente úteis como instrumentos secundários, recomendados para integrais diárias de radiação solar total sobre o plano ou para observação de pequenas flutuações da radiação, devido à sua grande sensibilidade e baixo tempo de resposta. Para valores diários, o erro nas medições de um piranômetro fotovoltaico está na ordem dos 3%. Certas compensações podem melhorar ainda mais os resultados, de forma a se atingir diferenças menores que 1% em medidas de radiação diária, quando comparados com piranômetros de precisão (UFPE, 2000).

Devido à menor resposta espectral solar, geralmente entre 300 a 1100nm, os piranômetros baseados em células de silício podem eventualmente não representar precisamente a irradiância solar recebida. Isto ocorre principalmente em dias nublados, onde se tem predominância de radiação difusa e conseqüentemente a redução do espectro solar que atinge o instrumento. Contudo, como a resposta

deste tipo de piranômetro é praticamente idêntica ao dos painéis fotovoltaicos, é possível obter uma ótima indicação da energia disponível para conversão em eletricidade por um sistema que utilize células deste tipo, produzindo medições precisas para o cálculo da eficiência e uma melhor compreensão da resposta do painel solar na produção de energia elétrica (HUMPHRIES, 2011).

Pireliômetros são instrumentos destinados a medir a radiação direta incidente sobre uma superfície. Apresentam uma pequena abertura que permite visualizar somente o disco solar e a região vizinha, denominada circunsolar. O instrumento é constantemente ajustado de modo a focalizar a região do sensor à medida que acompanha o movimento do sol (CRESESB, 2004). A figura 7 mostra exemplos de pireliômetros.



Figura 7 – Pireliômetros de Cuidade Absoluta e de Incidência Normal.

Fonte: Cresesb (2004)

O Heliógrafo é um instrumento que permite determinar o tempo de duração da incidência solar ao longo do dia e do ano em uma superfície, através de uma fita que enegrece ao ser incidida pela radiação direta do sol, que é focalizada através de uma esfera de cristal. A figura 8 mostra um exemplo de heliógrafo.



Figura 8 – Exemplo de Heliógrafo Campbell-Stokes.

Fonte: CRESESB (2004)

2.1.2 Fonte de Dados de Radiação Solar

2.1.2.1 Atlas Brasileiro de Energia Solar

Entre os trabalhos pioneiros e consistentes de avaliação do potencial de energia solar disponível no Brasil estão o Atlas de Irradiação Solar do Brasil, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1998, e o Atlas Solarimétrico do Brasil, realizado pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), com o apoio do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), em 2000.

Mais recentemente, em 2006, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido no escopo do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), sendo considerada a referência mais atual e completa sobre a estimativa do potencial de energia solar no Brasil. Este projeto teve início em 2001, sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e foi concebido através do levantamento de dados climatológicos de estações de medição e imagens de satélites, no período entre os anos de 1995 e 2005. Tem como foco principal promover o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade, de forma a auxiliar no planejamento e desenvolvimento de políticas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica. Este trabalho abrange mapas e dados digitais das diversas componentes da radiação solar, até dados socio-econômicos e de infra-estrutura dos países participantes, permitindo sua utilização em estudos de viabilidade econômica no desenvolvimento de projetos. Os principais produtos na área de energia solar, gerados como consequência do projeto SWERA no Brasil, são:

- Mapas impressos e digitais de irradiação solar em alta resolução;
- Geração de séries temporais horárias;
- Construção de diferentes cenários de aproveitamento da energia solar, desenvolvidos com o uso de ferramentas de um sistema de informações geográficas

A base de dados e produtos gerados pelo Projeto SWERA estão disponíveis para acesso público em <http://swera.unep.net/>.

As figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, os mapas que representam a média anual de irradiação solar global horizontal e inclinada incidente no território brasileiro. Apesar da grande extensão do país e das diferentes características climáticas, observa-se boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todas regiões do país.

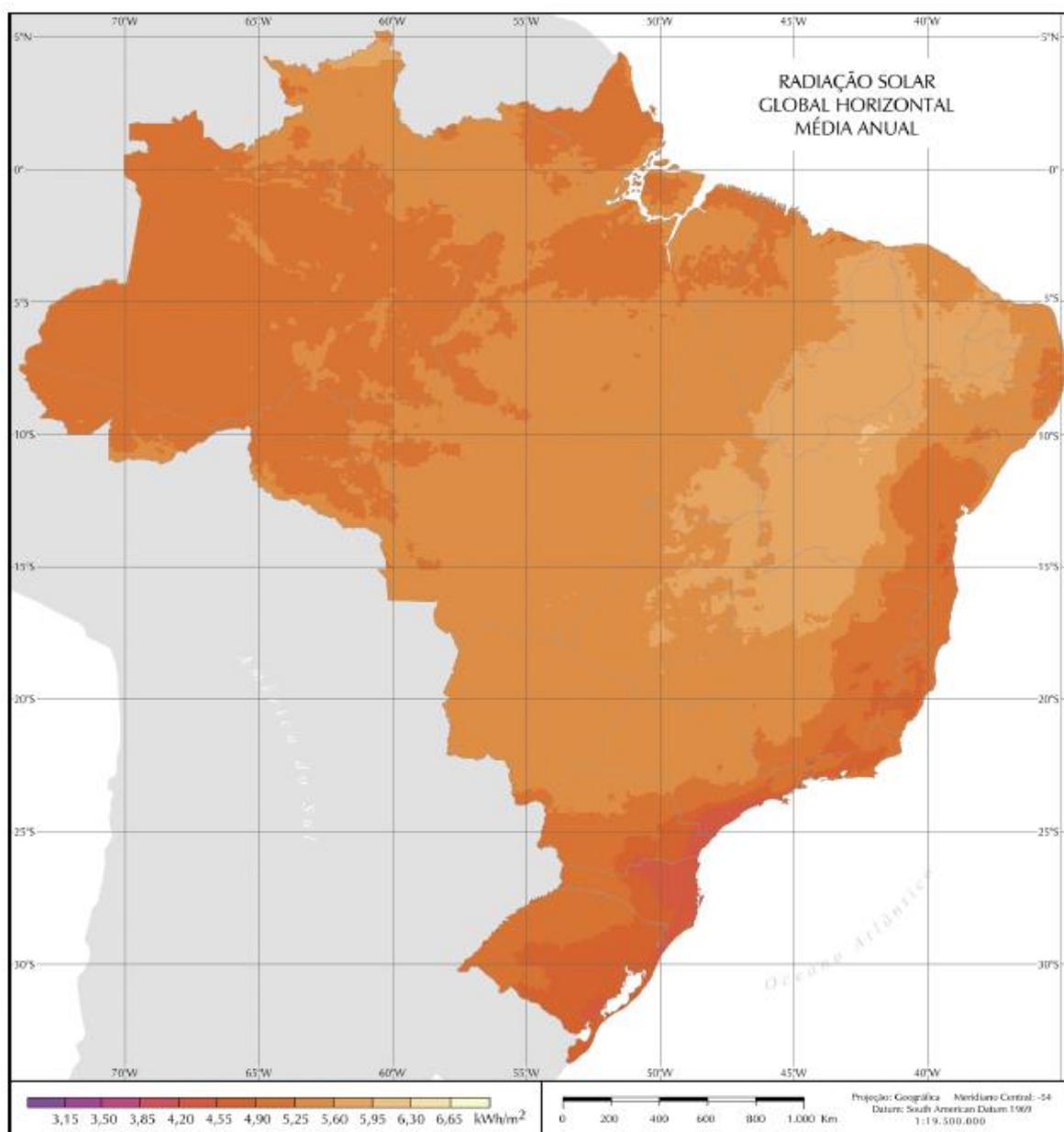


Figura 9 - Mapa de irradiação solar global horizontal para o território brasileiro.

Fonte: Pereira et al. (2006).

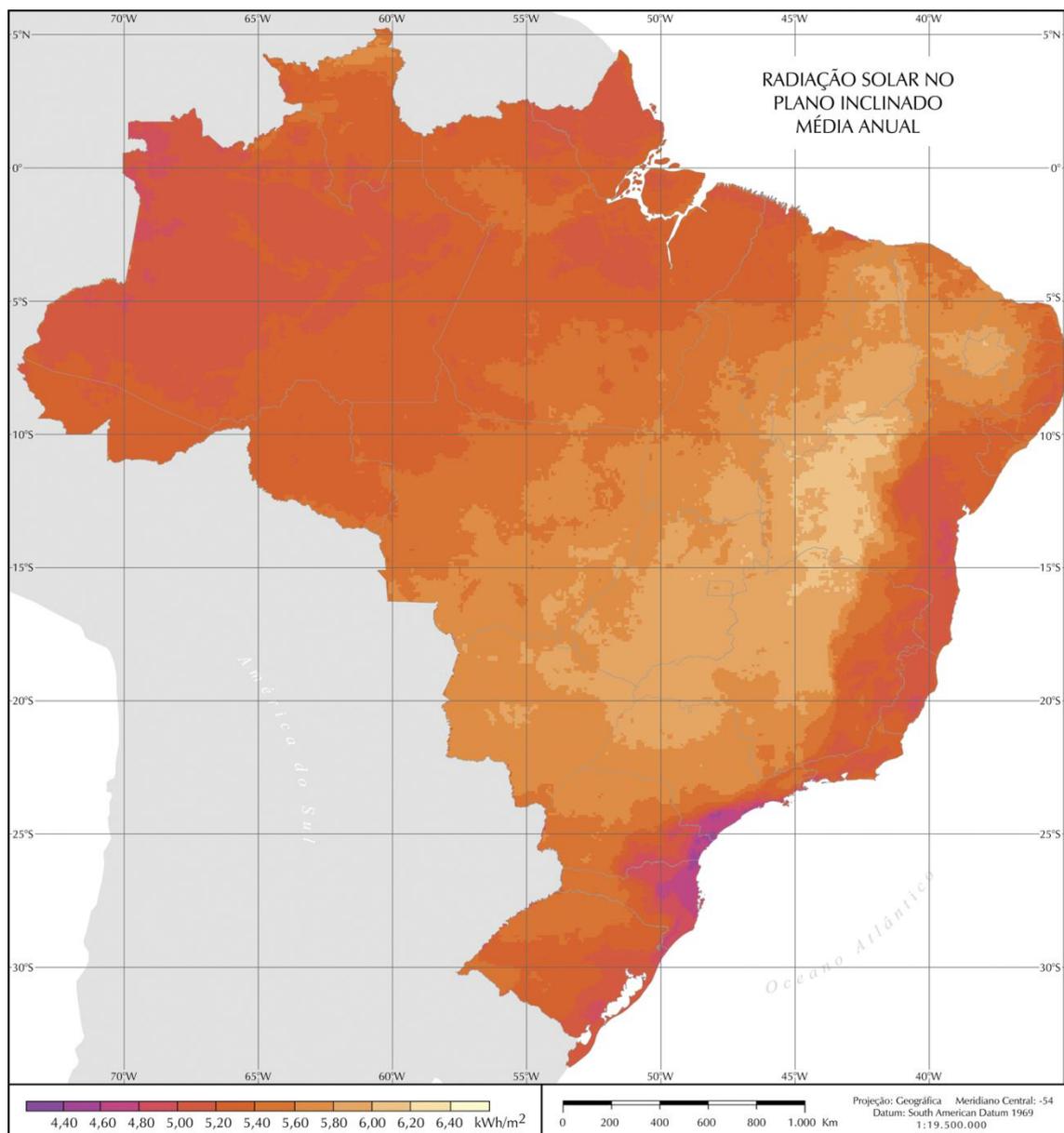


Figura 10 - Mapa de irradiação solar no plano inclinado para o território brasileiro.

Fonte: Pereira et al. (2006).

Segundo dados disponíveis nos mapas do projeto SWERA, a região no entorno do câmpus Curitiba da UTFPR, ao longo do ano, recebe uma irradiação global horizontal média de $4,619\text{kWh/m}^2$ por dia, enquanto que em cidades brasileiras mais próximas do equador esta radiação pode chegar próximo aos $6,5\text{kWh/m}^2$ por dia.

Desta forma, percebe-se que o Brasil, mesmo nas regiões menos favorecidas de radiação solar, seja por localização geográfica ou por fatores climáticos, apresenta uma média acima da grande maioria dos países que mais

investem na energia fotovoltaica, como por exemplo a Alemanha, que possui média diária de 2,81kWh/m² (DGS, 2008).

Os valores de irradiação disponibilizados pelo projeto SWERA são referentes a irradiação incidente no plano horizontal e no plano com inclinação igual a latitude local, com sentido para o equador. Um *software* que pode auxiliar na elaboração de arquivos de dados de sequências de radiação solar é o RADIASOL 2, elaborado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e que permite a obtenção de resultados horários, diários e mensais de radiação solar sobre superfícies inclinadas em diferentes orientações. O cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas é um procedimento trabalhoso devido ao elevado número de operações envolvidas, além de modelos matemáticos de distribuição temporal e espacial da radiação solar. Para isso, o software RADIASOL 2 utiliza internamente modelos matemáticos disponíveis na literatura, além da base de dados do atlas solarimétrico disponibilizados pelo projeto SWERA.

O software RADIASOL 2 pode ser encontrado em <http://www.solar.ufrgs.br/>.

2.1.2.2 Estações solarimétricas

Enquanto dados obtidos dos atlas solarimétricos são importantes para estimar a produção de um empreendimento com geradores fotovoltaicos e nos estudos de viabilidade econômica, para verificação do desempenho de uma instalação em operação é mais conveniente utilizar dados reais do período considerado, pois, do contrário, variações climáticas atípicas podem gerar indicadores com grandes diferenças. O uso de dados de irradiação obtidos de estações solarimétricas próximas à instalação permite uma melhor verificação de sua eficiência. Neste trabalho serão utilizados os dados de irradiação solar global horizontal do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, solicitados pelo site: <http://www.inmet.gov.br/portal>.

2.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.2.1 Terminologia

A norma ABNT NBR 10.899 define os padrões brasileiros dos principais termos técnicos relativos à conversão de energia solar fotovoltaica, como unidades, simbologias e grandezas solarimétricas. A definição de alguns destes termos, segundo a norma, e que são relevantes para este trabalho são citados a seguir:

- **albedo (G_{ALB}):** índice relativo à fração da energia radiante solar, recebida em uma unidade de área, devido a refletância nos arredores de onde está instalado um dispositivo;
- **ângulo de incidência (θ):** ângulo entre o raio incidente (direção do Sol) e a normal à superfície da célula ou módulo;
- **célula solar ou célula fotovoltaica:** dispositivo fotovoltaico elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica;
- **módulo fotovoltaico:** unidade básica formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica. A figura 11 apresenta o símbolo referente ao módulo, onde o triângulo indica o polo positivo;

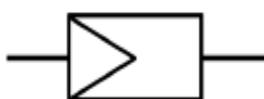


Figura 11 - Símbolo de módulo fotovoltaico.

Fonte: ABNT NBR 10.899 (2006)

- **painel fotovoltaico:** um ou mais módulos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma única estrutura;
- **arranjo ou gerador fotovoltaico:** um ou mais painéis fotovoltaicos interligados eletricamente, de modo a prover uma única saída de corrente elétrica;
- **sistema fotovoltaico:** conjunto de elementos composto de arranjo(s) fotovoltaico(s), podendo incluir: dispositivos para controle, condicionamento, supervisão, proteção e armazenamento de energia elétrica; fiação; fundação

e estrutura de suporte. O termo em inglês *BOS* (*Balance Of System*) se refere ao sistema fotovoltaico, não incluindo os módulos fotovoltaicos;

- **corrente de curto-circuito (I_{sc}):** corrente de saída de um conversor fotovoltaico, na condição de curto-circuito e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total.
- **declinação solar (δ):** ângulo de vértice no centro da Terra, formados pelas semiretas definidas pela direção do Sol e pelo plano do Equador, com faixa de variação $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ e, por convenção, positivo quando estiver no hemisfério norte;
- **inclinação de uma superfície (β):** ângulo de inclinação entre uma superfície e o plano horizontal;
- **radiação solar:** forma de transferência de energia advinda do Sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons;
- **irradiância solar (G):** taxa da radiação solar incidente em uma superfície, por unidade de área. Normalmente medida em W/m^2 ;
- **irradiância difusa (G_{DIF}):** irradiância solar espalhada pela atmosfera, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal.
- **irradiância direta (G_{DIR}):** irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser normal ou horizontal;
- **irradiância global (G_{HOR}):** potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, sendo igual à irradiância direta mais a irradiância difusa;
- **irradiância total (G_{TOT}):** potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebido em uma unidade de área em uma superfície;
- **irradiação solar (I) ou (H):** irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado. Sendo normalmente medida em J/m^2 ou Wh/m^2 , é simbolizada por " I ", quando integrada no período de uma hora, ou por " H ", quando integrado no período de um dia;
- **irradiação direta (H_{DIR})** - irradiância direta integrada durante um dia, podendo ser horizontal (H_{DIR}) ou normal (H_{DIRN});
- **irradiação difusa (H_{DIF})** - irradiância difusa integrada durante um dia;
- **irradiação global (H_{HOR})** - irradiância global integrada durante um dia;

- **irradiação total (H_{TOT})** - irradiância total integrada durante um dia.
- **ponto de máxima potência (P_{MP})**: potência em um ponto da curva característica de um conversor fotovoltaico, onde o produto da corrente (I) pela tensão (V) é máximo, no quadrante de geração;
- **potência de pico (W_P)**: potência nominal de saída de um conversor fotovoltaico, sob as condições padrão de referência para ensaio;
- **eficiência de conversão fotovoltaica (η)**: razão, expressa em porcentagem, entre a potência máxima fornecida e o produto da área do módulo pela irradiância total, para valores preestabelecidos de temperatura;
- **tensão de circuito aberto (V_{OC})**: tensão gerada através de um conversor fotovoltaico sem carga (aberto), para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total.

2.2.2 Células Fotovoltaicas

A geração de energia elétrica através da tecnologia fotovoltaica é dada através de células compostas de material semicondutor, que sofrem o efeito fotovoltaico ao serem expostas à luz.

