

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

KARLA SUZANE VAN-DALL MACHADO
NICOLI CORREA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA EM CURITIBA.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

KARLA SUZANE VAN-DALL MACHADO
NICOLI CORREA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA EM CURITIBA**

Trabalho de conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA
2015

**Karla Suzane Van-Dall Machado
Nicoli Corrêa**

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA EM CURITIBA

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 Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 23 de novembro de 2015

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Gerson Maximo Tiepolo, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Annemarle Gehrke Castagna, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, as pessoas que mais amamos neste mundo e que sempre nos incentivaram e apoiaram em nossas escolhas.

AGRADECIMENTOS

Concluir o curso de graduação em Engenharia Elétrica é um sonho tornando-se realidade, conquistar esse título é a maneira mais sensata de dizermos OBRIGADO a todos que estiveram presentes nestes 5 anos.

Agradecemos primeiramente a Deus que nos deu o dom da vida, nos iluminou nesta caminhada e nos concedeu oportunidades de conhecer e conviver com diversas pessoas ao longo desta trajetória.

Aos nossos pais, pelo incentivo, carinho e amor dedicado sempre, mesmo quando estávamos ausentes e focados no nosso objetivo.

A todos os amigos e familiares que mesmo não participando da nossa vida acadêmica, nos apoiaram e estiveram de braços abertos para nos dar suporte.

Aos nossos professores que contribuíram para nossa formação e principalmente aos membros da banca que nos ajudaram a aprimorar este trabalho que finaliza essa jornada.

Ao nosso orientador Jair Urbanetz Júnior pela amizade, dedicação e paciência dispensada ao grupo, estando sempre presente ao longo deste trabalho.

**“Por mais longa que seja a caminhada, o
mais importante é dar o primeiro passo.”**

(Vinícius de Moraes)

RESUMO

MACHADO, Karla Suzane Van-Dall; CORREA, Nicoli. Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica em Curitiba. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O desenvolvimento sustentável é uma busca incessante da sociedade brasileira atual, e tem contribuído para disseminar a utilização de fonte renováveis e menos poluentes de energia. Dentre as fontes disponíveis nesse contexto está a energia solar que pode ser utilizada através de sistemas fotovoltaicos. Esses sistemas podem ser encontrados de duas formas distintas: isolados (SFVI) ou conectados à rede elétrica pública (SFVCR). Eles possuem um diferencial bastante importante para a diversificação da matriz elétrica brasileira pela capacidade de atuar como geração distribuída sem a necessidade de espaço físico extra na edificação. O foco deste trabalho é o estudo de dois SFVCR's instalados na cidade de Curitiba: o sistema do Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que é um modelo de edificação sustentável e foi o primeiro sistema a entrar em operação no estado; e o segundo é o sistema da ELCO Engenharia, o primeiro SFVCR homologado pela concessionária COPEL de acordo com a Resolução nº482/2012 da ANEEL. Este trabalho apresenta a análise de desempenho desses dois sistemas através de alguns índices como: *Yield*, *Performance Ratio* e Fator de Capacidade, conhecidos como índices de mérito, além de um breve levantamento dos SFVCR's em operação no estado do Paraná.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Energia Solar Fotovoltaica, Geração Distribuída, Índices de Mérito.

ABSTRACT

MACHADO, Karla Suzane Van-Dall; CORREA, Nicoli. The Analysis of Performance of the Photovoltaics Connected to public mains in Curitiba. 61 p. Final Paper (Electrical Engineering), University Federal Technology of Paraná. Curitiba, 2015.

The sustainable development is a search which never ends in the actual Brazilian society, and it has contributed to disseminate the use of renewable energies and less polluting energy. Among the available power supplies in this context is the solar energy that can be obtained through photovoltaic systems. These systems can be found in two distinct ways: isolated (SFVI) or connected to public mains (SFVCR). Therefore, they are the most valuable for the diversification of Brazilian electric matrix for the capacity of how it acts in distributed generation without the necessity of an extra place in the building. The focus of this assignment is the study of two SFVCR's installed in Curitiba's city: the system of Green Office (EV) of the University Federal Technology of Paraná (UTFPR), there is a model of sustainable construction and it was the first system to operate in Parana; and the second is the ELCO Engineering system, the first SFVCR approved by COPEL in accordance with 482/2012 Resolution on ANEEL. This assignment presents the analysis of performance of these two systems through some topics as: Yield, Performance Ratio e Capacity Factor, they know as indexes of merit, as well as a brief gathering of the SFVCR's in operation in Parana State.

Key-words: Photovoltaics Systems, Photovoltaics Solar Energy, Distributed Generation, Indexes of Merit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.	14
Figura 2 - Movimento de rotação e translação da Terra.	16
Figura 3 - Tipos de radiação.	17
Figura 4 - Piranômetro termoeletrico.	18
Figura 5 - Piranômetro fotovoltaico.	19
Figura 6 – Pireliômetro.	19
Figura 7 - Estruturas moleculares dos semicondutores P e N.	22
Figura 8 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.	23
Figura 9 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.	25
Figura 10 - Sistema Fotovoltaico Isolado.	27
Figura 11 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.	29
Figura 12 – Detalhe dos módulos da Elcosul.	36
Figura 13 – Módulos da Elcosul.	36
Figura 14 - Fachada do EV.	37
Figura 15 - Painel fotovoltaico do EV.	38
Figura 16 - Tela inicial do RADIASOL para a estação EV UTFPR 2015.	40
Figura 17 - Tela de ajustes e resultados do RADIASOL para a estação EV UTFPR 2015.	41
Figura 18 - Fachada da empresa ELCO.	44
Figura 19 - Painel fotovoltaico ELCO.	45
Figura 20 - Inversores Xantrex instalados na ELCO.	46
Figura 21 - Tela inicial do RADIASOL para a estação ELCO 2015.	47
Figura 22 - Tela de ajustes e resultados do RADIASOL para a estação ELCO 2015. .	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades de irradiância/irradiação.....	20
Tabela 2 – Sistemas em operação no Paraná.	32
Tabela 3 - Produtividade EV.....	42
Tabela 4 - Taxa de desempenho EV.....	43
Tabela 5 - Fator de capacidade EV.....	43
Tabela 6 - Produtividade ELCO.	49
Tabela 7 - Taxa de desempenho ELCO.....	50
Tabela 8 - Fator de capacidade ELCO.	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Potência instalada no Paraná.....	35
Gráfico 2 - Geração do EV.....	39
Gráfico 3 - Irradiação no plano horizontal.	40
Gráfico 4 - Irradiação no plano inclinado do EV.....	41
Gráfico 5 - Geração ELCO.....	47
Gráfico 6 - Irradiação no plano inclinado da ELCO.	48