A célula fotovoltaica é o elemento básico da conversão da energia radiante do sol em energia elétrica, sendo constituída, basicamente, de uma junção entre duas finas camadas de semicondutores com diferentes características. O material semicondutor mais utilizado para fabricação de células fotovoltaicas é o Silício (Si), podendo ainda também ser utilizados outros, como o Germânio, o Telureto de Cádmio (CdTe) e outros compostos relacionados ao Disseleneto de Cobre e Índio (RÜTHER, 2004).

Boyle (2004) exemplifica a geração de corrente em uma célula de silício através das junções dos materiais semicondutores, conforme a figura 12: Uma célula solar de silício consiste de uma fatia de cristal de silício do tipo p com uma camada de cristal de silício do tipo n. Quando um fóton de luz com quantidade adequada de energia, representado pela letra “a”, penetra na célula próximo à junção dos dois tipos de cristais e encontra um átomo de silício, desaloja um de seus elétrons, deixando para trás uma lacuna onde antes havia uma ligação. A energia necessária para promover o elétron da banda de valência para banda de condução é conhecido

como *gap* de energia. O elétron deslocado para banda de condução tende a migrar para a camada de silício do tipo N e, em seguida, para um coletor na superfície frontal da célula, gerando a circulação de uma corrente elétrica no circuito externo. Em seguida, este elétron circula até o coletor na superfície traseira da célula, e reaparece na camada de silício do tipo p, onde ele pode recombinar-se com outras lacunas. Se um fóton com uma quantidade de energia maior do que o *gap* entre as bandas, representado pela letra “b”, atinge um átomo de silício, novamente tem-se a origem de uma lacuna e o excesso de energia é convertido em calor. Um fóton com uma quantidade de energia menor do que o *gap*, representado pela letra “c” irá passar diretamente pela célula, sem gerar nenhuma energia ao longo do caminho. Além disso, alguns fótons, representados pela letra “d”, serão refletidos a partir da superfície frontal da célula, mesmo quando esta possuir um revestimento anti-reflexo, e outros por serem impedidos de penetrar no cristal devido a área ocupada pelo coletor de corrente presente na área frontal da célula.

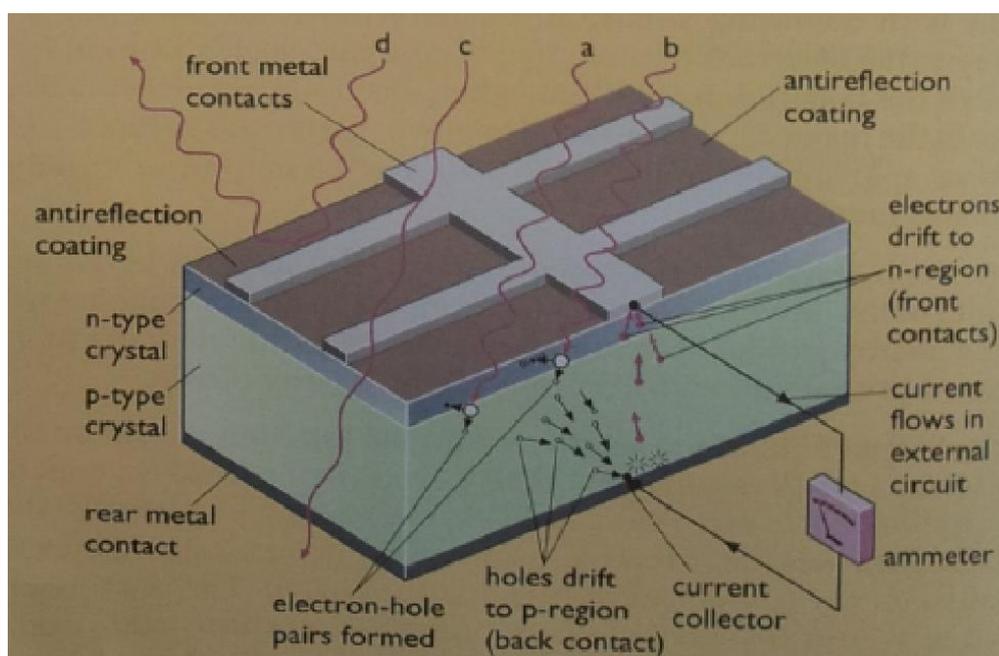


Figura 12 – Detalhes de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Boyle (2004)

Estas células são organizadas e associadas em série ou paralelo, de modo a formar um módulo fotovoltaico, geralmente com potência entre 50 a 240 Watts. Os módulos fotovoltaicos geralmente apresentam tensão de circuito aberto em torno de 20 Volts, pois esta é apropriada para a carga de baterias de 12 Volts, comumente

utilizadas em sistemas isolados. De qualquer forma ainda é possível a combinação dos módulos em série ou paralelo, de modo a se obter os níveis de potência e tensão de projeto (RÜTHER, 2004).

Dentre as tecnologias existentes na fabricação de células fotovoltaicas, destacam-se as baseadas em silício cristalino (c-Si), pois continuam sendo as mais difundidas e utilizadas, além de apresentar melhor relação custo-benefício. Todas as outras tecnologias, que consistem no uso de outro tipo de material semicondutor, são baseadas em películas delgadas, denominados filmes finos. Estes normalmente apresentam menor custo por utilizarem menos material em sua produção, porém, possuem menor eficiência, necessitando de uma área maior para fornecer a mesma potência de um sistema instalado com painéis de c-Si. Portanto, é de se esperar que o c-Si continue liderando dentre as tecnologias fotovoltaicas, já que os países onde estão os maiores mercados destes sistemas possuem limitação quanto à área ocupada, necessitando maior eficiência de conversão solar (RÜTHER, 2004).

Segundo dados da REN21(2011) a produção de módulos baseado em silício cristalino é, atualmente, responsável por 87% do total do mercado mundial de sistemas solares fotovoltaicos. Este tipo de célula pode ser fabricado utilizando silício monocristalino (m-Si) ou policristalino (p-Si). O primeiro tipo de material exige processos rigorosos para sua fabricação, utilizando silício de altíssima pureza e sistemas controlados, de forma a se produzir cristais únicos, com elevado grau de eficiência. Já o p-Si apresenta menor eficiência de conversão, pois utiliza processos mais simples, onde a perfeição cristalina é inferior ao m-Si, formando blocos com grandes quantidades de cristais individuais e em diversas orientações, tendo como vantagem apresentar um menor custo de produção (RÜTHER, 2004). A figura 13 mostra exemplos dos tipos de células de silício cristalino.

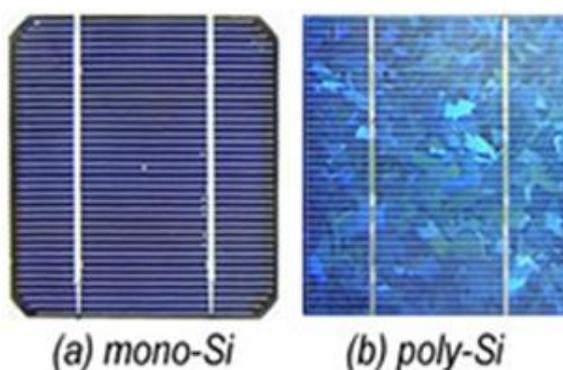


Figura 13 - Tipos de células fotovoltaicas de silício cristalino.

Fonte: CEPEL (2012).

A eficiência das células de silício monocristalino e policristalino situa-se entre 15 a 18% e entre 13 a 15% respectivamente. Já entre as células de filmes finos (silício amorfo e outros materiais), esta eficiência varia entre 5 a 14% (DGS, 2008).

No Brasil, dentre os modelos disponíveis no mercado e testados pelo INMETRO, 96,7% são do tipo silício cristalino (m-Si ou p-Si) e 3,3% de filmes finos, sendo que a primeira tecnologia apresenta média de eficiência próxima de 14% enquanto a segunda próxima de 7% (INMETRO, 2012).

2.2.3 Inversores

Segundo Urbanetz (2010), o inversor é o equipamento de um sistema fotovoltaico responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC), gerada através dos módulos FV, em energia de corrente alternada (CA) disponibilizando-a para as cargas. Dependendo do tipo de sistema FV, isolado ou conectado à rede elétrica, diferentes tipos de inversores são especificados para utilização.

Em sistemas isolados, normalmente o inversor recebe a energia em CC proveniente dos módulos fotovoltaicos, acumulada através de um banco de baterias e produz em sua saída uma onda senoidal de forma independente, sem referência externa de tensão.

Já em SFCR's a energia CA de saída é interligada em paralelo com a rede elétrica pública. Deste modo é essencial que as duas ondas de tensão estejam em fase e que as características destas sejam similares para possibilitar o paralelismo de geradores. Portanto este tipo de inversor utiliza a rede elétrica como referência de fase. Caso essa referência seja perdida este inversor deve ser desligado automaticamente, evitando assim o fenômeno de "ilhamento", que ocorre quando parte da rede é desconectada, mas continua energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a ela, formando um subsistema isolado. Este fenômeno é preocupante, pois afeta a segurança da rede oferecendo risco de acidentes a pessoas e de danos a equipamentos (URBANETZ, 2010).

Basicamente, os inversores podem ser utilizados em um SFCR em quatro tipos de configurações, conforme mostrado na figura 14 (URBANETZ, 2010).

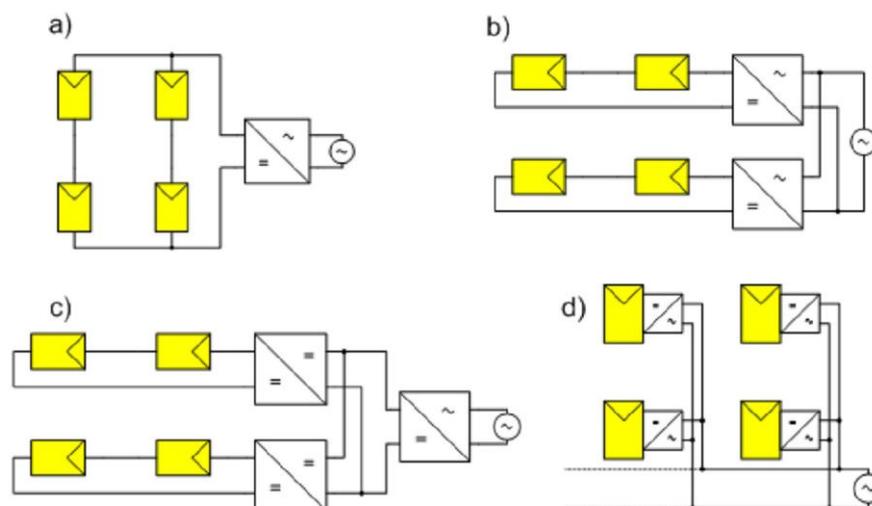


Figura 14 – Configurações de SFCR

Fonte: Urbanetz (2010)

A Figura 14a apresenta a configuração chamada de inversor central, onde séries de módulos são conectadas em paralelos e interligadas a um mesmo inversor. A principal vantagem dessa configuração é a redução de custos, enquanto que a desvantagem está na baixa confiabilidade do sistema, pois toda a instalação fica comprometida no caso de falhas no inversor.

A Figura 14b apresenta a configuração tipo *string*, em que cada série de módulos é interligada a um inversor. Essa configuração elimina ligações em paralelo, diminui as perdas ocasionadas por sombreamento, permitindo um aumento da eficiência energética e da confiabilidade do sistema. A desvantagem é o aumento dos custos pela utilização de um maior número de inversores de menor potência.

A Figura 14c apresenta a configuração em *multi-string*, onde cada *string* possui um conversor CC/CC conectado ao inversor. Essa configuração soma as vantagens das anteriores, pois permite o controle individual da tensão de operação de cada série FV em apenas um módulo inversor.

A figura 14d apresenta a configuração de módulo C.A., onde cada módulo FV possui um inversor acoplado, buscando, dessa forma, o melhor ponto de operação de cada módulo individualmente. Tem a desvantagem de apresentar alto custo e de acoplar dois dispositivos com vida útil incompatíveis.

2.3 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas FV podem ser classificados em sistemas isolados ou em sistemas conectados à rede.

2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

A figura 15 mostra uma instalação de um sistema fotovoltaico isolado. Os sistemas isolados (SFI) ou autônomos normalmente são instalados em locais sem acesso à rede elétrica, sejam por questões técnicas, ambientais ou comerciais. É composto basicamente por um painel fotovoltaico, um inversor, elementos de proteção, um controlador de carga e um banco de baterias. Geralmente este sistema atende as necessidades básicas de uma instalação ou de uma comunidade, incluindo a iluminação pública, serviços de telecomunicações, refrigeração, bombeamento de água e sinalização (BOYLE, 2004).



Figura 15 - SFI da COELBA – Bahia – Programa Luz para Todos.

Fonte: Kyocera (2012).

Segundo Shayani (2006), este tipo de sistema opera de forma totalmente independente da rede elétrica pública. Alguns dos exemplos de aplicação são apresentados a seguir:

- Eletrificação de comunidades em áreas remotas;
- Postos de saúde em áreas remotas;
- Estações repetidoras de rádio microondas;
- Eletrificação de residências de veraneio;
- Monitoração de sistemas de qualidade de água e meio ambiente;
- Sistemas de navegação e boias oceânicas;
- Sistemas de bombeamento de água;
- Sistemas de proteção catódica;
- Dessanilização de água;
- Veículos de recreação;
- Sistemas de sinalização.

2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica

Um SFCR é basicamente composto de um painel de módulos fotovoltaicos, que convertem a energia do sol em energia elétrica em corrente contínua, e um inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada, com tensão e frequência compatíveis com a rede.

Os SFCRs podem ser vistos com uma forma de geração distribuída, pois contribuem com a disponibilidade de energia junto aos consumidores conectados à rede elétrica. Este sistema dispensa o uso de banco de baterias, pois a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é consumida diretamente pelas cargas locais e o excedente é absorvido pela rede, de modo que esta atue como uma gigantesca bateria, disponibilizando-a para outros consumidores e reduzindo a geração nas fontes convencionais de energia (BOYLE, 2004), no caso do Brasil, as usinas hidroelétricas e as termelétricas. Já quando o gerador solar produz menos energia do que a demanda necessária para suprir os consumidores locais, o déficit é suprido pela rede elétrica da concessionária.

Segundo Rüther (2004), as instalações solares fotovoltaicas interligadas à rede elétrica pública podem ser classificadas em dois tipos de acordo com o modo em que são instaladas:

- de forma integrada a uma edificação: geralmente instalada no telhado ou fachada de um prédio, junto ao consumidor.

- de forma centralizada: como em uma usina convencional, onde se têm potências maiores, centralizadas em locais afastados dos consumidores.

A instalação existente no Escritório Verde da UTFPR   do primeiro tipo. Esta forma de instalação destaca-se por oferecer as seguintes vantagens:

- eliminação de perdas e de altos custos em sistemas de transmissão e de distribuição;

- instalação junto ao meio urbano, próximo aos consumidores, sem a necessidade de ocupação de grandes áreas livres descobertas;

- baixo custo com infraestruturas adicionais, podendo também ser utilizado como material de revestimento arquitet nico.

2.4 LEGISLAÇÃO

No dia 17 de Abril de 2012 a ANEEL criou, através da Resolução Normativa N  482, a regulamentac o necessária estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgeração (menores do que 100kWp) e minigeração (entre 100kWp e 1MWp) distribuída aos sistemas de distribuição de energia e o sistema de compensação de energia elétrica.

Desta forma, investidores nas tecnologias de micro hidroelétricas, micro aerogeradores e de módulos fotovoltaicos podem injetar o excedente de energia na rede elétrica da concessionária sem remuneração, porém com o benefício do sistema de compensação de energia elétrica. Neste sistema existe o acúmulo de créditos que podem ser utilizados, através do consumo de energia ativa da concessionária, em qualquer horário, sendo observada a relação entre os valores das tarifas, caso estas existam, em um prazo de até 36 meses, caso contrário estes expirarão.

O sistema de compensação seguir  os seguintes procedimentos, segundo a Resolução:

I - deverá ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A, conforme o caso.

II - o consumo a ser faturado, referente à energia elétrica ativa, é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto horário, quando for o caso, devendo a distribuidora utilizar o excedente que não tenha sido compensado no ciclo de faturamento corrente para abater o consumo medido em meses subsequentes.

III - caso a energia ativa injetada em um determinado posto horário seja superior à energia ativa consumida, a diferença deverá ser utilizada, preferencialmente, para compensação em outros postos horários dentro do mesmo ciclo de faturamento, devendo, ainda, ser observada a relação entre os valores das tarifas de energia, se houver.

IV - os montantes de energia ativa injetada que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão ser utilizados para compensar o consumo de outras unidades previamente cadastradas para este fim e atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo da unidade com sistema de compensação de energia elétrica, ou cujas unidades consumidoras forem reunidas por comunhão de interesses de fato ou de direito.

V - o consumidor deverá definir a ordem de prioridade das unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica.

VI - os créditos de energia ativa gerada por meio do sistema de compensação de energia elétrica expirarão 36 (trinta e seis) meses após a data do faturamento, não fazendo jus o consumidor a qualquer forma de compensação após o seu vencimento, e serão revertidos em prol da modicidade tarifária.

VII - a fatura deverá conter a informação de eventual saldo positivo de energia ativa para o ciclo subsequente, em quilowatt-hora (kWh), por posto horário, quando for o caso, e também o total de créditos que expirarão no próximo ciclo.

VIII - os montantes líquidos apurados no sistema de compensação de energia serão considerados no cálculo da sobrecontratação de energia para efeitos tarifários, sem reflexos na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, devendo ser registrados contabilmente, pela distribuidora, conforme disposto no Manual de Contabilidade do Serviço Público de Energia Elétrica. (ANEEL,2012)

Esta regulamentação favorece principalmente a tecnologia fotovoltaica, pois a micro e minigeração através de SFCR's integrados à edificação, aproveitando áreas ociosas dos telhados, é a que possui maior e melhor disponibilidade junto aos consumidores, sem que haja maiores intervenções ao meio ambiente. Como os sistemas fotovoltaicos geram energia apenas durante as horas de sol, os créditos poderão ser utilizados nos períodos de pouca insolação ou à noite.

2.5 DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os estudos e avaliações de desempenho dos sistemas fotovoltaicos são fundamentais para que seja mantido o desenvolvimento contínuo da tecnologia e da indústria fotovoltaica. Para os fabricantes, estes são referenciais de qualidade dos produtos existentes. Para o setor de pesquisa e desenvolvimento de produtos, são medidas importantes para ajudar a identificar necessidades futuras. E para o investidor, são essenciais para definição das expectativas do retorno econômico que será alcançado.