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
BEN – Balanço Energético Nacional;
CA – Corrente Alternada;
CC – Corrente Contínua
C_F – Fator de Capacidade;
CGEE - Centro De Gestão Estudos Estratégicos;
COPEL – Companhia Paranaense de Energia;
CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito;
EPE - Empresa De Pesquisa Energética;
EV – Escritório Verde;
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia;
SFVCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede;
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná;
Y_F – *Final Yield* (Produtividade);

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
1.1.	TEMA	7
1.1.1.	DELIMITAÇÃO DO TEMA	8
1.2.	PROBLEMAS E PREMISSAS	8
1.3.	OBJETIVO	9
1.3.1.	OBJETIVO GERAL	9
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.4.	JUSTIFICATIVA	10
1.5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	10
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1.	ENERGIA SOLAR.....	13
2.2.	RADIAÇÃO SOLAR.....	14
2.2.1.	CONCEITOS	14
2.2.2.	TIPOS DE RADIAÇÃO	17
2.2.3.	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	17
2.2.4.	IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO	20
2.3.	ENERGIA FOTOVOLTAICA	21
2.3.1.	BREVE HISTÓRIA.....	21
2.3.2.	EFEITO FOTOVOLTAICO.....	22
2.4.	COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	23
2.4.1.	CÉLULAS.....	23
2.4.2.	MÓDULOS.....	25
2.4.3.	INVERSORES	26
2.5.	CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	26

2.5.1.	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO	27
2.5.2.	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA.....	28
2.6.	ÍNDICES DE MÉRITO	30
3.	LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SFVCR'S NO PARANÁ	32
3.1.	PANORAMA ATUAL DOS SFVCR'S NO PARANÁ.....	32
3.2.	ESCRITÓRIO VERDE UTFPR	37
3.2.1.	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	38
3.2.2.	GERAÇÃO.....	39
3.2.3.	IRRADIAÇÃO	39
3.2.4.	ÍNDICES DE MÉRITO.....	42
3.3.	ELCO	44
3.3.1.	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	45
3.3.2.	GERAÇÃO.....	46
3.3.3.	IRRADIAÇÃO	47
3.3.4.	ÍNDICES DE MÉRITO.....	49
4.	ANÁLISES COMPARATIVAS E CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

As buscas por fontes alternativas de energia estão sendo pesquisadas pelos cientistas desde o século XIX a fim de minimizar os aspectos socioambientais decorrentes da implantação de usinas comumente usadas, como por exemplo, hidráulica e térmica. Desde a descoberta do efeito fotovoltaico, neste mesmo século pelo físico Edmund Bequerel, se aposta na energia solar por ser menos depreciadora do meio ambiente. Naquela época os elevados custos impossibilitavam o usufruto desta novidade, porém atualmente, com o surgimento de novas tecnologias o preço vem tornando-se mais acessível e os investimentos na energia fotovoltaica começam a se destacar no cenário nacional. Estudos internacionais comprovam que as futuras gerações dependerão de 70% dessa energia num total de 90% de energias renováveis, o que leva a crer que o Brasil ainda investirá muito na exploração deste recurso (CGEE, 2010).

No Brasil ainda há o problema de posicionamento político sobre o tema, não havendo um grande incentivo do governo no que diz respeito ao uso de energia solar. No entanto, em 2012 um grande passo foi dado para o desenvolvimento dessa tecnologia: a publicação da Resolução nº 482 pela ANEEL, a qual estabelece as condições gerais para que as micro ou minigerações tenham acesso aos sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). A partir de então, as universidades passaram a expor mais o tema e impulsionar os estudos dentro de vários âmbitos.

A criação do Escritório Verde (EV) é um exemplo do comprometimento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em divulgar, tanto para os estudantes quanto para a comunidade em geral, a importância e a necessidade de começar a colocar em prática atitudes mais sustentáveis. Esse escritório foi planejado desde sua concepção para ser um edifício altamente sustentável e didático, aspirando mostrar ao público que pequenas soluções podem gerar resultados significativos (Escritório Verde, 2015).

Para isso foram adotados vários recursos e tecnologias que visam preservar o meio ambiente, diminuir a emissão de poluentes e ainda assim atender as finalidades para as quais foi projetado, sendo um desses recursos a geração de energia através de módulos fotovoltaicos instalados na cobertura da construção, que suprem quase toda a demanda energética do edifício e que serão objetos de estudo nesse trabalho (Escritório Verde, 2015).

1.1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esse trabalho de conclusão de curso consistiu em dar continuidade aos estudos de desempenho dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) instalados na cidade de Curitiba. Para isso, durante o ano de 2015, foram analisados dois sistemas que já se encontram em operação: o primeiro é o SFVCR do EV e o outro é o da ELCO Engenharia de Montagens Ltda.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Sabe-se que no Brasil os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica necessitam de incentivos e investimentos para, efetivamente, integrarem a matriz energética nacional (CÂMARA, 2011). Surge assim, a necessidade de estudos mais direcionados ao tema.

Em Curitiba foram instalados alguns sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica que estão em vigência, destacando-se dois para o estudo: o do EV da UTFPR e a instalação da empresa ELCO.

O objetivo inicial deste trabalho é realizar uma análise dos índices de mérito do SFVCR destes dois locais comparando-os quanto a capacidade de geração e avaliando se o nível de produtividade está dentro do esperado. Para isto, deve-se considerar a seguinte premissa: identificar se o desempenho desses sistemas é satisfatório para o modo de operação em que se encontra.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a utilização da energia solar, através de painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica e realizar o acompanhamento dos índices de mérito dos sistemas instalados no Escritório Verde da UTFPR e na ELCO, baseado em literaturas específicas, com o intuito de analisar o desempenho desses sistemas na cidade de Curitiba.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar as características e configurações dos sistemas fotovoltaicos conectadas à rede elétrica;
- Realizar a coleta dos dados de geração dos sistemas a serem estudados;
- Fazer o levantamento dos valores de irradiância e determinar os valores de irradiação para a cidade de Curitiba;
- Realizar a estimativa e o acompanhamento da energia esperada e da energia real gerada;
- Calcular os índices de mérito para os dois sistemas, de modo que eles possam ser comparados com instalações semelhantes;
- Analisar a atual situação dos sistemas, no que diz respeito ao seu desempenho, identificando fatores relevantes para otimizar a geração de energia elétrica;
- Fazer um levantamento atualizado dos SFVCR em operação no estado do Paraná.