Como a indústria na área fotovoltaica tem crescido ano após ano, surgiu a necessidade da criação e divulgação de parâmetros adequados de desempenho dos sistemas, permitindo a detecção de problemas operacionais ou de projeto, e a comparação de sistemas diferentes no que diz respeito a *design*, tipo de tecnologia utilizada e localização geográfica. A adoção de métodos padronizados de avaliação e classificação reflete na maior credibilidade para tecnologia FV, contribuindo com o seu desenvolvimento.

No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), através da Portaria número 004/2011, estabelece os critérios para a avaliação da conformidade de sistemas e equipamentos para a energia fotovoltaica. Através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), os produtos avaliados e aprovados têm a autorização de ostentar a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que tem por objetivo informar a eficiência energética e o desempenho dos sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica. Portanto, os equipamentos disponíveis no mercado nacional devem ser submetidos a testes padronizados no Brasil, já que o INMETRO não aceita relatórios emitidos no exterior. Após os ensaios do módulo fotovoltaico ou de outros equipamentos nas condições padrão, é emitida a ENCE, conforme exemplo da figura 16, com a letra correspondente à eficiência conforme a classificação indicada na tabela 2.

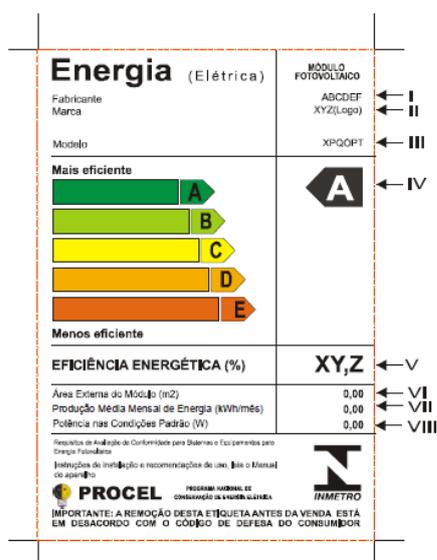


Figura 16 – Modelo ENCE para módulo fotovoltaico.

Fonte: INMETRO (2012).

Tabela 2– Classe de Eficiência de Módulos Fotovoltaicos

Classe de Eficiência Energética	
Silício Cristalino (m-Si ou p-Si)	Filmes Finos
A > 13,5%	A > 9,5%
13% < B ≤ 13,5%	7,5% < B ≤ 9,5%
12% < C ≤ 13%	6,5% < C ≤ 7,5%
11% < D ≤ 12%	5% < D ≤ 6,5%
E < 11%	E < 5%

Fonte : Adaptado de INMETRO (2011).

A geração anual de energia que pode ser produzida por um sistema fotovoltaico depende da quantidade total de radiação solar disponível na posição geográfica da instalação. Este número pode ser estimado através de dados meteorológicos, que informam a irradiação, em kWh/m², em uma superfície horizontal, das estações meteorológicas mais próximas ao sistema.

Alguns dos fatores que podem influenciar na geração de um SFCR são:

- A localização, orientação e a inclinação do painel fotovoltaico;
- O clima local;
- A potência de pico dos módulos fotovoltaicos;
- A eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos;
- A variação de eficiência dos módulos em função de sua temperatura;
- A distribuição espectral da radiação que atinge o painel e a sua resposta aos diferentes comprimentos de onda;

- A eficiência do inversor utilizado;
- Perdas entre as conexões do SFCR e os consumidores.

2.5.1 Posicionamento do Painel Fotovoltaico

Os principais parâmetros que afetam o rendimento de um sistema fotovoltaico são a localização geográfica, a inclinação e a orientação do painel, sendo que os efeitos destes dependem da razão entre a radiação direta e difusa do local, bem como da fração de albedo, que é característica do ambiente que circunda a instalação. Normalmente o valor da inclinação ótima, com relação à horizontal, para que se tenha a máxima incidência solar em regime anual, é dado pela latitude local, com orientação da superfície voltada para o equador (RÜTHER, 2006).

Curitiba está posicionada a 25 graus de latitude. A figura 17 demonstra a participação das diferentes componentes de radiação, direta e difusa, na média diária de irradiação solar ao longo do mês em um painel instalado com orientação para o norte geográfico e inclinação de 25 graus. Percebe-se também a influência da inclinação do painel em relação ao modelo horizontal, onde se tem uma irradiação mais constante e equilibrada ao longo do ano quando a 25 graus.

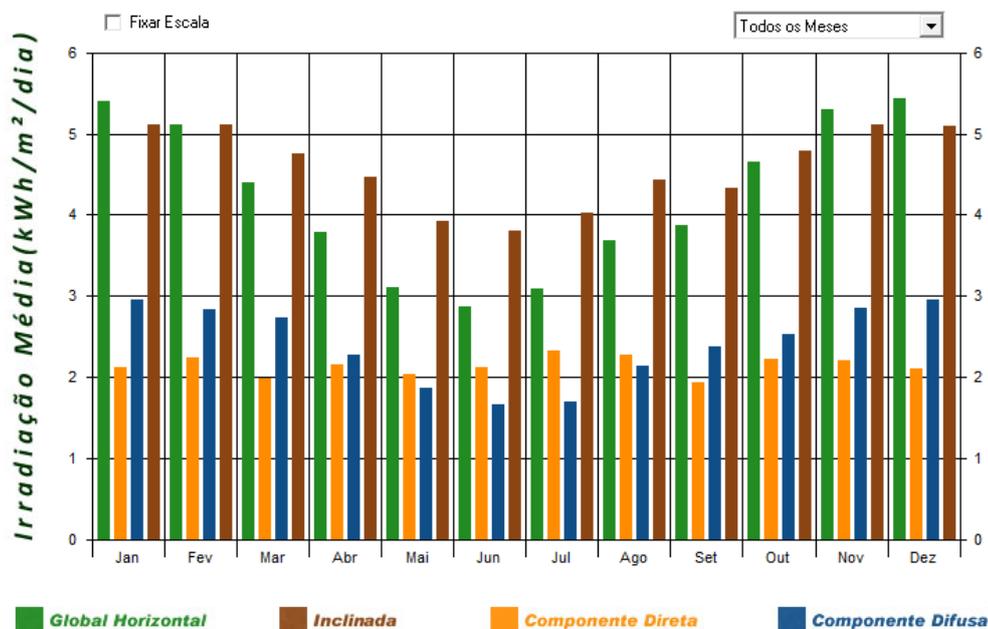


Figura 17 – Média mensal de irradiação solar diária em Curitiba.

Fonte: Software RADIASOL 2 - UFRGS (2010)

Um raio solar pode ser decomposto em duas componentes: perpendicular ao painel e alinhada com ele conforme figura 18, onde θ indica o ângulo de incidência dos raios solares diretos.

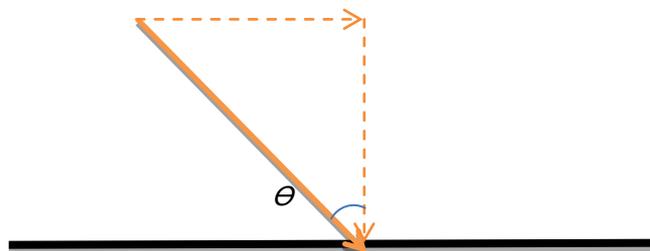


Figura 18 – Ângulo de incidência de um raio solar

Fonte: Autoria Própria

A parcela que é efetivamente convertida em energia é somente a componente perpendicular ao plano, portanto quanto menor o ângulo de incidência, maior é o aproveitamento.

No caso de sistemas fixos utilizando a inclinação igual à latitude e orientação para o equador, o ângulo médio anual de incidência é de $13,5^\circ$, independente da localização geográfica onde o painel fotovoltaico foi instalado. (SHAYANI, 2006).

A figura 19 ilustra a razão para que isso ocorra.

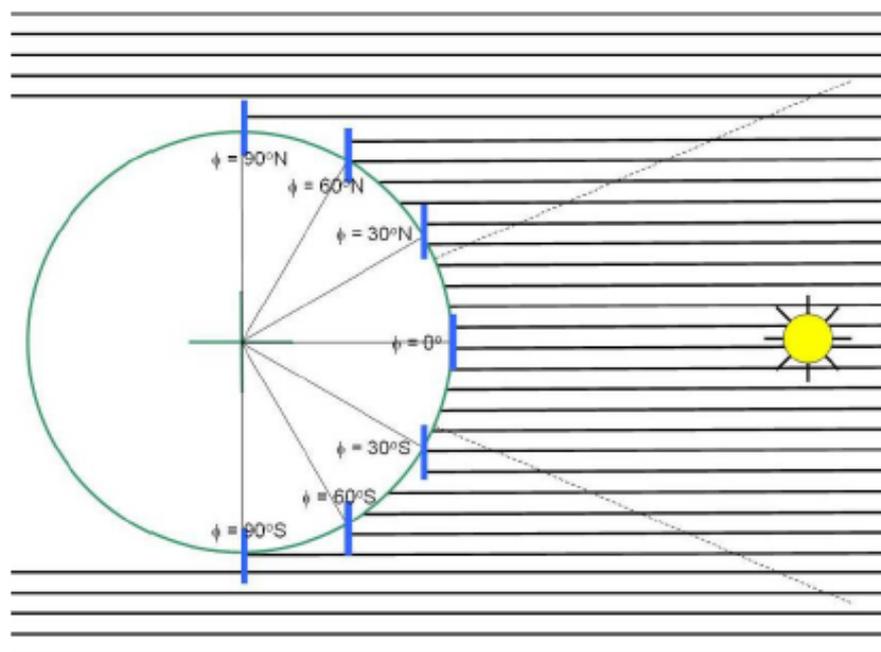


Figura 19 – Posicionamento de painéis fotovoltaico com inclinação da superfície igual à latitude.

Fonte: Shayani (2006).

Sistemas fotovoltaicos que utilizam rastreador solar, permitem que a incidência dos raios do sol seja sempre perpendicular ao plano do painel. Shayani (2006) demonstra que em uma situação ideal, de um sistema rastreador de sol extraterrestre no sentido leste-oeste, o aproveitamento de um painel solar seria 57% maior quando comparado com um sistema fixo. Entretanto, em um sistema real, instalado na superfície terrestre, os efeitos da atenuação da intensidade dos raios solares, devido à massa de ar pelo qual os raios solares atravessam, fazem com que este aproveitamento seja menor.

A figura 20 apresenta os valores de irradiância diária, para painéis fixos horizontais e com rastreador solar, e considerando, ou não, o fator de atenuação devido à massa de ar.

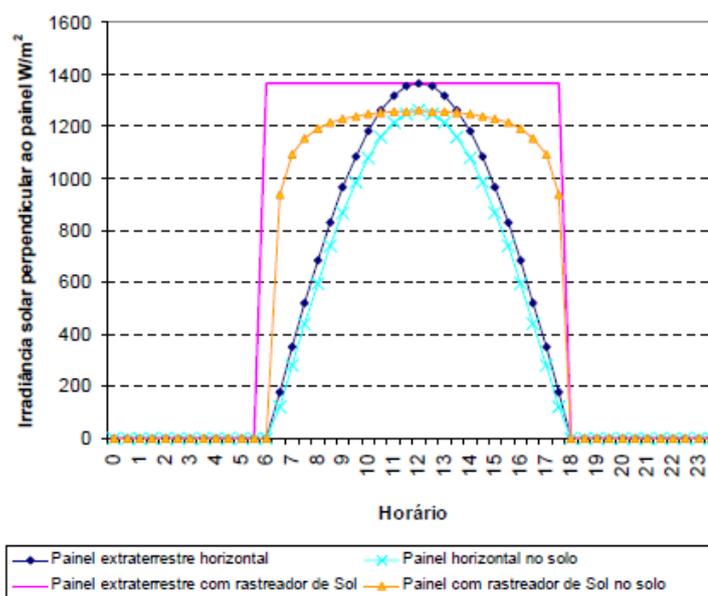


Figura 20 – Irradiância solar para sistemas fixos e com rastreador de sol.

Fonte: Shayani (2006).

Segundo Shayani (2006), considerando as atenuações da atmosfera, o uso de rastreador de sol leste-oeste apresenta a vantagem teórica de aumentar em até 48% a capacidade de aproveitamento dos raios solares para conversão em energia em dias sem nuvens. Porém, a tecnologia fotovoltaica se destaca pelo fato de possuir grande robustez associada aos painéis fotovoltaicos e sua reduzida manutenção. Portanto, o alto custo, sua manutenção e a diminuição na confiabilidade da instalação pelo risco de falhas, devem ser levados em consideração na verificação da viabilidade técnica e econômica do uso de um sistema de rastreamento solar. A figura 21 mostra um sistema com rastreador solar.



Figura 21 – Painel fotovoltaico com sistema de rastreamento solar.

Fonte: GM (2011).

2.5.2 Perdas nos SFCR

2.5.2.1 Temperatura das células FV

Com a elevação da temperatura das células fotovoltaicas, ocorre uma significativa redução na tensão e um mínimo aumento na corrente fotogerada, resultando na diminuição da potência fornecida pelo sistema. Esse efeito é acentuado durante o verão e se agrava quando a instalação encontra-se em edificações onde possa haver redução na ventilação do painel. Normalmente a potência do gerador FV utilizando tecnologia silício cristalina decai entre 0,3 e 0,4 % a cada 1°C acima da temperatura padrão de testes dos módulos FV de 25°C. (ALMEIDA, 2012).

2.5.2.2 Descasamento espectral

Segundo Almeida (2012), o espectro da radiação solar em condições de campo é predominantemente diferente do espectro de referência de forma que podem ser relatadas perdas de até 4% em dias nublados para módulos FV de silício cristalino.

2.5.2.3 Degradação das células FV

Essa inevitável perda é causada pela degradação das células e dos materiais utilizados no revestimento dos módulos fotovoltaicos e contribui para a redução gradual do desempenho ao longo dos anos. Estima-se um decaimento médio anual de 0,8% a 0,9% para células de silício cristalino (MARION, ADELSTEIN, *et al.*, 2005).

2.5.2.4 Sombreamento parcial

Durante o período de operação, um painel FV pode estar sujeito a fontes previsíveis de sombreamento, como árvores, construções e antenas, e imprevisíveis, como dejetos de pássaros e folhas caídas. O sombreamento parcial de painéis fotovoltaicos é um problema grave, pois além de reduzir drasticamente a produção de energia também compromete a integridade do sistema, sendo muito comum no início do dia ou no final da tarde, quando o sol está mais baixo, facilitando que construções próximas à instalação o sombreiem.

O percentual da perda de energia é maior do que a porcentagem de área sombreada, de modo que, em sistemas de pequeno porte, com poucas conexões em paralelo, uma única folha pode causar uma drástica redução da potência de saída do sistema, eventualmente resultando em falhas. Células FV sombreadas em série com células FV iluminadas causam o bloqueio da corrente e tendem a se polarizar reversamente, transformando-as em cargas, ocasionando perdas e pontos quentes devido à potência ser dissipada na forma de calor (ALMEIDA, 2012).

O acúmulo de sujeira sobre um painel FV, advindo de partículas em suspensão nos grandes centros urbanos e beira de estradas, de pequenas folhas e galhos, neve, entre outros, também reduz a quantidade de irradiação disponível. Essa fonte de perdas está relacionada com o sombreamento, porém, normalmente é um fenômeno que ocorre de forma mais homogênea em toda a superfície do painel, sendo menos agressivo que o sombreamento parcial. Segundo Almeida (2012), a manutenção de limpeza dos módulos é uma medida simples, que evita esse tipo de perda, que pode variar bastante, chegando a até mais de 25%.

2.5.2.5 Eficiência dos inversores

Em sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser responsáveis por uma grande parcela das perdas. Mesmo inversores modernos, que apresentam elevada eficiência em uma grande faixa de operação, apresentam baixo rendimento quando operam com frações pequenas da potência nominal. A figura 22 mostra as curvas características de eficiência em função da carga de vários modelos de inversores.

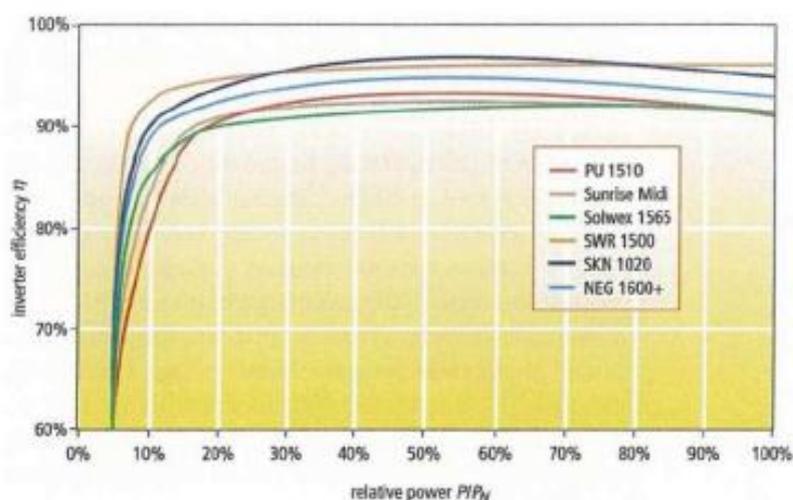


Figura 22 – Curvas características de vários modelos de inversores.

Fonte: DGS (2008)

Em dias com pouca disponibilidade de recurso solar, a potência em corrente contínua na entrada do inversor é pequena, fazendo com que ele opere quase sempre na faixa de baixo rendimento. Além disso, há a possibilidade de os inversores não injetarem energia na rede, pois necessitam de uma tensão em corrente contínua mínima para operarem, e essa tensão corresponde a uma irradiância mínima que pode não ser atingida em alguns momentos.

Os módulos fotovoltaicos possuem uma região de operação denominada ponto de máxima potência (P_{MP}), onde a potência, produto da tensão x corrente, apresenta máximo valor, conforme mostrado na figura 23. Esse valor varia continuamente em função da irradiância e da temperatura do módulo afetando no rendimento dos inversores. Nos inversores utilizados em SFCR, normalmente vem implementada a função de busca do P_{MP} , que através de conversores CC/CC permitem variar a tensão de operação vinda do painel FV, melhorando o desempenho do sistema (URBANETZ, 2010).