1.4. JUSTIFICATIVA

Não é difícil perceber que o poder de aquisição das pessoas vem aumentando cada vez mais e não somente dos brasileiros, mas a nível mundial. Como praticamente tudo o que se adquire atualmente depende da eletricidade, fica visível que esse crescimento acarreta também em um disparo da demanda energética mundial.

O aumento dessa demanda e suas características, como os horários de ponta, tornam cada vez mais difícil o fornecimento da energia elétrica com qualidade e de forma contínua. Os sistemas fotovoltaicos, que serão os objetos de estudo desse trabalho, são por diversas razões uma excelente alternativa para resolver esse problema. Um dos pontos mais importantes dos SFVCR é o fato de que podem ser instalados junto à edificação, não precisando de espaço extra ou de linhas de transmissões para que a energia gerada chegue até os consumidores.

O Brasil, apesar de ser um país com dimensões territoriais e índices de irradiação muito favoráveis, tem aproveitado pouco deste recurso abundante. Esse trabalho pretende enfatizar a importância do uso da energia fotovoltaica no meio urbano, buscando um desenvolvimento em maior escala dessa fonte.

Inserido nesse contexto, pode-se constatar que o desenvolvimento deste projeto resultará em dados que permitirão comparar os sistemas estudados com outros sistemas de localidades e configurações diferentes. Os resultados também serão importantes para mostrar o quão produtivo esses sistemas podem ser em Curitiba e incentivar os investimentos nessa tecnologia.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a execução desse trabalho foram definidos os procedimentos a seguir:

- Levantamento da bibliografia relacionada ao assunto, contando com o apoio de livros, artigos, trabalhos técnicos e a análise dos projetos já existentes na área.

- Coleta dos dados de geração do EV durante o ano de 2015, através do site <<https://www.mypvpower.com/dashboard/976>>, juntando-os aos dados já levantados dos anos de 2012, 2013 e 2014.
- Coleta dos dados de geração da ELCO desde que o sistema entrou em operação, ou seja, os dados referentes aos anos de 2013, 2014 e 2015, contando com as informações armazenadas e fornecidas pela empresa.
- Levantamento dos valores de irradiância solar em Curitiba através dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para então, determinar os valores de irradiação no local.
- Estudo do *software* RADIASOL, a fim de definir os valores de irradiação correspondentes a cada um dos sistemas a serem estudados, de acordo com a inclinação e o desvio azimutal em que se encontram.
- Utilização dos dados levantados para calcular os índices de mérito dos SFVCR, cuja principal função é possibilitar a comparação de sistemas e verificar se seu funcionamento está de acordo com o esperado ou não.
- Identificação dos SFVCR's em operação no estado do Paraná para o levantamento de suas características, como potência instalada, localização e tempo de funcionamento, a fim de comparar o panorama atual com anos anteriores e analisar o crescimento dessa tecnologia.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho é dividido de acordo com a seguinte estrutura:

- Introdução – O primeiro capítulo apresenta o tema, sua delimitação, os problemas e premissas, objetivos e a metodologia aplicada na realização do trabalho;
- Referencial Teórico – Revisão bibliográfica, dos estudos ligados a utilização e instalação de painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica, caracterização dos SFVCR e índices de mérito;

- Levantamento e análise de desempenho de SFVCR's no Paraná – Levantamento das características de sistemas atualmente em operação no estado do Paraná e análise de desempenho dos dois sistemas que são foco deste trabalho, o SFVCR do EV e da ELCO, apresentando os dados obtidos através dos índices de mérito em relação ao ano de 2015;
- Análises comparativas e conclusões – Neste capítulo são apresentados os dados confrontados e analisados através dos índices de mérito, assim como as conclusões pertinentes ao estudo realizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ENERGIA SOLAR

Com o aumento da demanda energética e o esgotamento dos recursos naturais, cresce cada vez mais a busca por fontes renováveis e não poluentes, ou seja, que não dependam de recursos limitados pela natureza e que durante a sua exploração produzam impactos reduzidos ao meio ambiente. Uma das energias que abrange todos esses aspectos é a solar, que nesse contexto torna-se uma alternativa bastante promissora.

Não se pode afirmar que a energia solar seja uma fonte infinita, mas estudos afirmam que ela ainda poderá ser utilizada por cerca de 8 bilhões de anos, podendo então ser considerada como inesgotável para o ser humano (VILLALVA;GAZOLI, 2013). Além disso, essa é a principal fonte de energia do nosso planeta, dando origem a várias outras e suprindo a demanda energética mundial, com apenas 12 minutos de incidência (RÜTHER, 2004).

Os principais motivos para explorar esse recurso são: diminuir a dependência do mercado de petróleo, reduzindo a emissão de gases poluentes na atmosfera e tornar o país menos vulnerável à instabilidade dos recursos hídricos, visto que atualmente mais de 60% da energia elétrica gerada no Brasil é proveniente das usinas hidrelétricas, como mostra a Figura 1.

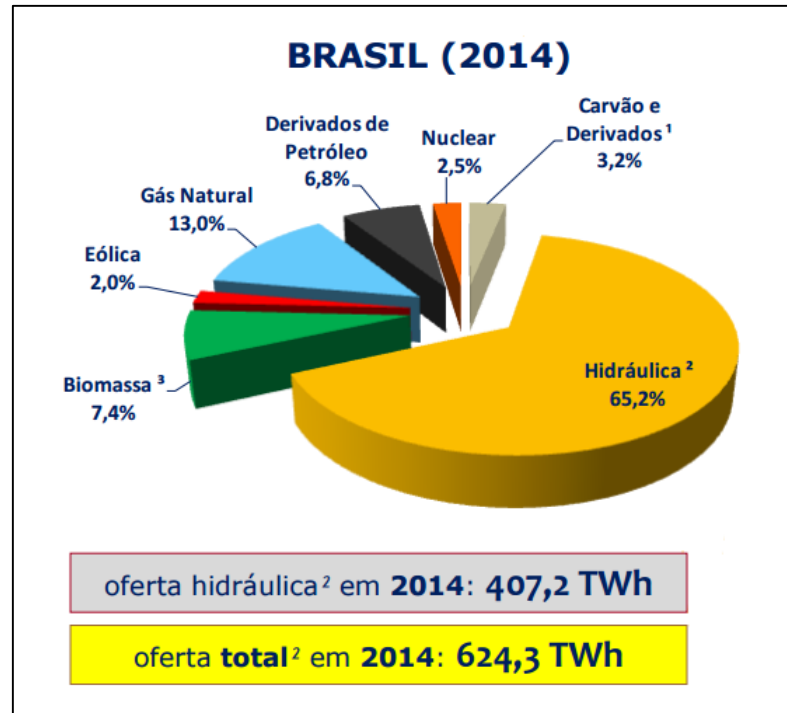


Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.

Fonte: EPE, 2015.

A energia solar pode ser utilizada principalmente de duas formas distintas: a térmica, baseada na quantidade de energia que um corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor, a partir da radiação que incide sobre ele, e a fotovoltaica que consiste na transformação direta de energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico e que será melhor explicada no decorrer deste trabalho (PINHO;GALDINO, 2014).

2.2. RADIAÇÃO SOLAR

2.2.1. CONCEITOS

A atmosfera deve possuir um equilíbrio térmico para manter os seres vivos. Assim, a radiação solar é o principal elemento para o clima na superfície terrestre.

Há dois tipos de incidência de onda: visível e invisível aos olhos humanos, o que depende de sua faixa de frequência e de seu comprimento de onda. As visíveis

compreendem as ondas de 10^{-6} m, nas quais encontram-se as cores básicas: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e o violeta. Já as invisíveis são: infravermelhos, raios-X, ultravioleta, micro-ondas e ondas de rádio (VILLALVA, 2013).

Observa-se assim, que a radiação depende da velocidade, frequência e comprimento de onda distintas uma das outras. Para isto, há a relação da frequência com a energia emitida que pode ser observada na relação de Planck ou também conhecida por equação Planck- Einstein explícita na Equação 1:

$$E = h.f \quad (1)$$

Onde:

E é a energia oriunda da onda, expressada em joules (J) ou elétrons-volt (eV);

h é a constante de Planck que vale aproximadamente $6,636.10^{-34}$ Joule-segundo (J.s)

f é a frequência da onda estudada expressada em Hertz (Hz)

Nota-se que a energia da onda está diretamente interligada com a frequência, sendo uma relação matemática inversa, ou seja, quanto maior a frequência menor será a energia proveniente. (VILLALVA, 2013).

Já a relação da velocidade, frequência e comprimento de onda no espaço é expressa pela Equação 2:

$$c = \lambda.f \quad (2)$$

Onde:

c é a constante de velocidade da onda no espaço equivalente a 300000m/s;

λ é comprimento de onda medido em metros (m);

f é a frequência (Hz);

Segundo a ANEEL (2015) a quantidade absorvida da radiação solar também depende da localização na superfície e do tempo (hora do dia e dia do ano) devido aos movimentos de rotação e translação da Terra mostrados na Figura 2. (VILLALVA, 2013).



Figura 2 - Movimento de rotação e translação da Terra.

Fonte: ANEEL,2015.

As diversas alterações nas características da radiação solar, dependem da composição e da espessura da camada atmosférica, conhecida como Massa de Ar. A espessura dessa massa de ar resulta da distância que a radiação solar direta percorre até a superfície e, esta distância por sua vez, depende do ângulo de inclinação do Sol em relação a vertical local (Zênite), conhecido como ângulo zenital do Sol (θ).

A massa de ar é representada pela letra AM e para ângulos zenitais de 0° a 70° pode ser definida pela Equação 3, que considera a Terra plana (PINHO;GALDINO, 2014).

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (3)$$

De acordo com Pinho e Galdino (2014), alguns ângulos possuem denominações específicas, como por exemplo: AM0 define a massa de ar no topo da atmosfera (radiação extraterrestre), AM1 representa a massa de ar quando o Sol encontra-se no zênite (ângulo zenital igual a zero) e AM1,5 é utilizado para uma massa de ar cuja espessura é 50% maior que AM1.

2.2.2. TIPOS DE RADIAÇÃO

A classificação da radiação é baseada na forma com que ela atinge o solo após a interferência do ambiente. Se a radiação não sofrer nenhum tipo de desvio através de espalhamento, absorção ou reflexão é conhecida como direta. Para os raios que incidem em nuvens e são absorvidos ou espalhados por partículas em suspensão denomina-se difusa. E por fim, a porção que é absorvida após a reflexão em superfícies inclinadas chama-se albedo. As três componentes ilustradas na Figura 3 compõem a radiação total que incide no solo (URBANETZ, 2014).

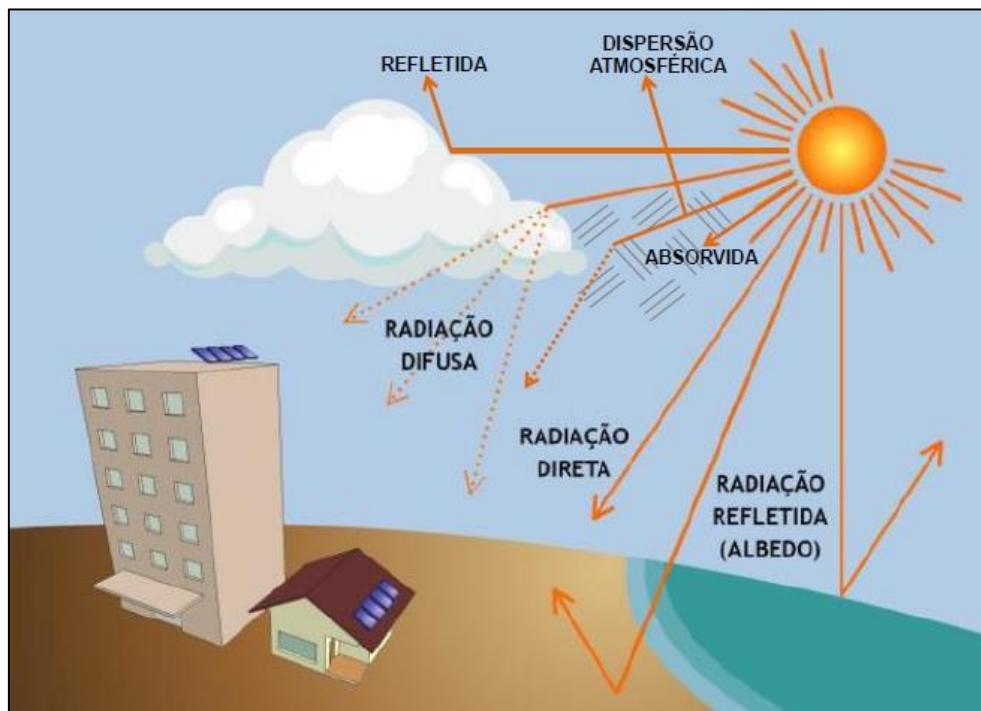


Figura 3 - Tipos de radiação.