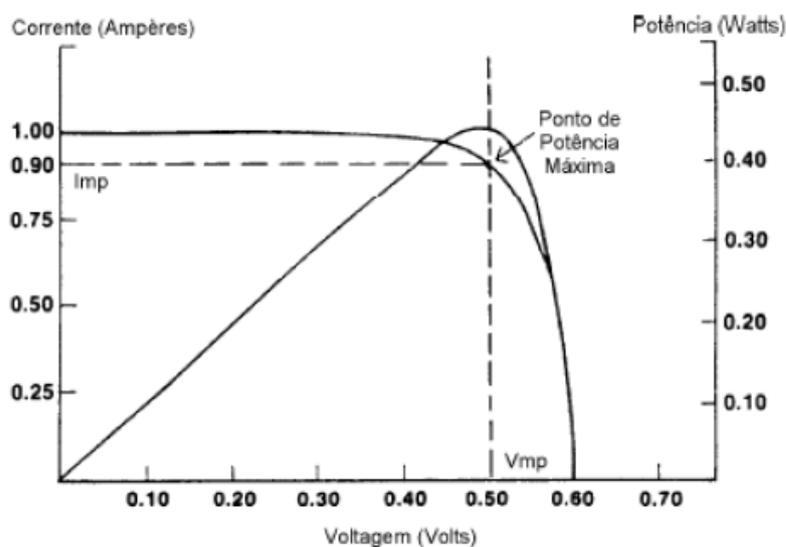


Figura 23 - Características típicas das curvas $I \times V$ e $P \times V$ de uma célula fotovoltaica.

Fonte: CRESESB (1994).

2.5.2.5.1 Limitação de potência pelo inversor

Nos projetos de sistemas fotovoltaicos comumente é utilizado um fator de dimensionamento de inversores (FDI) menor que a unidade, significando que o inversor possui uma potência nominal menor que a do arranjo fotovoltaico. Quando bem calculado pode permitir a redução das perdas relativas à baixa irradiância, quando o sistema opera fora do ponto de máxima potência, melhorando a produtividade. Entretanto, a potência de entrada do inversor ficará limitada, impedindo o aproveitamento de toda energia que o sistema FV poderia oferecer quando em condições de elevada irradiância. Dessa forma, é importante encontrar o balanço adequado entre perda por limitação e ganho de produtividade (ALMEIDA, 2012).

2.5.2.5.2 Perdas devido à rede da concessionária

Os inversores possuem faixas de tensão, frequência e impedância em que operam conectados à rede. Falhas ou anormalidades na tensão de referência, da rede da concessionária, podem resultar em desligamentos constantes do inversor,

reduzindo o desempenho do sistema fotovoltaico. Portanto, a qualidade da energia no ponto de conexão do inversor é de vital importância para o correto funcionamento do SFCR (URBANETZ, 2010).

2.5.2.6 Disponibilidade do sistema

Além do recurso solar, a disponibilidade de um sistema fotovoltaico injetar energia na rede elétrica depende de outros fatores, como paradas para manutenção preventiva e de falhas. Normalmente uma instalação fotovoltaica necessita de muito pouca manutenção devido à robustez de seus componentes.

2.5.3 Índices de Mérito Utilizados na Avaliação de um SFCR

Índices de Mérito, também conhecidos como figuras de mérito ou índices de desempenho, são fórmulas algébricas que combinam parâmetros de materiais ou equipamentos e que, quando maximizadas, aperfeiçoam algum aspecto de desempenho. Sua fórmula algébrica geralmente expressa uma relação entre duas características e/ou propriedades.

Segundo Benedito (2009), três destes parâmetros de performance, podem ser usados para definir a eficiência global de um sistema fotovoltaico conectado à rede, no que diz respeito ao aproveitamento da radiação solar, produção de energia e efeitos das perdas do sistema. Estes parâmetros são respectivamente: fator de capacidade (C_F), produtividade anual (Y_F ou Final Yield) e desempenho global (P_R ou Performance Ratio).

A análise destes índices de mérito permite a comparação do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica operando com diferentes configurações e tecnologias e em diferentes localidades. Deste modo, é possível avaliar se um sistema fotovoltaico opera de forma otimizada, ou se pode ser reconfigurado de modo a maximizar sua eficiência (BENEDITO, 2009).

2.5.3.1 Fator de capacidade de um SFCR

Este índice representa a razão entre a energia real entregue pelo sistema e a energia que seria entregue caso se operasse na potência nominal de forma contínua, 24 horas por dia durante o ano inteiro. Este índice geralmente é apresentado em percentual e é muito utilizado para comparar a capacidade de geração de diferentes tipos de fontes de energia. (BENEDITO, 2009).

$$C_F = \frac{\int_0^T P(t)dt}{\int_0^T P_N dt}$$

onde:

$P(t)$ representa a potência entregue pelo sistema no instante t , em kW;

P_N representa a potência nominal do sistema, em kW;

T representa o período de integração (geralmente um ano, 8.760 horas).

Esta equação pode ser simplificada da seguinte forma:

$$C_F = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV} * 24 * \text{dias}}$$

Sistemas fotovoltaicos possuem fatores de capacidade relativamente baixos se comparados com outros sistemas de geração de energia elétrica. Isto ocorre devido à própria natureza do recurso solar, que é intermitente devido ao movimento da Terra em relação ao sol e às variações climáticas. A figura 24 apresenta a média do C_F de sistemas que utilizam outras fontes de energia.

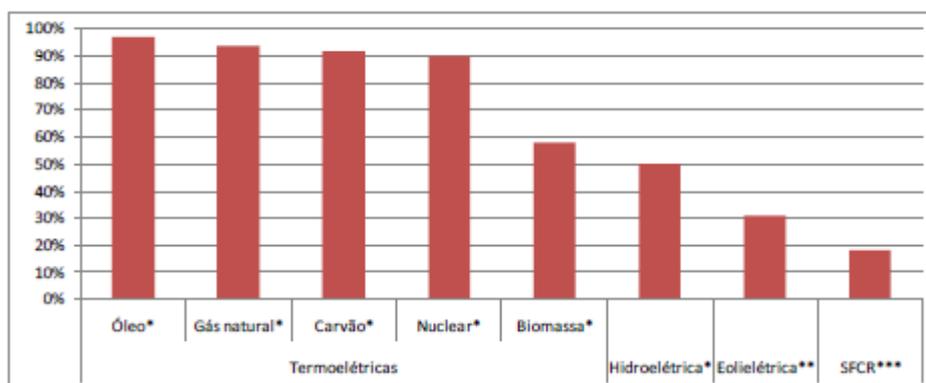


Figura 24 – Fator de Capacidade de diferentes fontes.

Fonte: Almeida(2012).

No caso dos SFCR brasileiros, o C_F normalmente está entre 13% e 18%, variando de acordo com a disponibilidade do recurso solar e do tipo de tecnologia e de dimensionamento adotados (BENEDITO, 2009).

Em sua dissertação de mestrado, Benedito (2009) cita estudos em outros sistemas fotovoltaicos conectados à rede em operação no país, apresentando os valores médios de C_F no regime anual. A tabela 3 apresenta os índices apresentados em algumas destas instalações.

Tabela 3 – Fator de Capacidade em SFCR instalados no Brasil.

Instalação	Fator de Capacidade [%]
UFSC - Prédio de Engenharia Mecânica (2,0kWp)	14,0
UFSC - Centro de Cultura e Eventos (10,24kWp)	16,0
UFRGS - Laboratório de Energia Solar (4,8kWp)	13,8
USP - Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (0,750kWp)	16,8
IEE - USP - Prédio da Administração (12,3kWp)	12,5
IEE-USP - Estacionamento 3,0kWp	12,3
UFPA - GEDAE (1,58kWp)	14,8
Fundição Estrela - São Bernardo do Campo - SP (14,7kWp)	12,5
Motor-Z - São Bernardo do Campo - SP (2,5kWp)	15,0

Fonte: Adaptado de Benedito (2009).

2.5.3.2 Produtividade Anual de um SFCR

O índice de Produtividade Anual (Y_F ou *Final Yield*) de um SFCR é encontrado através da divisão entre a potência entregue dividida pela potência instalada do sistema fotovoltaico. Ele representa qual a produção anual, em kWh para cada kWp instalado. Este parâmetro também indica o número de horas que o sistema deveria operar, em carga nominal, para prover a energia entregue no período de um ano (BENEDITO, 2009).

$$Y_F = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_N}$$

onde:

$P(t)$ representa a potência entregue pelo sistema no instante t , em kW;

P_N representa a potência nominal do sistema, em kWp;

T representa o período de integração (8.760 horas).

Simplificando a equação obtém-se:

$$Y_F = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV}}$$

O Y_F é calculado dividindo-se o total de energia gerada, registrada através de um medidor, em kWh, pela potência DC equivalente a soma das potências de cada módulo fotovoltaico instalado no painel. Como esta potência é definida nas condições padrões de ensaio, onde se tem a incidência de 1000W/m^2 de irradiância e o controle de temperatura das células em 25°C , a equação de Y_F oferece a vantagem de relacionar a potência AC entregue ao sistema com uma condição padrão, permitindo a comparação de outros sistemas, com relação à eficiência de conversão DC para AC ou de diferentes configurações e ambientes de montagem, onde teremos variação na temperatura dos módulos fotovoltaicos (MARION, ADELSTEIN, *et al.*, 2005).

A tabela 4 indica valores de índices de produtividade em instalações no Brasil.

Tabela 4 – Índice de produtividade em SFCR instalados no Brasil.

Instalação	Yield [kWh/kWp]
UFSC – Prédio de engenharia mecânica 2,0kWp	1259
UFSC – Centro de Cultura e Eventos 10,24kWp	1365
UFRGS – Laboratório de Energia Solar 4,8kWp	1205
USP – Laboratório de sistemas fotovoltaicos 0,750kWp	1429
IEE-USP – Prédio da Administração 12,3kWp	1090
IEE-USP – Estacionamento 3,0kWp	883
UFPA – GEDAE 1,58kWp	1296
Tractebel – Florianópolis	1200
Fundição Estrela – São Bernardo do Campo - SP 14,7kWp	910
Motor-Z – São Bernardo do Campo - 2,5kWp	1080

Fonte: Adaptado de Benedito (2009).

2.5.3.3 Desempenho Global de um SFCR

O índice de Desempenho Global (P_R ou *Performance Ratio*) é muito útil, pois ele quantifica as perdas globais ocorridas no sistema devido à ineficiência do inversor, às perdas na fiação, incompatibilidades na conversão DC para AC, aos

componentes de proteção, temperatura dos módulos, instalação incorreta do painel, sujeira e eventuais desligamentos. Este índice de mérito representa a real capacidade do sistema em converter a energia solar disponível no plano dos painéis em eletricidade, pois é a razão entre a energia entregue pelo sistema e a energia que esteve disponível no plano considerado (MARION, ADELSTEIN, *et al.*, 2005).

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R}$$

Onde Y_R representa a produtividade de referência do sistema em função da radiação solar incidente, que por sua vez dependerá da localização e orientação do painel e da variação do clima no local.

$$Y_R = \frac{H_t}{G_{ref}}$$

Onde:

H_t representa a irradiação 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 1000W/m².

O desempenho global é um valor adimensional que indica o efeito global das perdas na saída nominal. Sozinho, este número não permite a verificação da real capacidade de energia a ser produzida, pois um sistema com um índice P_R baixo em um local com altos recursos de energia solar pode produzir mais energia do que um sistema com um P_R alto em um local de baixo recurso solar.

Valores de desempenho global são úteis para determinar se o sistema está funcionando conforme o esperado e para identificar a ocorrência de problemas operacionais, como falhas ou defeitos no inversor, atuações de disjuntor, falhas em soldas e conexões, falhas de diodo, sombreamento, neve, sujeira, degradação do sistema fotovoltaico ao longo do tempo, entre outras falhas.

Quedas abruptas nos índices de P_R podem indicar ocorrências significativas impactando no desempenho do sistema, tais como inversores não operacionais ou atuação de proteção. Já pequenas diminuições ao longo do tempo no P_R , podem indicar a existência de problemas menos graves, como, por exemplo, o acúmulo de

poeira. Normalmente os valores de P_R são demonstrados em intervalos de meses ou anos, sendo que intervalos menores podem ser úteis para identificar ocorrências ou falhas nos componentes do SFCR. Devido às perdas por temperatura dos módulos serem um dos fatores que mais influenciam na eficiência do sistema, os valores de P_R tendem a serem maiores no inverno do que no verão (MARION, ADELSTEIN, *et al.*, 2005).

A tabela 5 apresenta valores típicos de alguns fatores de perdas em um SFCR que podem reduzir o índice de desempenho global.

Tabela 5 – Fatores de perdas em um SFCR com tecnologia cristalina.

Fatores	Valores Típicos	Intervalo
Potência nominal especificada pelo fabricante	1,00	0,85 – 1,05
Degradação inicial induzida pela luz	0,98	0,90 – 0,99
Perdas nos diodos e conexões	1,00	0,99 – 0,997
Perdas no inversor	0,96	0,93 - 0,96
Poeira	0,95	0,75 - 0,98
Sombras	1,00	0,0 - 1,00

Fonte: Adaptado de VERA e KRENZINGER (2011).

Segundo Benedito (2009), em sua metodologia para estimativa de custo de geração a partir de um SFCR, o valor de 75% para o desempenho global demonstra-se razoável, tendo em vista o desempenho de sistemas pré-existentes descritos na literatura.

3. DESEMPENHO DO SFCR DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR

3.1 O ESCRITÓRIO VERDE

O Escritório Verde, mostrado na figura 25, é um setor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) localizado no Campus Central, com o intuito de desenvolver a política de sustentabilidade, unindo pesquisadores, estudantes e servidores administrativos através da implantação de programas que reduzam o impacto ambiental das atividades acadêmicas, servindo como referência a outras instituições de ensino e a empresas. Inaugurado em dezembro de 2011 e localizado na Avenida Silva Jardim, 807, a sede do Escritório verde está erguido dentro dos princípios da construção sustentável, em uma parceria com mais de sessenta empresas, tendo como proposta, ser um laboratório “vivo”, aberto ao público para demonstração da eficiência ambiental dos produtos e tecnologias empregadas em sua construção.



Figura 25 – Fachada do Escritório Verde da UTFPR

Além do emprego otimizado da luz solar e de lâmpadas de LED's, o projeto contempla a utilização da geração fotovoltaica como principal provedor de energia elétrica à edificação em conjunto com a concessionária.

3.2 O SFCR DO EV

Os módulos da Kyocera KD210GX instalados no escritório verde, conforme figura 26, são do tipo silício policristalino e possuem tensão de circuito aberto de 33,2V, sendo que o painel é formado através da associação em série dos 10 módulos para entregar a potência na tensão e corrente de projeto. A tabela 6 e as figuras 27 e 28 indicam as características elétricas e físicas destes módulos.



Figura 26 – Painel Fotovoltaico Instalado no EV.

Tabela 6 - Características do Módulo KD210GX em condição padrão de teste (STC)

Potência Máxima	210W
Tensão de Máxima Potência	26,6V
Corrente de Máxima Potência	7,90A
Tensão de Circuito Aberto	33,2V
Corrente de Curto-circuito	8,58A
Tensão Máxima do Sistema	600V
Coeficiente de Temperatura da Voc	-0,120V/°C
Coeficiente de Temperatura da Isc	$5,15 \times 10^{-3} \text{A}/^{\circ}\text{C}$
Número de Células por Módulo	54
Comprimento X Largura X Espessura	1500mmx990mmx46mm
Peso	18kg
Temperatura de Operação	-40°C até 90°C

Fonte: Kyocera (2012)

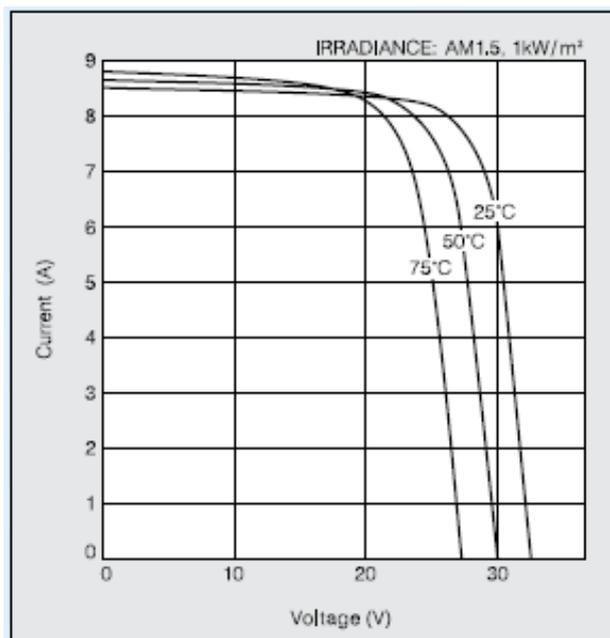


Figura 27 – Comportamento da relação IxV do módulo KD210GX em diferentes temperaturas.

Fonte: Kyocera (2012).

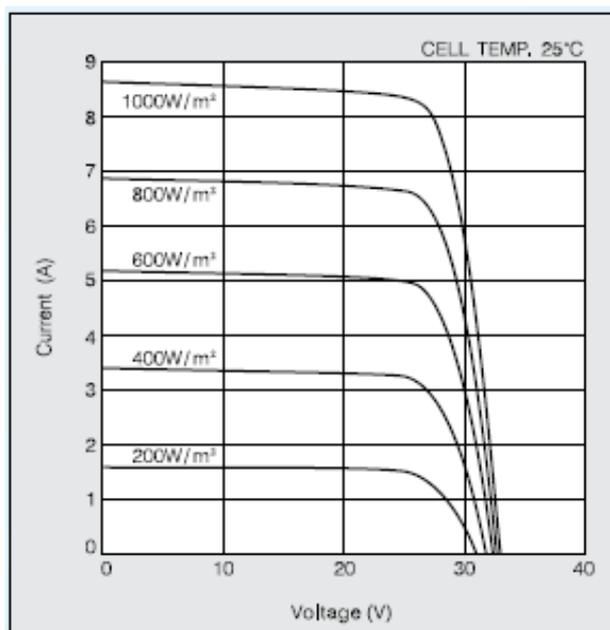


Figura 28 – Comportamento do módulo KD210GX em diferentes níveis de irradiância.