Fonte: URBANETZ, 2014.

2.2.3. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições de radiação solar são formas importantes para auxiliar nos estudos de influência climática em projetos de aproveitamento desta energia, como por exemplo, a instalação de sistemas fotovoltaicos. Durante o projeto desses

sistemas é importante analisar e obter alguns dados para avaliar a viabilidade da implantação: o primeiro é o local a ser instalado, analisando se nessa localização é ou não possível captar os raios necessários para a geração; o segundo é o dimensionamento do painel para a área estudada; e o terceiro é o cálculo de produção de energia.

O objetivo da medição dos dados solares é a obtenção experimental do valor instantâneo do fluxo energético solar (irradiância) ou integrado (irradiação) ao longo de tempo (minuto, hora, dia ou ano) (PINHO; GALDINO, 2014).

Os principais equipamentos utilizados para medição são: o piranômetro e o pireliômetro.

- Piranômetro: é o instrumento utilizado para obter a radiação global (direta+difusa) quando instalado no plano horizontal e a radiação total (direta+difusa+albedo) quando instalado em um plano inclinado. Sua composição varia de acordo com o modelo do equipamento: termoeletrico ou o fotovoltaico. O termoeletrico compõe-se por sensor de termopilha colocado no interior de duas semiesferas de vidro concêntricas e fornece medidas mais precisas, com a desvantagem de seu elevado custo, conforme na Figura 4. Já no fotovoltaico, o elemento sensor é uma célula fotovoltaica normalmente de silício monocristalino e de pequenas dimensões, ilustrado na Figura 5. Este modelo apresenta maior sensibilidade apesar das medidas menos precisas e é bastante utilizado devido ao seu baixo custo comparado aos termoeletricos.

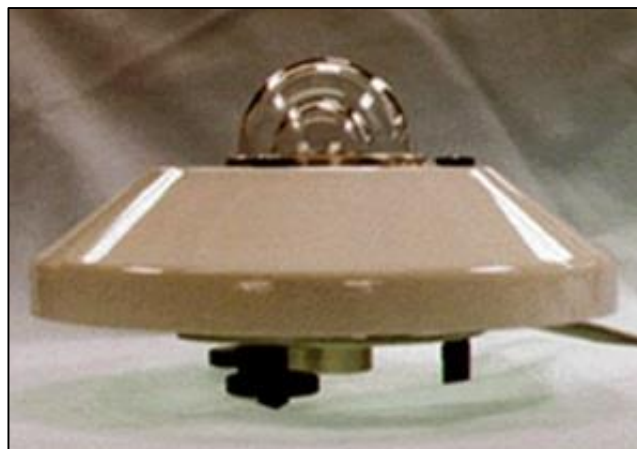


Figura 4 - Piranômetro termoeletrico

Fonte: CRESESB, 2006.



Figura 5 - Piranômetro fotovoltaico.

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

- Pireliômetro: é o instrumento responsável por medir a radiação direta, constitui-se por um sensor embutido em um tubo com uma pequena abertura para a luz entrar, ele tem funcionalidade somente na radiação direta pois é a única que alcança este sensor. Este instrumento identificado na Figura 6 segue o movimento do sol para focalizar e aproveitar a entrada de luz no sensor.



Figura 6 – Pireliômetro.

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

2.2.4. IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO

Quando se fala em radiação solar pode-se estar mencionando a irradiância ou a irradiação. Muitos livros descrevem irradiância e irradiação com a mesma definição, porém não levam em consideração se a radiação é instantânea ou integrada. A seguir serão apresentadas as definições necessárias para distinguir estes dois termos de acordo com a NBR 10899 de 2006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- Irradiância solar (G) – Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado (W/m^2).
- Irradiação Solar (I ou H) – Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente em uma hora ou um dia, medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado (Wh/m^2 ou J/m^2).

Estas definições implicam a dizer que a irradiação deriva da irradiância e que, ambas possuem um papel fundamental na quantificação da radiação solar. Estas grandezas podem ter várias derivações, para conhecimento são mostradas na Tabela 1 as conversões de irradiância e irradiação.

Tabela 1 - Unidades de irradiância/irradiação.

Para converter de:	Para:	Multiplique por:
cal.cm²/min.	W/m²	697,8
W/m²	cal.cm ² /min.	0,00
W/m²	mcal/cm ² .s	0,02
MJ/m².dia	kWh/m ² .dia	0,28
Langley/dia	kWh/m ² .dia	0,01
cal/cm²	J/cm ²	4,19
cal/cm²	kWh/m ²	0,01
J/cm²	cal/cm ²	0,24
J/cm²	kWh/m ²	0,00
kWh/m²	cal/cm ²	85,99
kWh/m²	J/cm ²	360,00
Langley	cal/cm ²	1,00

Fonte: Adaptado de PINHO; GALDINO, 2014.

2.3. ENERGIA FOTOVOLTAICA

2.3.1. BREVE HISTÓRIA

No ano de 1839, Edmond Becquerel, verificou uma pequena diferença de potencial em placas metálicas, isso acontecia quando placas de platina ou prata eram mergulhadas em um eletrólito e expostas à luz. Observou-se então, pela primeira vez, o efeito fotovoltaico.

Anos depois, dois inventores norte-americanos observaram o mesmo efeito no Selênio e por volta de 1877, criaram o primeiro aparato capaz de produzir eletricidade a partir da luz, porém, a eficiência de conversão alcançada por essas células era inferior a 1%, extremamente baixa.

Em 1953, Calvin Fuller passou a dopar cristais de silício, introduzindo impurezas, a fim de controlar suas propriedades elétricas. Nessa mesma época Gerald Pearson, estudando essas barras de silício dopado, criou o que seria a primeira célula solar de silício, desta vez com uma eficiência bastante elevada, 4%. Com o passar dos anos e com a evolução dos estudos, essas células foram sendo aperfeiçoadas e atingiram uma eficiência de 6%, sendo apresentada à *National Academy of Sciences*, em Washington, no dia 25 de abril de 1954 e patenteada logo depois.