Fonte: Kyocera (2012).

O SFCR do EV da UTFPR utiliza um inversor monofásico em 220V de 2000W, modelo PVP2000, da PVPOWERED, conforme figura 29, possuindo as especificações elétricas descritas na tabela 6.



Figura 29 – Inversor do SFCR do EV.

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Características Elétricas do Inversor de frequência PVP2000

Potencia Nominal (watts)	2000
Eficiência (%)	92
Máxima Tensão DC de Entrada (V)	500
Faixa de Tensão DC de Operação (V)	115 - 450
Mínima Tensão DC de Start (V)	130
Máxima Corrente DC (A)	18,5
Corrente AC Nominal (A)	8,5
Tensão AC Nominal (V)	240
Faixa de Tensão AC de Operação (V)	211 - 264
Faixa de Frequência AC (Hz)	59,3 - 60,5

Fonte : PVPOWERED (2012)

3.3 IRRADIAÇÃO SOLAR NO PAINEL FOTOVOLTAICO DO EV

O painel do SFCR do Escritório Verde foi instalado de forma integrada ao telhado da construção, apresentando um deslocamento azimutal de aproximadamente 22,4° para o oeste, conforme figura 30. Por este motivo, o ângulo ideal de inclinação do painel, que seria de 25 graus, o mesmo da latitude local, sofre alteração.



Figura 30 – Localização do EV e sentido de instalação do painel FV.

Fonte: Google Earth

No *software* RADIASOL 2 foi criado um ponto de referência com as coordenadas geográficas do EV, conforme figura 31, onde é apresentada a tela onde foram inseridas a latitude e longitude, e obtidos através da interpolação dos dados dos mapas solarimétricos do Projeto SWERA, os valores de irradiação no plano horizontal para a localidade onde está instalado o painel fotovoltaico do Escritório Verde.

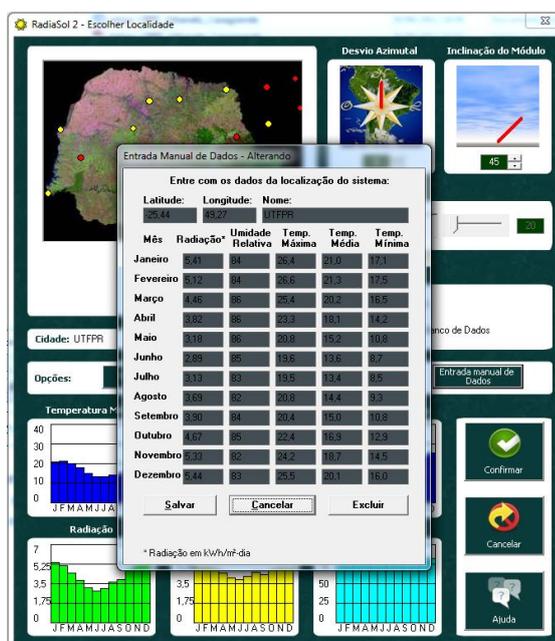


Figura 31 – Entrada de dados no RADIASOL2

Fonte: RadiaSol2

O painel do SFCR do EV se encontra a 10° de inclinação em relação à horizontal, no mesmo ângulo do telhado da construção. Deste modo foi obtida a irradiação diária média no plano inclinado do painel, conforme apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Irradiação Média (Projeto SWERA)

Mês	Irradiação (kWh/dia)
Janeiro	5,41
Fevereiro	5,28
Março	4,78
Abril	4,28
Mai	3,66
Junho	3,47
Julho	3,68
Agosto	4,22
Setembro	4,31
Outubro	4,92
Novembro	5,35
Dezembro	5,5
Ano	4,57

Fonte: Radiasol2

Os valores indicados na tabela 8 são referentes à média histórica dos mapas do projeto SWERA e incorporados no software RADIASOL 2. Para obtenção dos valores reais no período considerado no escopo deste trabalho, foram também obtidos os dados de irradiação global no plano horizontal da estação meteorológica A807 do INMET, localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, e inseridos manualmente no RADIASOL 2, para transposição dos dados para o plano do painel, sendo obtidos os valores conforme tabela 9.

Mês	Irradiação (kWh/dia)
Janeiro/2012	5,42
Fevereiro/2012	5,20
Março/2012	5,15
Abril/2012	3,75
Mai/2012	2,76
Junho/2012	2,84
Julho/2012	3,09
Agosto/2012	4,26
Setembro/2012	4,73
Outubro/2012	4,25
Novembro/2012	5,12
Dezembro/2012	5,31
Ano	4,32

Tabela 9 – Irradiação Diária Média no ano de 2012 (Estação A807 do INMET).

Fonte: Adaptado de INMET (2013)

3.3.1 Piranômetro Fotovoltaico

De forma a aumentar a confiabilidade e a consistência dos dados a serem utilizados neste trabalho, foi adquirido um piranômetro fotovoltaico, que em conjunto com a utilização de um *datalogger*, para acumulação dos dados de leitura, permite uma maior amostragem dos valores reais da irradiância incidente sobre o painel. Desta forma é possível, também, confirmar a aplicabilidade dos dados do atlas solarimétrico e de estações solarimétricas próximas na análise de desempenho, verificando as possíveis disparidades que possam ocorrer ao utilizar estes dados.

O instrumento utilizado é um piranômetro baseado em célula de silício monocristalino, modelo SP-214 da *Apogee Instruments*, idêntico ao mostrado na figura 32, e que fornece uma saída de 4-20 mA compatível com o *datalogger EL-USB-4* da empresa *Lasca Electronics*. A calibração do instrumento é feita para que cada mA corresponda a 78W/m^2 , perfazendo uma leitura no intervalo de 0 a 1248W/m^2 , com uma precisão absoluta de $\pm 5\%$.



Figura 32 – Piranômetro Fotovoltaico.

Fonte: Apogee Instruments

A figura 33 mostra a resposta espectral deste piranômetro.

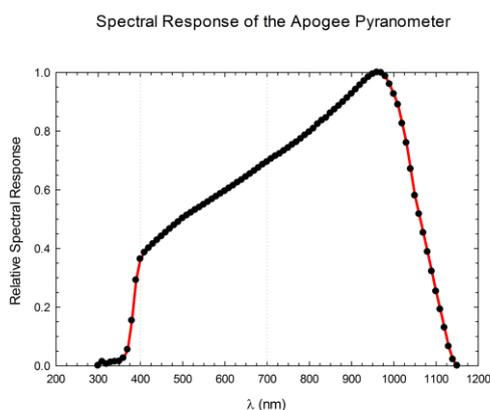


Figura 33 – Resposta Espectral do Piranômetro Fotovoltaico SP-214.

Fonte: Apogee Instruments

Este instrumento foi posicionado de forma a permanecer com sua superfície de incidência no mesmo ângulo de instalação do painel fotovoltaico, conforme mostrado na figura 34.



Figura 34 – Piranômetro instalado junto ao painel fotovoltaico do EV.

Fonte: Autoria própria.

O piranômetro, instalado no dia 29 de junho de 2012, têm suas leituras gravadas pelo *datalogger*, mostrado na figura 35, com amostragem a cada minuto. A coleta de dados do *datalogger* foi feita a cada 3 semanas, devido ao limite de memória disponível no equipamento que é 32510 leituras. Desta forma foi possível traçar as curvas de irradiância e determinar a irradiação incidente no painel.



Figura 35 – Datalogger LASCAR EL-USB-4

Fonte: Autoria própria.

As figuras 36 e 37 mostram exemplos de curvas de irradiância geradas em um dia ensolarado e em um dia chuvoso nos meses de julho e dezembro.

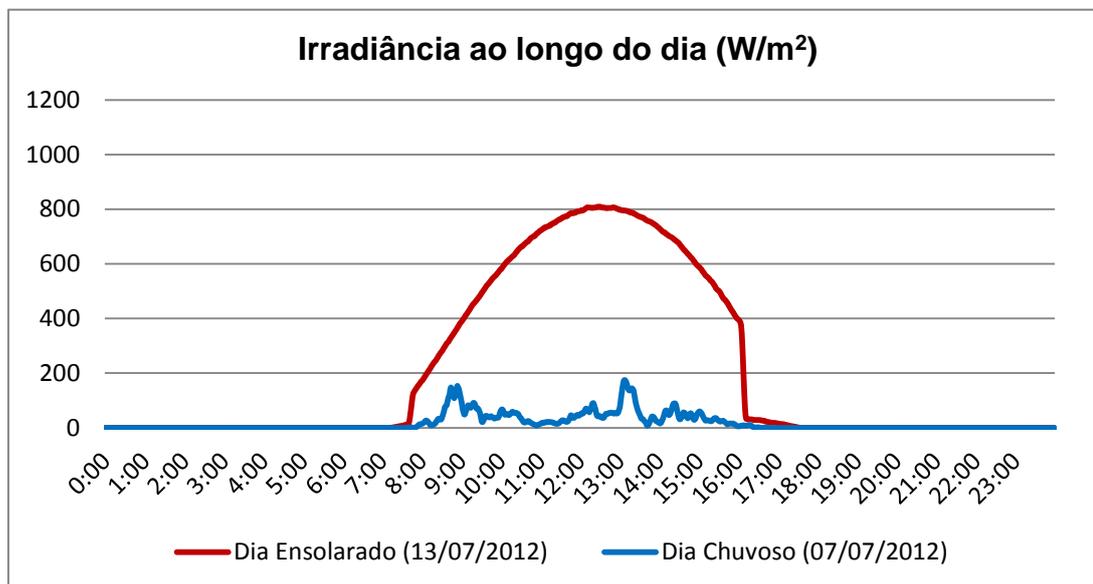


Figura 36 – Curvas de irradiância incidente no plano do painel em julho.

Fonte: Autoria própria.Mel

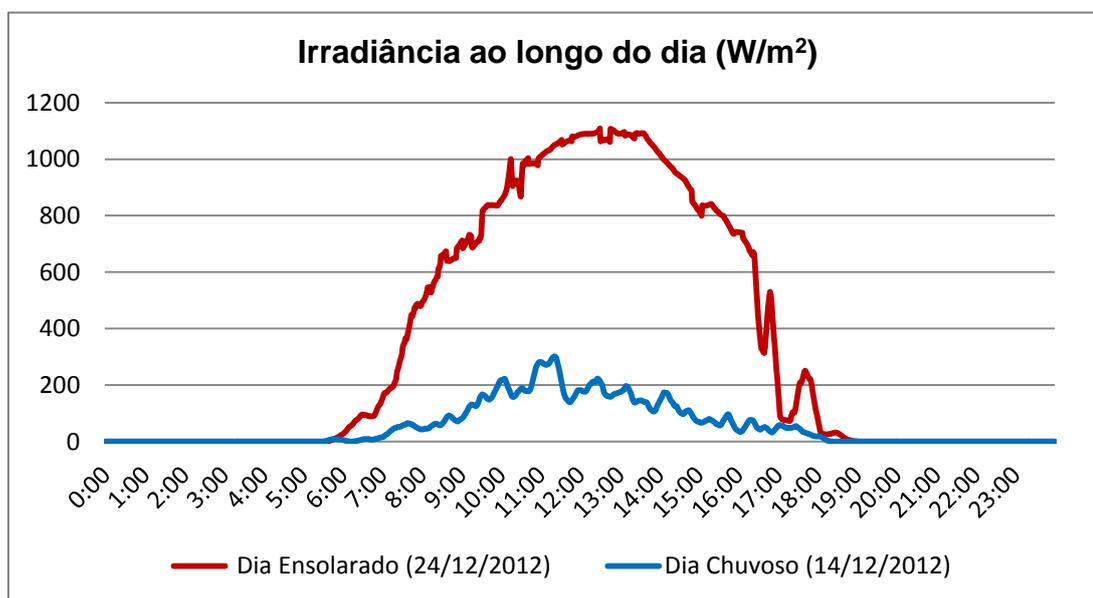


Figura 37 – Curva da irradiância incidente no plano do painel em dezembro.

Fonte: Autoria própria.

As figuras 38, 39, 40, 41, 42 e 43 mostram, respectivamente, a irradiação diária obtida pelo piranômetro, recebida no plano do painel nos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.

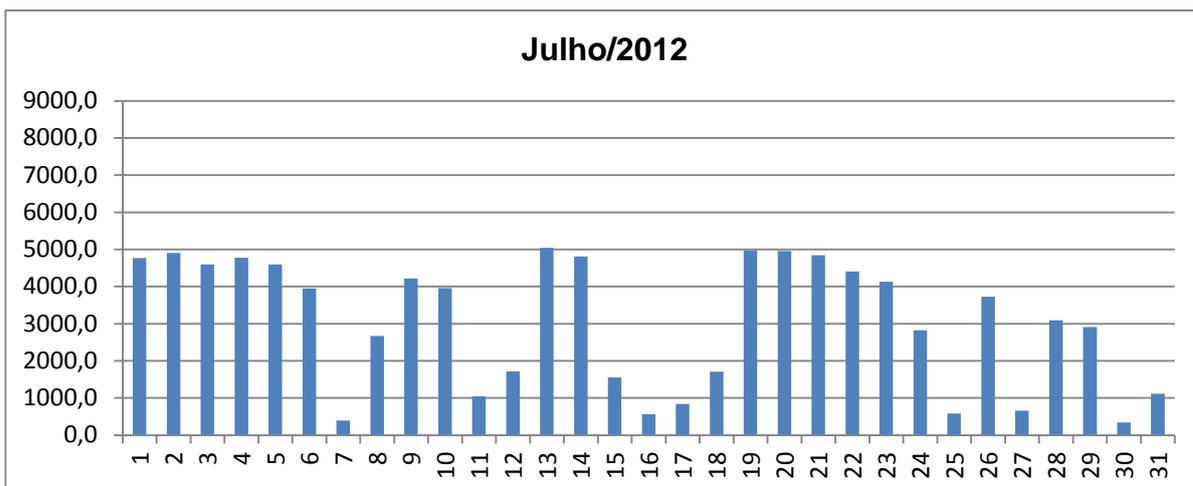


Figura 38 – Irradiação diária no mês de Julho/2012

Fonte: Autoria própria.

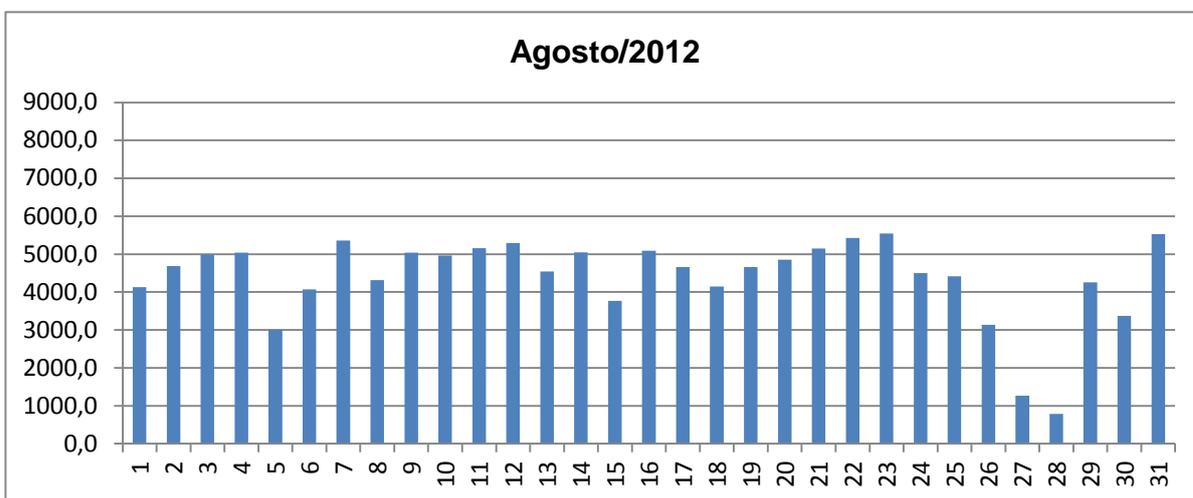


Figura 39 - Irradiação diária no mês de Agosto/2012

Fonte: Autoria própria.

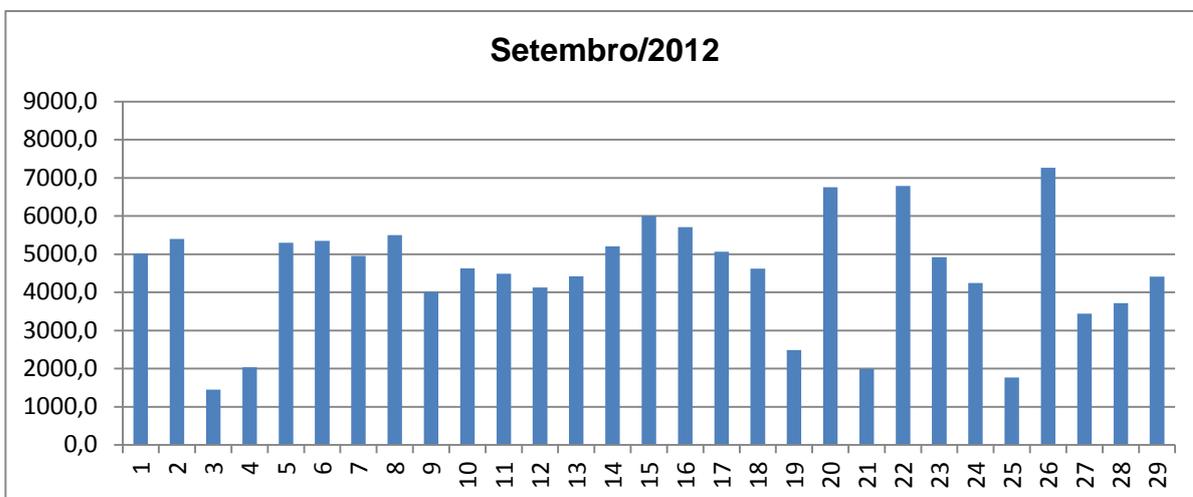


Figura 40 - Irradiação diária no mês de Setembro/2012

Fonte: Autoria própria.