A primeira aplicação dessas células foi para alimentar uma rede telefônica local, mas sua utilização foi impossibilitada pelo alto custo de fabricação. Porém, em 1958 a NASA incorporou um painel em seu satélite, a princípio como fonte de reserva, mas o funcionamento dessa tecnologia foi tão satisfatório que cresceu rapidamente, sendo o principal fator dessa expansão a corrida ao espaço que acabava de começar (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Com o passar dos anos e com a evidência cada vez maior das alterações climáticas, os investimentos em programas e motivações para o uso dessa energia vem crescendo até hoje de forma acelerada, assim como a eficiência e qualidade das tecnologias utilizadas. Atualmente o silício é o semicondutor mais usado na fabricação dessas células, pois apesar de não ser o mais eficiente, trata-se de uma matéria prima barata e abundante em nosso planeta.

2.3.2. EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade (VILLALVA; GAZOLI, 2013). Este fenômeno pode ser visto em semicondutores, ou seja, materiais que possuem quatro elétrons na camada de valência e que se combinam formando uma estrutura cristalina, praticamente isenta de elétrons livres.

Tal efeito acontece quando uma lâmina de um semicondutor é primeiramente dopada com impureza trivalente, ou seja, com elementos que possuem três elétrons na camada de valência e que ao se combinarem com o silício formam um material com falta de elétrons (excesso de lacunas), material tipo P.

Em seguida, nessa mesma lâmina, é feita a difusão de impureza pentavalente, ou seja, de elementos que possuem cinco elétrons na camada de valência e que na combinação com o silício formam um material com excesso de elétrons, material tipo N. A estrutura desses dois tipos de materiais é apresentada na Figura 7.

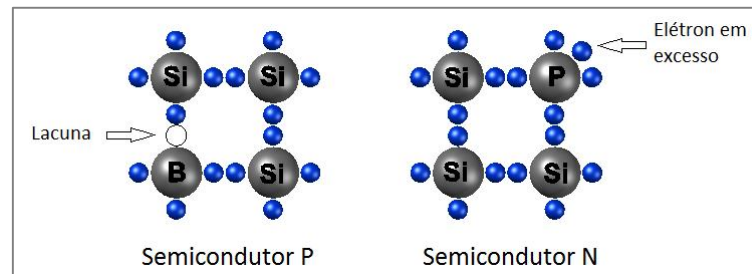


Figura 7 - Estruturas moleculares dos semicondutores P e N.

Fonte: Adaptado de VILLALVA e GAZOLLI, 2013.

Esses dois tipos de materiais quando estão em contato formam uma junção chamada PN que, ao ser atingida pelo fóton, gera uma diferença de potencial entre as duas faces da lâmina. Ao existir um caminho fechado de material condutor entre essas duas faces, surge então a circulação de corrente elétrica.

2.4. COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

2.4.1. CÉLULAS

A célula é o dispositivo elementar desses sistemas, responsável pela conversão direta de energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Sua construção é baseada na mesma junção PN de materiais semicondutores explicada anteriormente, porém com algumas particularidades para melhorar seu funcionamento conforme a Figura 8 que será explicada a seguir.

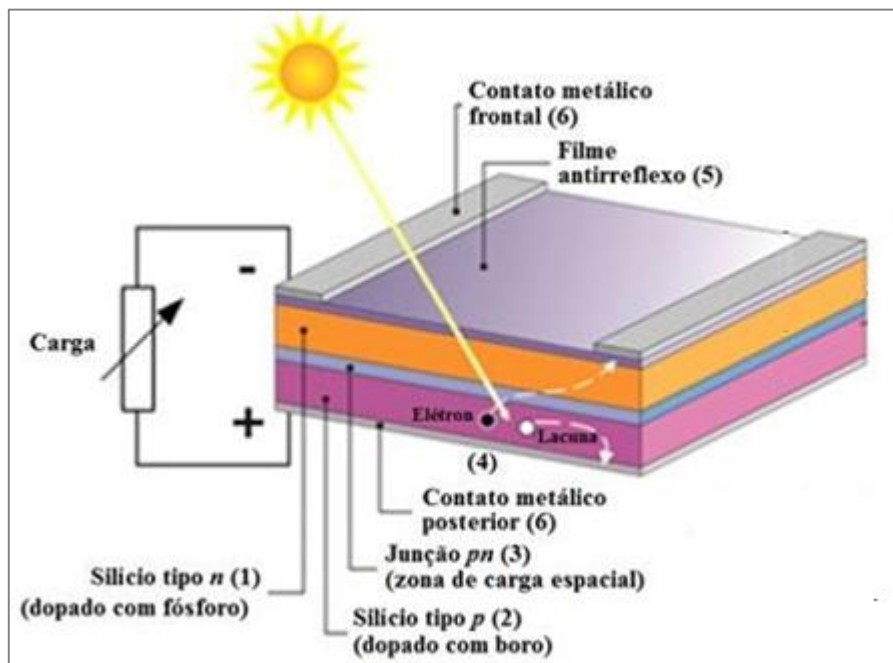


Figura 8 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.

Fonte: PINHO;GALDINO,2014.

O contato superior é composto por duas partes: uma grade metálica impressa na célula e também por uma camada de material antirreflexivo. A primeira constitui um caminho para os elétrons foto gerados da camada N e deve ser extremamente fina para diminuir ao máximo o sombreamento, já a segunda serve para evitar a reflexão e aumentar a quantidade de luz absorvida pela célula. Na parte inferior também existe um contato metálico, basicamente composto por uma película de alumínio ou prata,

que junto com os terminais elétricos, é responsável por criar um circuito fechado para a circulação da corrente.

Dentre as várias tecnologias disponíveis no mercado para a fabricação desses dispositivos está a tecnologia de silício cristalino, usando lâminas espessas que causam uma limitação na redução de custos, mas que ainda assim representa cerca de 90% da produção mundial e pode ser dividida em dois tipos:

- Silício monocristalino (m-Si): são as mais eficientes disponíveis no mercado, alcançando eficiência de 14 a 17%, em contrapartida é a célula que tem o maior custo de produção, principalmente pelo alto consumo de energia no seu processo de fabricação;
- Silício policristalino (p-Si): esse tipo de célula passa por um processo mais simples e menos preciso de produção, resultando em um custo de fabricação menor. Porém, as imperfeições desse material acabam diminuindo a conversão fotovoltaica e, a eficiência dessas células fica entre 13 e 16% (URBANETZ, 2015).