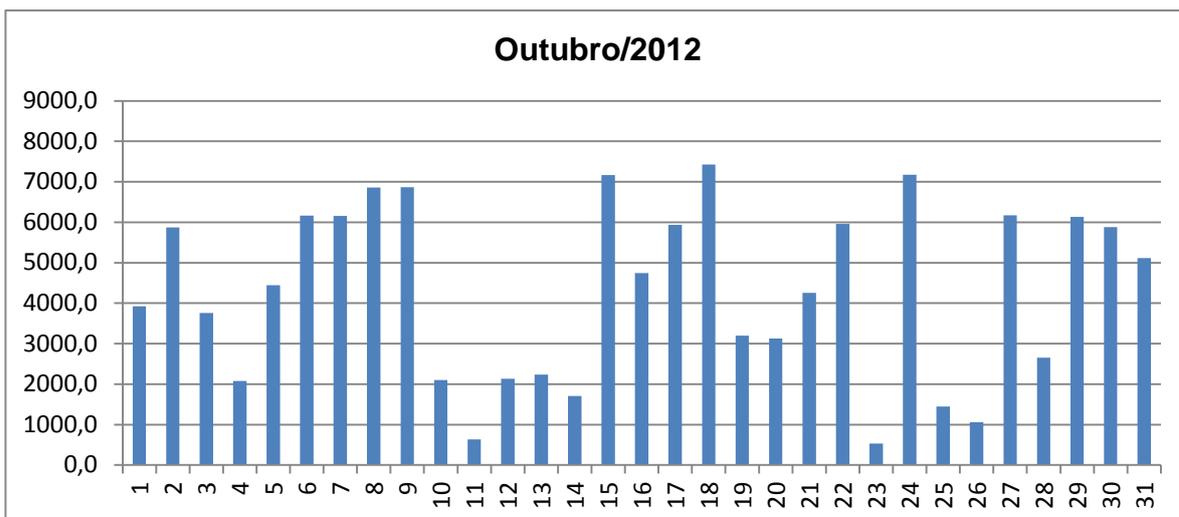


Figura 41 - Irradiação diária no mês de Outubro/2012
Fonte: Autoria própria.

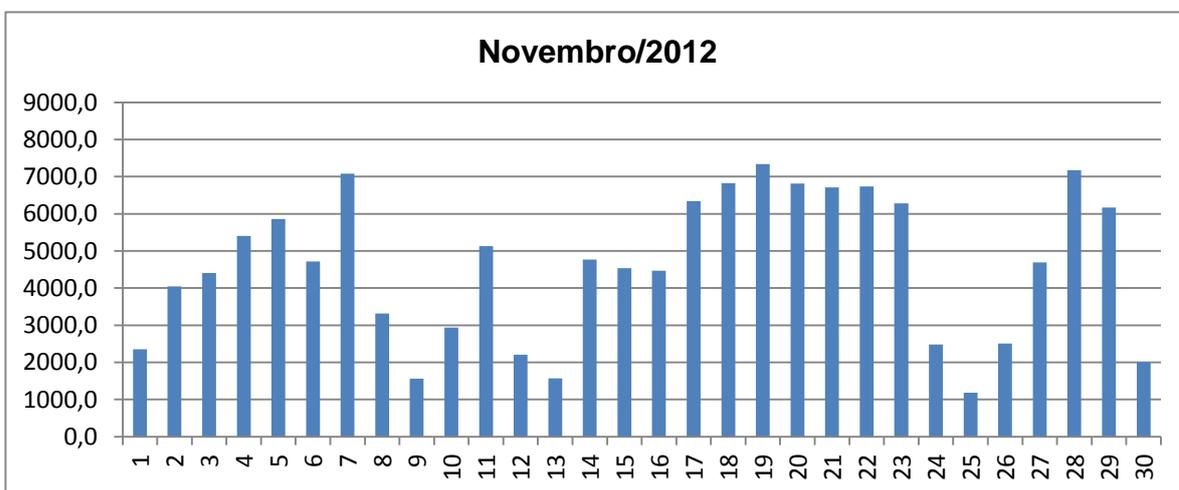


Figura 42 - Irradiação diária no mês de Novembro/2012
Fonte: Autoria própria.

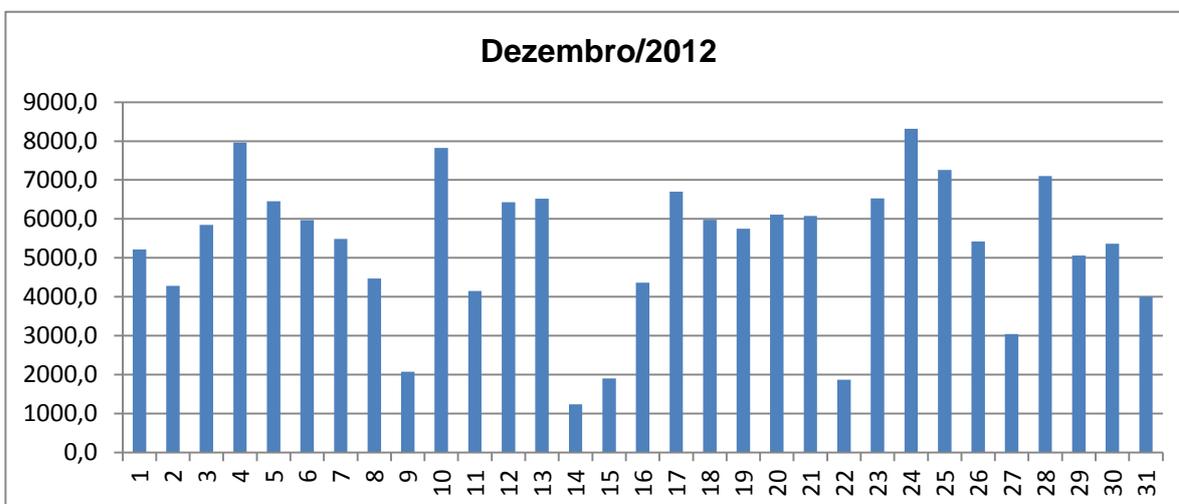


Figura 43 - Irradiação diária no mês de Dezembro/2012
Fonte: Autoria própria.

A irradiação diária média incidente no painel fotovoltaico do EV da UTFPR nos meses de Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro são indicadas na figura 44.

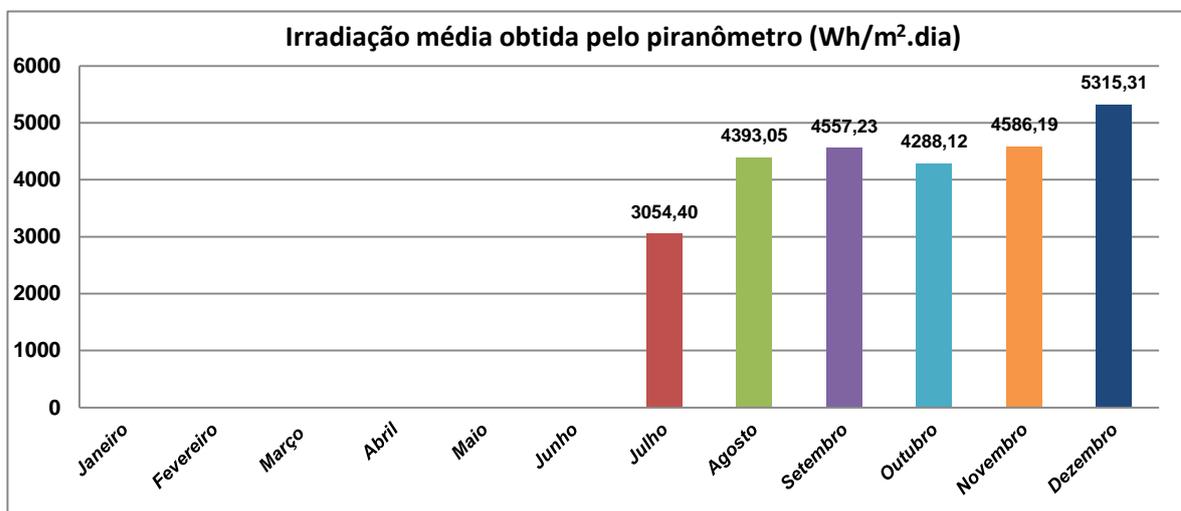


Figura 44 – Irradiação diária média.

Fonte: Autoria própria.

Como os valores obtidos correspondem ao período de 6 meses completos é possível estimar a média anual espelhando os dados para os valores em que não foram feitas as medições, resultando numa média de irradiação diária no ano de 2012 de 4,32kWh/(m².dia).

A figura 45 mostra as curvas de irradiância ao longo do dia com maior irradiação acumulada nos meses em que o piranômetro operou. Percebe-se que nos meses de Julho, Agosto e Setembro ocorre a queda abrupta na irradiância incidente no início da manhã e no final da tarde, indicando o sombreamento causado por construções próximas ao Escritório Verde. Portanto, nestes meses, o uso dos dados do mapa solarimétrico ou de estações solarimétricas próximas, tende a provocar uma falsa indicação de redução nos índices de desempenho global deste painel, pelo fato de não ser considerado este sombreamento nessas fontes.

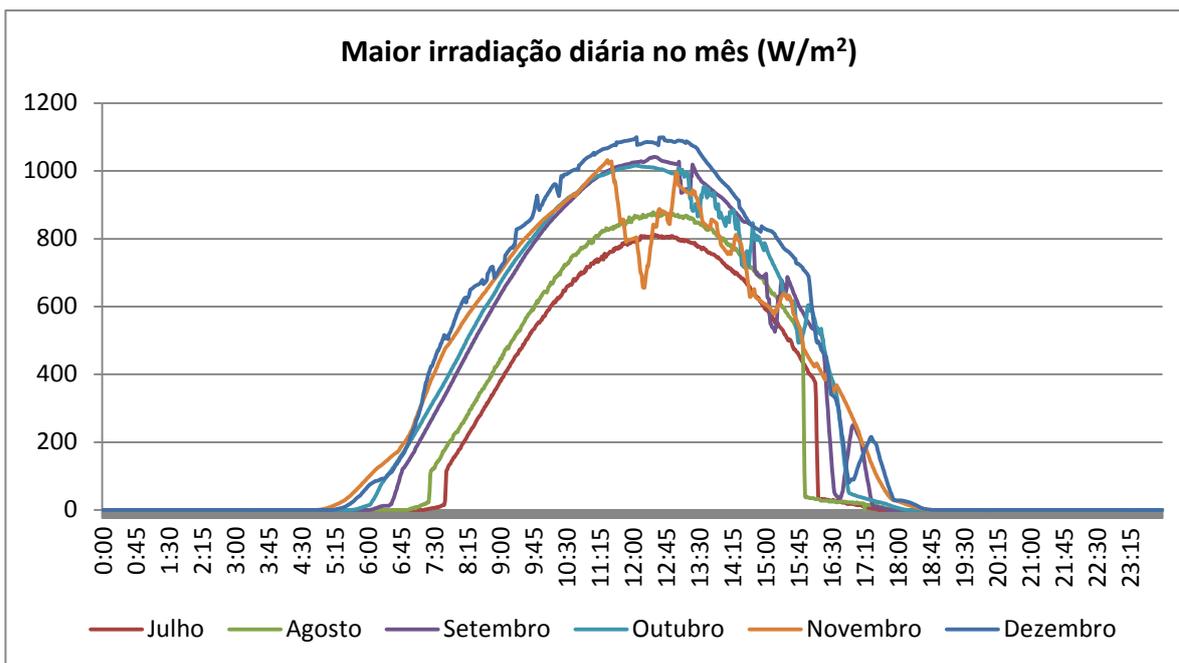


Figura 45 – Curva de irradiação ao longo do dia.

Fonte: Autoria própria.

3.4 GERAÇÃO DO SFCR DO EV

3.4.1 Estimação da Energia Gerada pelo SFCR do EV

Em posse dos valores de irradiação é possível estimar a energia a ser gerada pelo sistema através da seguinte equação

$$E = \frac{H_{TOT}}{1000} \times P_N \times P_R$$

Onde: H_{TOT} = irradiação total incidente no plano;

P_N = potência nominal do arranjo;

P_R = Índice de desempenho global

$H_{TOT}/1000$ representa o número de horas equivalentes à condição padrão de testes (STC) existentes ao longo do período, ou ainda, a quantidade de horas de sol pleno equivalente. Estimando-se um índice de desempenho global médio de 75% podem ser obtidos os valores esperados de geração do SFCR do EV para cada fonte de dados de irradiação, conforme tabela 10.

Tabela 10 – Geração mensal estimada pelo SFCR do EV para $P_R = 75\%$ [kWh]

	Projeto SWERA	INMET	Piranômetro
jan/12	264,14	264,84	-
fev/12	241,16	237,42	-
mar/12	233,38	251,50	-
abr/12	202,23	177,26	-
mai/12	178,70	134,80	-
jun/12	163,96	134,13	-
jul/12	179,68	150,85	148,92
ago/12	206,04	207,83	214,34
set/12	203,65	223,44	215,46
out/12	240,22	207,59	209,46
nov/12	252,79	241,98	216,88
dez/12	268,54	259,31	259,75
2012	2634,49	2490,94	2529,61

Fonte: Aatoria própria.

3.4.2 Energia Entregue pelo SFCR do EV

A figura 46 mostra a evolução da energia real gerada pelo SFCR do EV da UTFPR desde o início de sua operação. Estes dados foram obtidos através de leituras no medidor de energia no painel local do inversor ao longo do ano, já que o sistema de comunicação do inversor com a rede da UTFPR se encontrava inoperante por problemas técnicos durante o período avaliado, impossibilitando a acumulação dos dados de potência, tensão e corrente de modo *online*. Desta forma foi possível contabilizar a energia diária média gerada em cada mês de operação no ano de 2012, conforme figura 47.

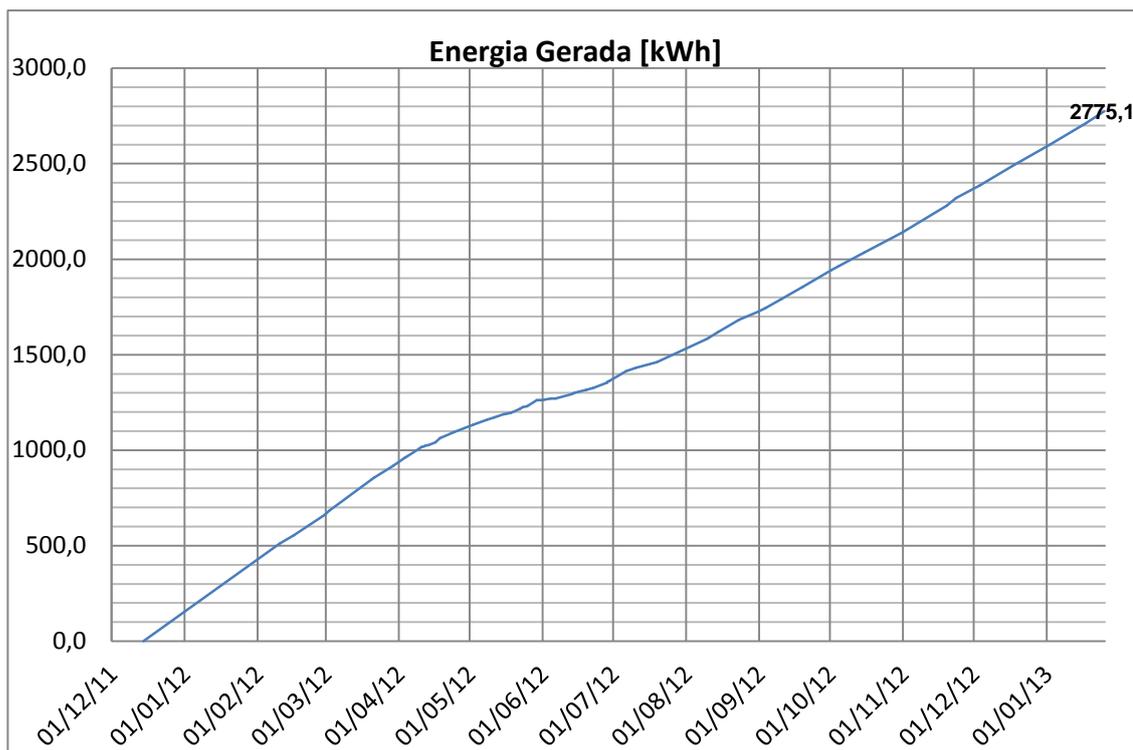


Figura 46 – Totalizador de energia

Fonte: Autoria própria.

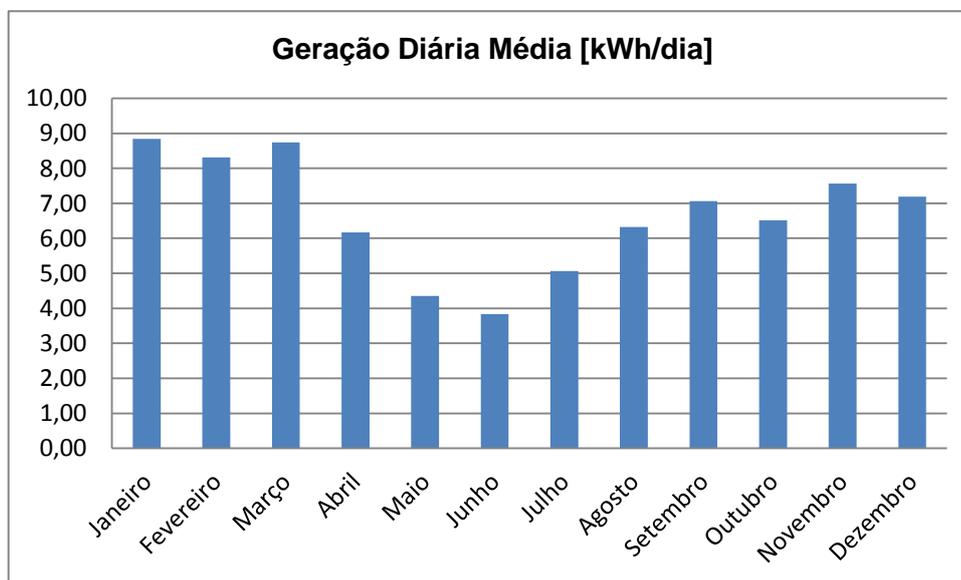


Figura 47 – Geração diária

Fonte: Autoria própria.