Uma outra opção disponível é a tecnologia de filmes finos que, apesar de ser bastante recente e ter pouca presença no mercado, tem um potencial altíssimo de redução de custos, visto que a quantidade de material empregado é muito baixa. Porém, um ponto que dificulta sua difusão é a baixa eficiência das células e, conseqüentemente, a grande área demandada para sua instalação. Esta alternativa no geral, tem uma ótima aparência estética e pode ser empregada a partir de diversos materiais como, por exemplo:

- Silício amorfo (a-Si): foi a primeira tecnologia de filmes finos desenvolvida e, apesar de sua baixa eficiência de conversão (6 a 8%), é bastante utilizada em aplicações arquitetônicas, principalmente pelo seu bom desempenho como material de revestimento;
- Telureto de cádmio (CdTe): vem se destacando e tende a se tornar um sério competidor no mercado, com eficiência de 7 a 10%, seu principal atrativo é o baixo custo para produção em grande escala e seu principal problema é a toxicidade do cádmio (Cd) e a raridade do telúrio (Te);
- CIGS (cobre-índio-gálio-selênio): dentre as tecnologias de filmes finos, esse é o mais eficiente (9 a 11%) e também é um forte competidor no mercado, mas assim como o CdTe também tem problemas com pouca abundância e toxicidade (URBANETZ, 2015).

2.4.2. MÓDULOS

No caso da tecnologia de filmes finos, os módulos são formados através da deposição de materiais sobre uma base rígida ou flexível, e então são feitos cortes a laser no material depositado para delimitar as células. Já quando se trata da tecnologia de silício cristalino, o módulo fotovoltaico é um conjunto de células empacotadas e montadas sobre uma estrutura rígida, conforme a Figura 9.

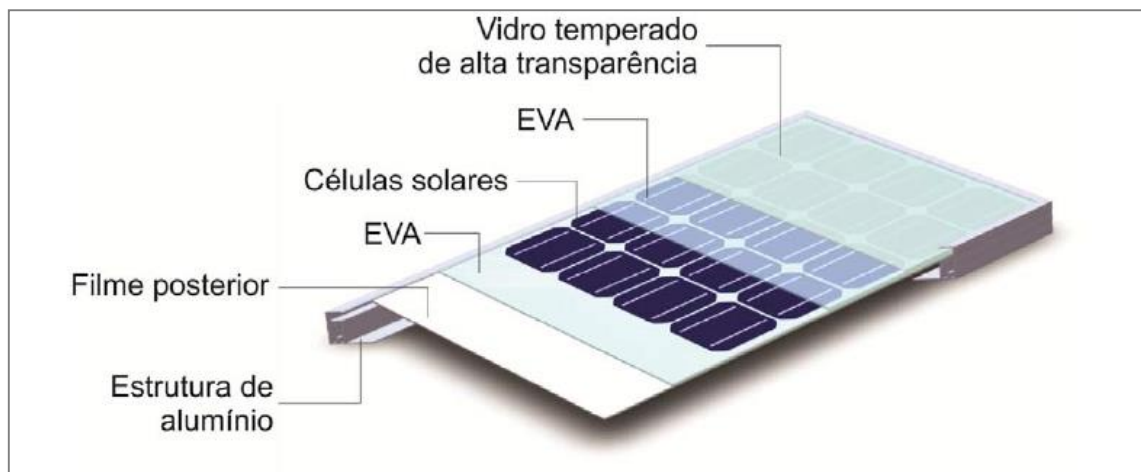


Figura 9 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.

Fonte: PINHO;GALDINO, 2014.

Um módulo pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, associação esta que depende dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina (PINHO; GALDINO, 2014). Cada célula fornece aproximadamente 0,6V e são comumente ligadas em série para aumentar a tensão de saída do módulo. Já a corrente fornecida por cada célula depende muito da sua área e da quantidade de luz captada, sendo necessário conectá-las em paralelo para aumentar a corrente fornecida à carga.

2.4.3. INVERSORES

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, porém a maioria das cargas de residências, comércios e indústrias são alimentadas em corrente alternada. Para que essa energia gerada seja amplamente utilizada é necessário converter tensão e corrente contínua (CC) em tensão e corrente alternada (CA), e isso é possível utilizando-se um equipamento eletrônico conhecido como inversor.

Atualmente existem vários tipos de inversores, os quais são especificados conforme o sistema em que serão utilizados. No caso de sistemas isolados, o inversor recebe a energia acumulada nas baterias, transforma a tensão contínua em uma onda senoidal sem qualquer referência externa, pois afinal trata-se de um sistema isolado.

Uma outra forma de utilização desses equipamentos é em sistemas conectados à rede elétrica, nos quais existe uma interconexão entre o inversor e a rede pública, portanto, a tensão CA de saída do inversor deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados as cargas a serem alimentadas (PINHO; GALDINO, 2014). Para fazer esse paralelismo de geradores, existem dois tipos de inversores mais utilizados: aqueles que usam o sinal da rede para a sincronização e aqueles que utilizam um circuito eletrônico interno para a mesma finalidade, chamados de auto-comutados.

Com o passar do tempo, a complexidade dos sistemas aumentou e o processo de fabricação desses equipamentos evoluiu de tal modo que, atualmente, existem inversores com eficiência de até 97% que se tornam economicamente viáveis para muitas aplicações.

2.5. CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Existem duas categorias principais para os sistemas estudados nesse trabalho: isolados ou conectados à rede elétrica. De acordo com Pinho e Galdino (2014) ambos os casos podem operar apenas com fonte fotovoltaica ou combinados com outras fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A escolha da configuração a

ser utilizada depende principalmente da disponibilidade de recursos energéticos, da aplicação em questão e das restrições do projeto.

Mencionadas as diversas opções aplicáveis, é importante salientar que o foco desse estudo será o sistema puramente fotovoltaico, cujas principais configurações serão apresentadas e explicadas a seguir.

2.5.1. SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO

Esses sistemas também conhecidos como autônomos, são comumente utilizados em áreas sem acesso à rede elétrica como fazendas, ilhas e comunidades isoladas. Uma das principais vantagens é a substituição dos geradores movidos a combustíveis fósseis, fornecendo energia de forma mais silenciosa e menos poluente, já a principal desvantagem é o alto custo de manutenção dos componentes.