A tabela 11 mostra a energia entregue pelo sistema em cada mês de operação.

Tabela 11 – Geração mensal do SFCR do EV

Mês	Geração (kWh)
Janeiro	274,00
Fevereiro	241,00
Março	271,00
Abril	185,00
Maio	135,00
Junho	115,00
Julho	157,00
Agosto	196,00
Setembro	212,00
Outubro	202,00
Novembro	227,00
Dezembro	223,00
2012	2438,00

Fonte: Autoria própria.

3.5 ÍNDICES DE MÉRITO DO SFCR DO EV

Com base nos dados obtidos foram obtidos os índices de mérito do SFCR do EV.

3.5.1 Produtividade Final (*Final Yield*)

Na tabela 12 constam os índices de produtividade mensal e final do sistema.

Tabela 12 – Índice de Produtividade Final do SFCR do EV

Mês	Yield
Janeiro	130,48
Fevereiro	114,76
Março	129,05
Abril	88,10
Maio	64,29
Junho	54,76
Julho	74,76
Agosto	93,33
Setembro	100,95
Outubro	96,19
Novembro	108,10
Dezembro	106,19
2012	1160,95

Fonte: Autoria própria.

Observa-se um índice de produtividade final dentro dos valores típicos para este tipo de sistema, porém, abaixo do esperado quando comparado com o valor

calculado utilizando-se os dados do Projeto Swera, que seria de 1254,52 kWh/kWp para $P_R=75\%$. Isto se deve ao fato de ter sido verificada uma menor incidência solar ao longo do ano de 2012 em relação à média histórica registrada pelo Projeto SWERA, principalmente nos meses de maio, junho e julho.

3.5.2 Fator de Capacidade

Tabela 13 – Fator de Capacidade do SFCR do EV

Mês	C_F
Janeiro	17,54%
Fevereiro	16,49%
Março	17,35%
Abril	12,24%
Maio	8,64%
Junho	7,61%
Julho	10,05%
Agosto	12,54%
Setembro	14,02%
Outubro	12,93%
Novembro	15,01%
Dezembro	14,27%
2012	13,22%

Fonte: Autoria própria.

Como os índices Y_F e C_F estão relacionados às mesmas variáveis é de se esperar que o índice de fator de capacidade tenha variação similar ao índice anterior. Conforme verificado na tabela 13, o C_F de 13,22% está dentro dos valores típicos, que segundo Benedito (2009) está situado entre 13 e 18%, para SFCR de tecnologia cristalina instalados no Brasil.

3.5.3 Desempenho Global (*Performance Ratio*)

Os índices de desempenho global para o SFCR do EV foram calculados para as três fontes de dados de irradiação, conforme mostrado na tabela 14. Percebe-se que ao utilizar os dados históricos do Projeto SWERA têm-se uma falsa indicação de baixo desempenho do sistema, devido ao fato de ter sido observada uma menor irradiação no período em análise. Os valores de Desempenho Global utilizando os dados de irradiação do piranômetro fotovoltaico e do INMET são

praticamente idênticos e estão dentro da média observada em SFCR's instalados em vários pontos do mundo.

Tabela 14 – Desempenho Global do SFCR do EV

Mês	Projeto Swera	INMET	Piranômetro
Janeiro	77,80%	77,59%	-
Fevereiro	74,95%	76,13%	-
Março	87,09%	80,82%	-
Abril	68,61%	78,27%	-
Mai	56,66%	75,11%	-
Junho	52,61%	64,30%	-
Julho	65,53%	78,06%	79,07%
Agosto	71,34%	70,73%	68,58%
Setembro	78,08%	71,16%	73,80%
Outubro	63,07%	72,98%	72,33%
Novembro	65,18%	70,36%	75,97%
Dezembro	62,28%	64,50%	64,39%
2012	68,60%	73,33%	72,36%

Fonte: Autoria própria.

3.5.4 Análise das variações encontradas

Verifica-se que em certos meses o desempenho global teve grande variação em relação à média. Estas variações provavelmente são causadas pela oscilação do espectro solar que incide sobre o painel e sua resposta espectral, pela menor eficiência do inversor quando operado em pequenas frações da potência nominal e pela temperatura dos módulos fotovoltaicos.

A título experimental, foram calculados os índices de mérito para uma série de dias nublados e dias ensolarados no inverno e no verão, sendo obtidos os valores da tabela 15.

Tabela 15 – Índices de mérito para diferentes tempos e climas

	Y_F	C_F	P_R
Dias Ensolarados (Verão)	1751,57	19,94%	62,89%
Dias Ensolarados (Inverno)	1321,09	15,04%	72,78%
Dias Nublados	289,31	3,29%	68,22%

Fonte: Autoria própria.

Como era de se esperar, os índices de produtividade e de fator de capacidade foram baixos nos dias nublados devido à menor disponibilidade do recurso solar. Da mesma forma o índice de desempenho global é relativamente

baixo devido, principalmente, ao descasamento espectral ocasionado pelo reduzido espectro incidente sobre o painel em dias nublados.

O sistema opera de forma mais eficiente durante os dias ensolarados durante o inverno, verificado pelo índice de desempenho global de 72,78%. Já nos dias ensolarados durante o verão, a produtividade foi superior, devido à maior incidência solar direta, porém o desempenho global foi menor, provavelmente pelo aumento das perdas em função do incremento na temperatura dos módulos fotovoltaicos.

Além disso, outras possíveis causas da diferença entre o valor estimado e o valor realmente gerado de energia elétrica podem ser em consequência de:

- A potencia nominal do módulo informada pelo fabricante pode não corresponder ao seu valor real.
- O rendimento do inversor pode ser inferior ao informado.
- Perdas devido ao subdimensionamento do inversor.
- A irradiação detectada pelo piranômetro fotovoltaico, e os dados do INMET podem não corresponder ao valor real.
- As perdas devido ao aquecimento dos módulos podem ser superiores ao valor considerado na estimativa.
- Outras perdas.

3.6 POSSÍVEIS MELHORIAS

3.6.1 Alteração da Inclinação do Painel

Através de simulações feitas no RADIASOL 2, foi obtida a figura 48, que indica a variação da irradiação global diária média incidente no painel do Escritório Verde para diferentes inclinações, mantendo-se o desvio azimutal de 22,4° para o oeste.

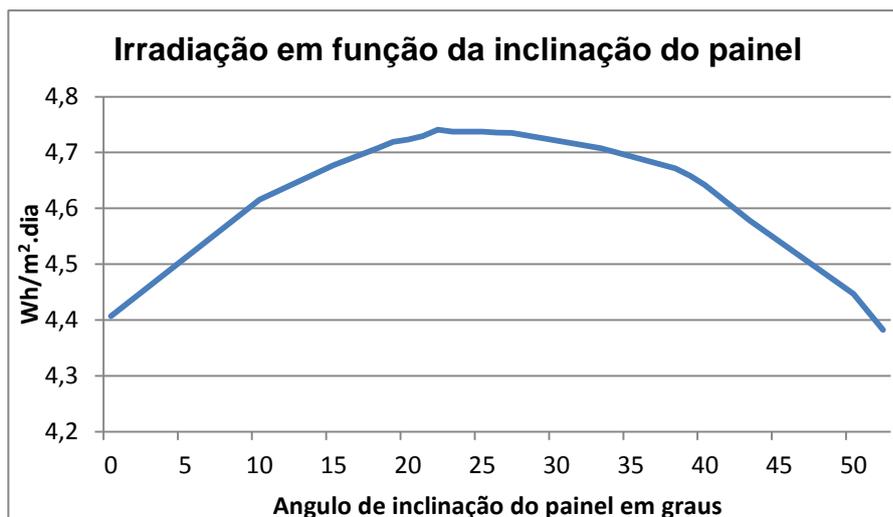


Figura 48 – Irradiação diária média para diferentes ângulos de inclinação do painel.

Fonte: Radiasol2

Conforme verificado, a inclinação atual do painel, de 10° com o plano horizontal, não permite o melhor aproveitamento da irradiação incidente ao longo do ano. A alteração desta inclinação se torna difícil pelo fato do painel estar apoiado sobre o telhado do escritório, seguindo o ângulo de projeto do mesmo. Na análise a seguir, foi considerado o ganho estimado na irradiação global incidente, através de simulação no Radiasol 2, considerando a modificação da inclinação do painel para o ângulo de 22°, onde se obteve a melhor média de irradiação, e aplicado à geração real do sistema, conforme tabela 16.

Tabela 16 – Geração para diferentes inclinações [kWh]

Mês	Ângulo de 10° (Atual)	Ângulo de 22° (Estimativa)
jan/12	274,00	265,67
fev/12	241,00	238,77
mar/12	271,00	277,13
abr/12	185,00	195,78
mai/12	135,00	148,61
jun/12	115,00	130,03
jul/12	157,00	174,20
ago/12	196,00	211,93
set/12	212,00	220,75
out/12	202,00	201,58
nov/12	227,00	221,13
dez/12	223,00	212,95
2012	2438,00	2498,53

Fonte: Autoria própria.

O acréscimo na geração anual, estimado para o ano de 2012, seria de 60,53kWh ou 2,48% da geração em 2012, caso a inclinação do painel do SFCR do EV fosse alterada de 10° para 22°, ou seja, um ganho muito pequeno para o sistema. Porém, caso este ajuste possa ser feito no futuro, sem demandar custos ou maiores dificuldades, haverá o benefício do menor acúmulo de sujeira sobre o painel devido ao maior ângulo de escoamento de água da chuva, diminuindo as perdas e as rotinas de limpeza ao longo do período de operação do sistema.

3.6.2 Substituição do Inversor

O SFCR do EV possui um fator de dimensionamento de inversor (FDI) menor que um. Desta forma, possivelmente ocorrem perdas por limitação de potência nos momentos em que se tem disponível a plena irradiação solar no plano do painel. No caso destas serem maiores que o ganho obtido quando o sistema opera com pequenas frações da potência nominal, onde um inversor de menor potência trabalha em uma faixa de melhor eficiência, a substituição deste inversor pode ser vantajosa.

Durante o período avaliado, foram raros os momentos em que se percebeu a limitação do inversor em 2000W. Somente em dias claros, durante um pequeno período próximo ao meio dia é que estas foram presenciadas, não justificando a troca deste equipamento.

Uma análise técnica e econômica mais aprofundada desta possível melhoria poderá ser feita quando os dados de potência instantânea do medidor estiverem sendo registradas.

3.6.3 Implantação de Rotina de Limpeza do Painel

Pelos índices obtidos, não foi possível observar claramente a influência da sujeira depositada sobre o painel ao longo do período de análise, porém, é fato que esta exerce uma degradação na geração do sistema. O painel do SFCR do EV nunca foi limpo desde o início de sua operação. A figura 48 mostra em detalhe a sujeira depositada sobre os módulos.

A implantação de rotinas de verificação e limpeza do painel irá garantir que estas perdas sejam minimizadas.



Figura 49 – Sujeira sobre o painel do EV

Fonte: A autoria própria.

3.6.4 Sugestões de Trabalhos Futuros

- Análise contínua dos próximos anos de operação do sistema, aumentando a consistência dos dados e a observação de degradações que possam ocorrer ao longo do tempo na eficiência do gerador fotovoltaico.
- Estudo contemplando a medição da temperatura e sua influência na geração para melhor validação destes resultados.
- Acompanhamento das tendências de incremento nos índices de desempenho após as rotinas de limpeza do painel.

4. CONCLUSÃO

No ano de 2012 o sistema operou de forma ininterrupta, gerando mais de 2,4MWh, o que representa aproximadamente 200kWh/mês. Essa energia é superior à necessária para atender as cargas existentes na edificação, permitindo ainda a exportação de energia para as instalações adjacentes ao EV e a acumulação de créditos com a concessionária de energia.

Os índices de mérito: *Yield*, *Performance Ratio* e Fator de Capacidade estão adequados aos divulgados por outras instalações semelhantes, sendo que o ano de 2012 apresentou menores níveis de irradiação incidente sobre a região em relação aos valores históricos do Projeto SWERA, fato que pôde ser verificado pelo piranômetro fotovoltaico instalado junto ao painel e comprovado pelos dados solarimétricos obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia.

Para a análise de desempenho de um sistema em operação, o piranômetro fotovoltaico mostrou-se muito eficaz, permitindo o acompanhamento da real irradiação incidente sobre painel, oferecendo boa precisão a um custo muito inferior ao de um piranômetro de termopilha.

Neste trabalho não foi possível determinar consistentemente quais as perdas ocorridas pelo subdimensionamento do inversor e pelo sombreamento no painel, devido ao fato do módulo de comunicação do inversor não estar registrando os valores instantâneos de potência, corrente e tensão, inviabilizando a contabilização destas.

Valores mais precisos serão obtidos para um período de análise maior, de vários anos, onde variações sazonais serão diluídas pelo maior volume de dados de observação. Os índices de mérito terão maior consistência e relevância à medida que mais estudos de desempenho forem sendo gerados ao longo dos anos de operação do sistema FV do EV da UTFPR. Assim será possível verificar se este sistema continua a operar de forma adequada e qual a degradação que vem ocorrendo no gerador.

Verificou-se que os SFCR integrados à construção são uma ótima opção para produzir eletricidade nos próprios locais onde ela se faz necessária, sem a necessidade de grandes plantas geradoras, que demandam grandes investimentos, áreas de ocupação e tempo de construção.

Curitiba, apesar de ser uma das cidades menos favoráveis para utilização da tecnologia fotovoltaica no país, possui, ainda assim, índices de desempenho superior a grande maioria dos países que mais investem no sistema. Portanto, é necessário que as barreiras tarifárias e econômicas, existentes atualmente, sejam reavaliadas, para permitir que, aliado à redução dos custos dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos, o país usufrua de seu potencial solar através dos SFCR.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. USP. São Paulo, p. 171. 2012.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 2008.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 2012

AWESOME SUN POWER - **Grid Tied Solar Photovoltaics**. Disponível em: <<http://awesomesunpower.com/what-is-a-grid-tied-system.html>>. Acesso em: 25 dez. 2012

BENEDITO, R. D. S. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências).

BOYLE, G. **Renewable Energy, 2nd edition**. Oxford, UK: Oxford University Press & The Open University, 2004.

CRESESB. Energia Solar Princípios e Aplicações. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**, 2004. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_solar>. Acesso em: 25 jun. 2012.

DGS. **Photovoltaic Systems - Planning and installing**. Berlin: The German Energy Society, 2008.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2011**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012.

EPIA. European Photovoltaic Industry Association Market Report 2011. **European Photovoltaic Industry Association**, 2012. Disponível em: <<http://www.epia.org/>>. Acesso em: 03 abril 2012.

HINRICHS, R. A. **Energia e Meio Ambiente**. 3. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HUMPHRIES, S. <http://blog.apogeeinstruments.com>. **Apogee Instruments**, 2011. Disponível em: <<http://blog.apogeeinstruments.com/2011/08/why-silicon-pyranometers-are-best.html>>. Acesso em: 20 maio 2012.

IEA-PVPS. **Annual Report**. IEA. Friburgo, Suíça, p. 129. 2011. (978-3-906042-07-7).

INMET, **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

INMETRO. **Regulamento da avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica**. INMETRO. Rio de Janeiro. 2008.

INMETRO. **Portaria 004/2011 - Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica (Módulo, controlador de carga, inversor e bateria)**. INMETRO. Brasília, p. 42. 2011.

INMETRO, **Módulos Fotovoltaicos**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/modulos.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2012.

LISITA, O. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso - 3kWp instalados no estacionamento do IEE-USP**. USP. São Paulo, p. 87. 2005. Dissertação (Mestrado em Energia).

MARION, B. et al. **Performance parameters for grid-connected PV systems**. Golden - Colorado: Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, 2005.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

REN21. **Renewables 2012 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2012.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC / LABSOLAR, 2004.

SHAYANI, R. A. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica: Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. Universidade de Brasília. Brasília. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10899 - Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. ABNT. Rio de Janeiro. 2006.

UFPE. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. Recife: Editora da UFPE, 2000.

URBANETZ, J. J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 189. 2010. Tese (Doutorado em Eng. Civil).

VAISALA - **Vaisala Pyranometer**, 2012. Disponível em: <<http://www.vaisala.com/en/roads/products>>. Acesso em: 12 nov. 2012

VERA, L. H.; KREZINGER, A. Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos autônomos através de índices de mérito. ASADES. [S.l.]. 2011.

ANEXOS

ANEXO A

Modelo do Inversor



PV Powered™ String Inverters

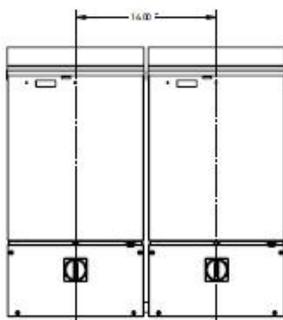


Proven Reliability – With Integrated AC and DC PV System Disconnect Listed to the UL 98 Standard

PV Powered String Inverters continue to deliver industry-leading reliability and technical innovations that lower the total cost of PV systems installation. Advanced Energy is now the only manufacturer of a string inverter-integrated AC/DC PV System Disconnect that is listed to the UL 98 Standard. The UL 98 Standard, called "Enclosed and Dead-front Switches," ensures the integrated PV Powered disconnect meets all installation and inspection requirements of a PV System Disconnect.

Housed within an NEC Compliant wire raceway, the innovative disconnect consists of one enclosure with generous working room for installation. In addition to providing for a single point of connection from the utility service and PV array, the wire raceway's optimized knockout locations also provide options for side, bottom and back entry with minimized conduit bending. The wire raceway enables flush side-by-side mounting, eliminating the need for extra equipment and resulting in a cleaner, less expensive installation.

The PV Powered string Inverters are backed by the industry's first nation-wide ten year warranty and equipment replacement program. Optional performance monitoring is available which includes low cost, secure web-based access to inverter status and performance history.



Example of Side-by-side Mounting on Standard Stud Spacing

FEATURES



Industry-Leading Reliability

- Endurance tested to 20 year operating life
- Lowest part counts and fewest interconnects eliminate common failure points
- Field-proven technology with thousands of units installed nationwide

Integrated AC and DC PV System Disconnect

- Listed to UL 98 Standard for use with PV Powered UL 1741 Listed string inverters
- Robust testing of switch mechanism to UL 98 Standard
- Single AC/DC switch visible and lockable in the OFF position
- NEC Compliant internal wire raceway enables side-by-side mounting
- Direct-to-wall surface enclosure design allows for easy access and installation

Easy Installation

- Factory integrated inverter and PV system disconnect eliminates the need for extra equipment
- Integrated disconnect reduces conduit connection points saving installation time and material cost
- Field-configurable positive ground applications with simple jumper selection
- Optimally placed knockouts for a variety of conduit routing options

Installer-Focused Support

- No special purchase requirements to get the best technical support in the industry
- Live technical phone support
- Economical performance monitoring options



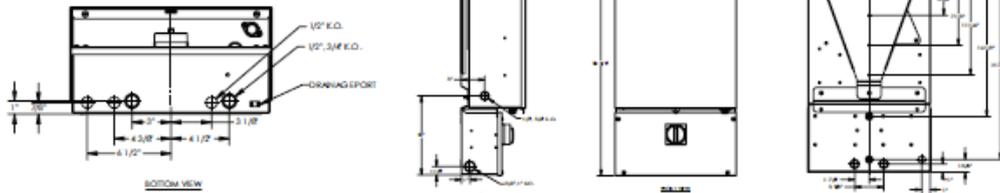
Advanced Energy products are designed and manufactured in the U.S., are fully compliant with the Buy American Act, and qualify for projects funded by the federal stimulus package.

20720 Brinson Boulevard
PO Box 7348
Bend, OR 97708

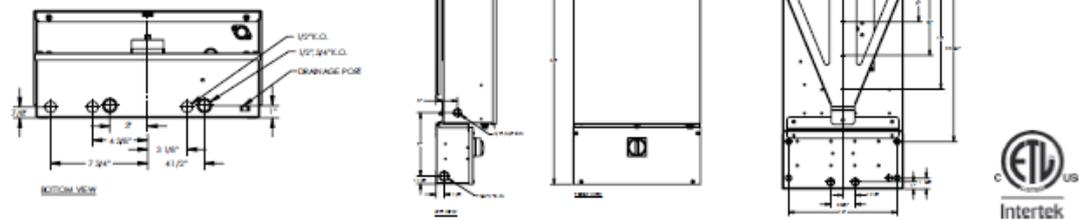
1-541-312-3832
WWW.PVPOWERED.COM

DIMENSIONS

PVP2000 to PVP3500



PVP4600, PVP4800, PVP5200



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

MODEL	PVP2000	PVP2500	PVP2800	PVP3000	PVP3500	PVP4600	PVP4800	PVP5200
Continuous Output Power (watts)	2000	2500	2800	3000	3500	4600	4800	5200
Weighted CEC Efficiency (%)	92	94.5	92	93.5	95.5	95.5	96	96
Maximum DC Input Voltage (VOC)	500	500	500	500	500	500	500	500
DC Voltage Operating Range (V)	115-450	140-450	180-450	170-450	200-450	205-450	200-450	240-450
DC Minimum Start Voltage (V)	130	155	195	185	215	220	215	255
DC Maximum Current (A)	18.5	19	16.5	19	18.5	24	25.5	23
AC Rated Output Current (A)	8.5	10.5	13.5	12.5	15	22.5	20.5	22
AC Nominal Voltage (V)	240	240	208	240	240	208	240	240
AC Output Voltage Range (V)	211-264	211-264	183-229	211-264	211-264	183-229	211-264	211-264
AC Frequency Range (Hz)	59.3-60.5	59.3-60.5	59.3-60.5	59.3-60.5	59.3-60.5	59.3-60.5	59.3-60.5	59.3-60.5

MECHANICAL SPECIFICATIONS

MODEL	PVP2000	PVP2500	PVP2800	PVP3000	PVP3500	PVP4600	PVP4800	PVP5200
Inverter with Factory-Integrated AC and DC PV System Disconnect								
NEMA 3R Steel Enclosure, Wall Mounted with Bracket Included								
Temperature	-25°C to 40°C							
Weight (lbs) with Disconnect	92.5	106.5	106.5	106.5	120.5	162	162	162
Inverter with Disconnect Dimensions	30 3/8" H x 15 5/8" W x 8 1/4" D	30 3/8" H x 15 5/8" W x 8 1/4" D	30 3/8" H x 15 5/8" W x 8 1/4" D	30 3/8" H x 15 5/8" W x 8 1/4" D	30 3/8" H x 15 5/8" W x 8 1/4" D	35" H x 18 1/8" W x 8 5/8" D	35" H x 18 1/8" W x 8 5/8" D	35" H x 18 1/8" W x 8 5/8" D

AGENCY APPROVALS

MODEL	PVP2000	PVP2500	PVP2800	PVP3000	PVP3500	PVP4600	PVP4800	PVP5200
-------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

UL 98 13th Edition, UL 1741 Nov 2005 Revision, CSA C22.2 107.1 2006 Revision, IEEE 1547 Compliant, FCC Class A & B

ANEXO B

Modelo do módulo fotovoltaico

New Zero Tolerance
Greater Field Performance

210 WATT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC MODULE



KD210GX-LPU

NEC 2008 Compliant
UL 1703, Class C
IEC 61215





CUTTING EDGE TECHNOLOGY

As a pioneer with 35 years in solar, Kyocera demonstrates leadership in the development of solar energy products. Kyocera's *Kaizen* Philosophy, commitment to continuous improvement, is shown by repeatedly achieving world record cell efficiencies.

Kyocera Quality Built In:

- New frame technology allows for end mounting with 2400 Pa (50 psf) or wind speeds of 130 mph (ASTM E1830) and traditional mounting under 5400 Pa (113 psf) to support increased snow load
- UV stabilized, aesthetically pleasing black anodized frame
- Supported by major mounting structure manufacturers
- Easily accessible grounding points on all four corners for fast installation
- Proven junction box technology
- Quality locking plug-in connectors to provide safe & quick connections

Kyocera manufactures and assembles solar cells and modules at its own worldwide production sites using a true vertical integration process. This superior approach gives Kyocera complete control over every step of the manufacturing process, producing modules with the industry's tightest power tolerance, promising high quality and efficiency.

- Superior Built-In Quality
- Proven Superior Field Performance
- Tight Power Tolerance
- 25 Year Warranty
- 5 Year Workmanship Warranty

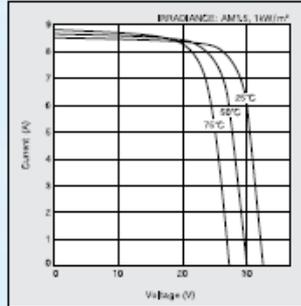


SOLAR by KYOCERA

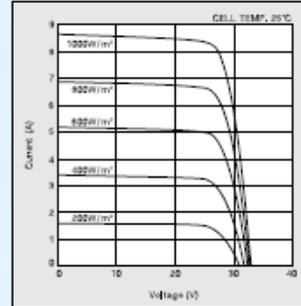
KD210GX-LPU

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KD210GX-LPU at various cell temperatures



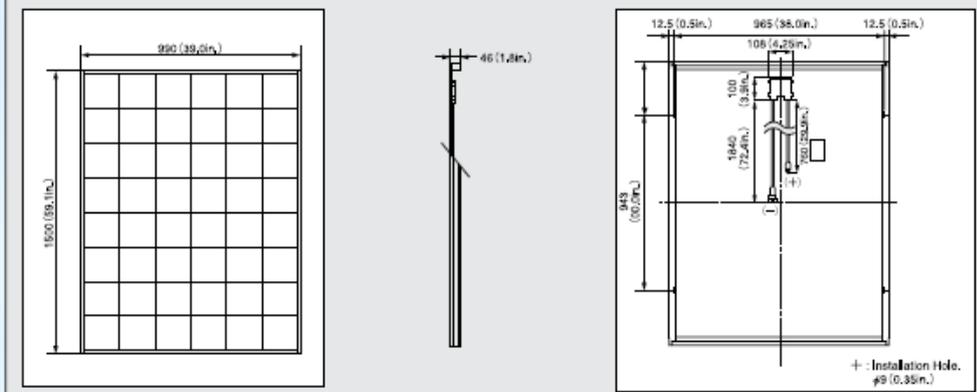
Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KD210GX-LPU at various irradiance levels



SPECIFICATIONS

Physical Specifications

Unit : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)

Maximum Power (Pmax)	210W (+5W/-0W)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.6V
Maximum Power Current (Impp)	7.90A
Open Circuit Voltage (Voc)	33.2V
Short Circuit Current (Isc)	8.58A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	-1.20×10 ⁻¹ V/°C
Temperature Coefficient of Isc	5.15×10 ⁻³ A/°C

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, cell temperature 25°C

Electrical Performance at 800W/m², *NOCT, AM1.5

Maximum Power (Pmax)	149W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	23.6V
Maximum Power Current (Impp)	6.32A
Open Circuit Voltage (Voc)	30.0V
Short Circuit Current (Isc)	6.62A

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47.5°C

ISO 9001 and ISO 14001 Certified and Registered

www.kyocerasolar.com
800-223-9580 toll free 800-523-2329 fax

Cells

Number per Module	54
-------------------	----

Module Characteristics

Length × Width × Depth	1500mm(59.1in.)×990mm(39.0in.)×44mm(1.7in.)
Weight	18kg(39.7lbs.)
Cable	φ1760mm(69.3in.)×1840mm(72.4in.)

Junction Box Characteristics

Length × Width × Depth	100mm(3.9in.)×108mm(4.2in.)×35mm(1.4in.)
IP Code	IP65

Others

*Operating Temperature	-40°C ~ 90°C
Maximum Fuse	15A

*This temperature is based on cell temperature.



ANEXO C

Piranômetro fotovoltaico



Measure shortwave radiation



This version of our standard pyranometer is designed for industrial dataloggers that measure 4-20 mA of current.

This is a silicon-cell pyranometer, calibrated to measure total shortwave radiation. Total shortwave radiation is the amount of energy put out by the sun. This has applications in many areas from solar power monitoring to agriculture and evapotranspiration rates. The evaporation of water from soil and the transpiration of water from plant leaves are largely determined by the intensity of shortwave radiation, which is measured in Joules per meter squared per second or Watts per meter squared.

Related Products

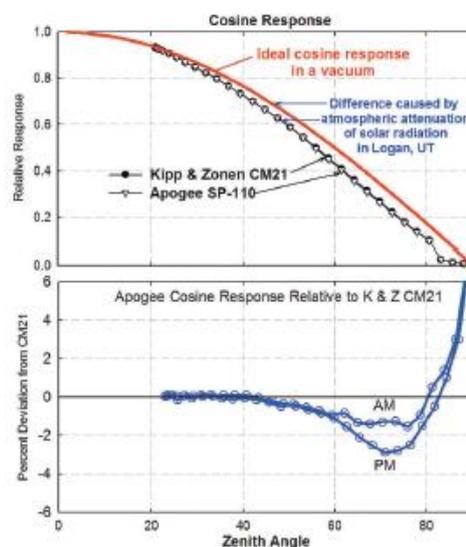


AL-100
A plate used to keep the sensor head level.

This cosine-corrected sensor is designed to maintain its accuracy when radiation comes from low zenith angles. This accuracy is shown in the graph below.

The SP-214 closely matches the Kipp & Zonen CM21.

The cosine response and accuracy of the pyranometer have met with the high standards of Campbell Scientific, one of the world's leaders in environmental measurements.



Specifications

Cosine Response

- 45° zenith angle: $\pm 1\%$
- 75° zenith angle: $\pm 5\%$

Absolute Accuracy

- $\pm 5\%$

Repeatability

- $\pm 1\%$

Output

- 4 - 20 mA (18.1 mA = full sunlight 1100 W m⁻²)

Long-Term Drift

- Less than 3% per year

Operating Environment

- -25 to 55 C
- 0 to 100% relative humidity
- Designed for continuous outdoor use
- Can be submerged in water

Current Draw

- 20 mA = 1250 W m⁻²
- 2 mA = quiescent current
- 22 mA = max current at 1250 W m⁻²

Materials

- Anodized aluminum with cast acrylic lens

Mass

- 140 g (with 5 m lead wire)

Cable

- 5 meters of twisted-pair wire
- Foil shield
- Santoprene jacket
- Ending in pigtail leads
- Additional cable is available in multiples of 5 meters

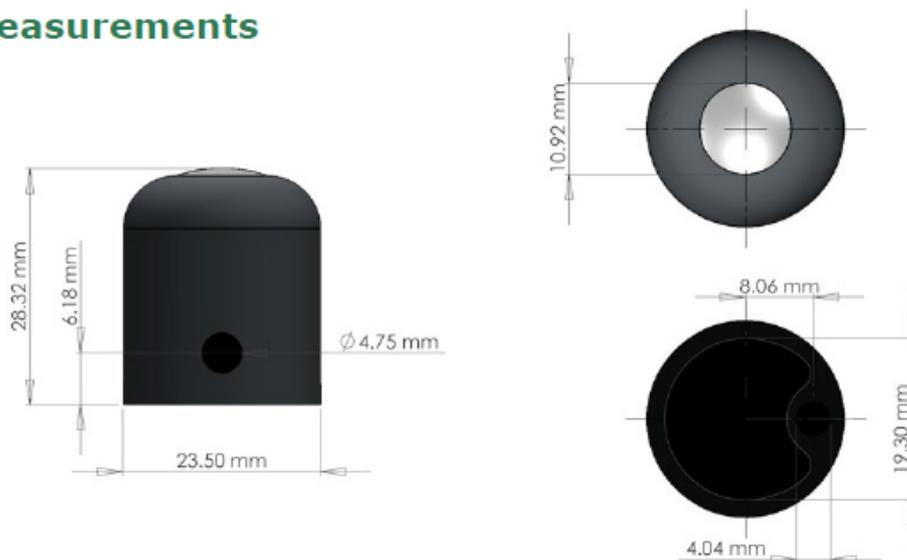
Dimensions

- 2.85 cm diameter by 2.83 cm height

Warranty

- 1 year against defects in materials and workmanship

Measurements



Scan to call us

apogee

www.apogeeinstruments.com



Scan for more information
on UV sensors

ANEXO D

Datalogger 4-20mA

EL-USB-4

4-20mA Current Loop USB Data Logger

FEATURES

- 4-20mA current loop measurement range
- Logging rates between 1s and 12hr
- Stores 32,510 readings
- Connection via two screw terminals
- USB interface for set-up and data download
- User-programmable alarm thresholds
- Status indication via red and green LEDs
- Supplied with replaceable internal lithium battery and Windows control software



ORDERING INFORMATION

Standard Data Logger (Data Logger, Software on CD, Battery)	EL-USB-4
Replacement Battery	BAT 3V6 1/2AA
Replacement Cap	USB-CAP-4-20

This standalone data logger measures and stores up to 32,000 current loop readings over a 4-20mA measurement range. The user can easily set up the logging rate and start time, and download the stored data by plugging the data logger into a PC's USB port and running the purpose designed software under Windows 2000, XP, Vista & 7. The data can then be graphed, printed and exported to other applications. The data logger is supplied complete with a long-life lithium battery. Correct functioning of the unit is indicated by a flashing red and green LED. The data logger features a pair of screw terminals and is supplied complete with a set of measurement leads terminating in crocodile clips.

Specifications	Minimum	Typical	Maximum	Unit
0-40mA d.c. measurement range	4		20	mA d.c.
Internal resolution		0.05		mA d.c.
Accuracy (overall error)		±1		% ±1count
Logging rate	every 1s		every 12 hr	-
Operating temperature range	-35 (-31)		+80 (+176)	°C (°F)
1/2AA 3.6V Lithium Battery Life		1*		Year

* depending on ambient temperature, logging rate and use of alarm LEDs.

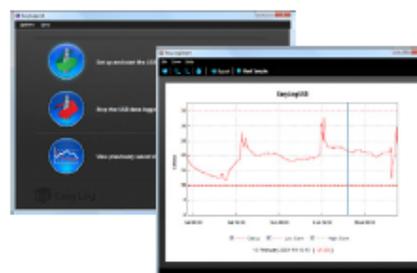
EL-WIN-USB (CONTROL SOFTWARE)

Lascar's EasyLog USB control software is supplied free of charge with each data logger. Easy to install and use, the control software runs under Windows 2000, XP, Vista & 7. The software is used to set-up the data logger as well as download, graph and export data to Excel.

The software allows the following parameters to be configured:

- Logger name
- Logging rate (1s, 10s, 1m, 5m, 30m, 1hr, 8hr, 12hr)
- High and low alarms
- Start date and start time

The latest version of the control software may be downloaded free of charge from www.lascarelectronics.com



www.lascarelectronics.com



EL-USB-4

4-20mA Current Loop USB Data Logger

LED FLASHING MODES

EL-USB-4 features a red and a green LED.

By default hold is disabled. In this mode the red LED will no longer continue to flash after the logged reading has returned to normal from an alarm condition.

Hold can be turned on via the control software. In this mode the red LED that indicates an alarm condition will continue to flash, even after the logged reading has returned to normal. This feature ensures that the user is notified that an alarm level has been exceeded, without the need to download the data from the logger.

 <p>Green LED Red LED</p>	♂	Green single flash (10 seconds) The data logger is currently logging. No alarm.
	♂	Green single flash (20 seconds) The data logger is currently logging. No alarm. However, the battery is low and should be replaced before logging important data.
	♂	Green single flash (30 seconds) The data logger is not currently logging, but is primed to start at a later date and time (delayed start).
	♂♂	Green double flash (20 seconds) The data logger is full and has stopped logging. No alarm.
	♂♂	Red single flash (10 seconds) The data logger is currently logging. Low alarm.
	♂♂	Red single flash (20 seconds) The data logger is currently logging. Low alarm. However, the battery is low and should be replaced before logging important data.
	♂♂♂	Red double flash (10 seconds) The data logger is currently logging. High alarm.
	♂♂♂	Red double flash (20 seconds) The data logger is currently logging. High alarm. However, the battery is low and should be replaced before logging important data.
	♂♂♂♂	Red/Green single flash (20 seconds) The data logger is full and has stopped logging. Alarm (high, low or both).
	○	No LEDs flash The data logger is stopped, the battery is empty or there is no battery fitted.

EL-USB-4

4-20mA Current Loop USB Data Logger

DIMENSIONS

All dimensions in mm (inches)



CONNECTION AND APPLICATIONS