O esquema de montagem desse sistema é apresentado na Figura 10, indicando o caminho percorrido pela corrente elétrica do painel até a carga.

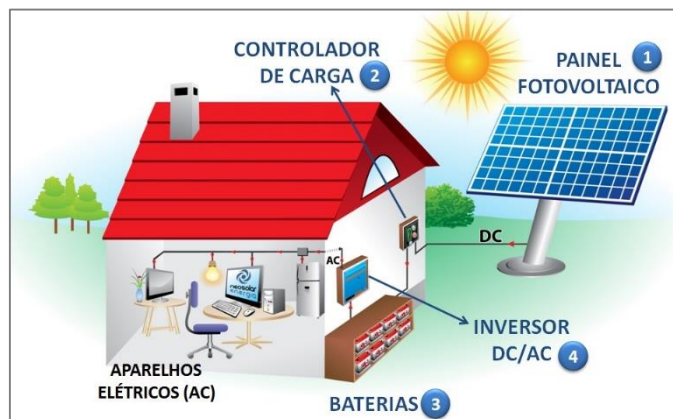


Figura 10 - Sistema Fotovoltaico Isolado.

Fonte: NEOSOLAR, 2015.

Existem Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) com vários tipos de armazenamento como, por exemplo, de energia potencial gravitacional, ou até mesmo sem armazenamento, usados em situações bastante restritas, quando o momento de geração coincide com o de consumo. Porém, na maioria dos casos esse armazenamento é feito através de baterias, suprindo a demanda de períodos em que a geração é baixa ou inexistente, além de evitar o desperdício da energia gerada em períodos de baixo consumo.

Para que não ocorra sobrecargas ou descargas excessivas na bateria, é necessário instalar um controlador de carga entre ela e o painel fotovoltaico, ajudando também a prolongar a vida útil do equipamento. A partir dessa configuração é possível alimentar cargas CC de maneira direta, pois ao contrário dos módulos, a tensão de saída da bateria é constante. Contudo, esses sistemas também são capazes de alimentar cargas CA, exigindo apenas a introdução de um inversor ao sistema, responsável por converter a tensão contínua em tensão alternada.

2.5.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Ao contrário dos sistemas isolados, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) são utilizados em lugares já atendidos pela rede elétrica, funcionando como usinas geradoras em paralelo com as grandes centrais e servindo principalmente para reduzir ou eliminar o consumo proveniente da rede pública. A energia produzida por esses sistemas é consumida em tempo real pela carga ou injetada na rede elétrica para que seja utilizada por outros consumidores do sistema de distribuição, dispensando assim o uso de acumuladores.

A Agência Nacional de Energia Elétrica classifica esses sistemas em três categorias, conforme o tamanho da instalação: microgeração para até 100kW, minigerção para potências entre 100kW e 1MW e usinas de eletricidade acima de 1MW. Essa última classe já havia sido regulamentada, porém, a conexão de micro e minigeradores com a rede elétrica só foi permitida após a Resolução nº 482 publicada pela ANEEL em 17 de abril de 2012.

De acordo com RÜTHER (2004), essas instalações apresentam duas configurações distintas. Uma delas é na forma de Geração Centralizada, cuja potência instalada é bastante elevada (MW) e o sistema é composto por uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos, fazendo com que a área ocupada seja significativamente grande. Isso faz com que esse tipo de configuração seja comumente encontrado em lugares mais afastados dos centros urbanos, caracterizando usinas de geração de energia que necessitam de transformadores e linhas de transmissão para que sejam conectadas ao sistema elétrico.

A segunda configuração é na forma de o Sistema Integrado à Edificação (BIPV – *Building Integrated Photovoltaics*), ou seja, aqueles instalados sobre a edificação, podendo constituir o seu envoltório.

Atualmente há uma terceira configuração conhecida como Sistema Aplicado à Edificação (BAPV – *Building Applied Photovoltaics*) na qual os módulos são aplicados sobre a edificação e não compõem o envoltório da construção.

Nas duas últimas configurações a geração está próxima ao ponto de consumo, eliminando gastos e perdas com linhas de transmissão. A potência instalada nesses casos costuma ser mais baixa (kW), pois visa basicamente a alimentação das cargas existentes na residência ou indústria onde o sistema fotovoltaico está instalado.

As análises feitas nesse trabalho são baseadas em Sistemas Aplicados à Edificação, cujo esquema de montagem é apresentado na Figura 11.

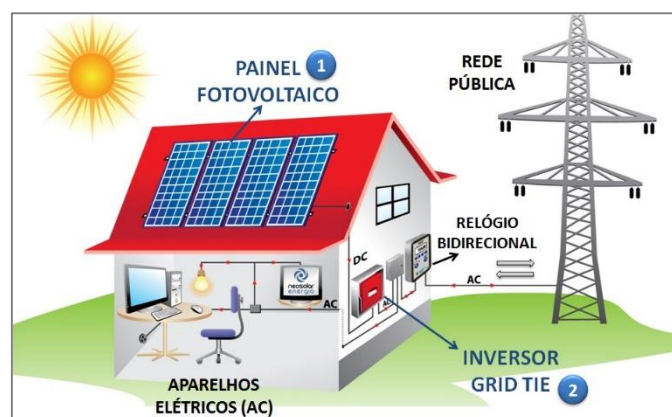


Figura 11 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

Fonte: NEOSOLAR, 2015.

Os principais componentes desse sistema são:

- Painel fotovoltaico: como já explicado anteriormente, é responsável por converter a energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.
- Inversor: converte a energia CC em CA para a alimentação das cargas e é responsável pelo sincronismo do sistema com a rede elétrica. Além disso, possui outra função de extrema importância, pois independente da configuração ou da potência instalada, o inversor deve se desligar automaticamente na ausência da rede elétrica, evitando o fenômeno conhecido como “ilhamento”. Essa medida é necessária para que, sob hipótese alguma, a energia gerada pelos módulos seja injetada na rede

enquanto esta estiver desconectada do sistema de geração central, garantindo assim a segurança de seus operadores.

- Medidor bidirecional: responsável por medir a energia consumida da rede elétrica pública nos momentos de baixa geração, assim como a energia injetada nela durante os momentos em que a geração do sistema fotovoltaico excede o consumo da instalação à qual pertence. Isso é necessário para que o micro ou minigerador possa participar do Sistema de Compensação de Energia, no qual o excedente injetado na rede é convertido em créditos de energia (kWh) para o consumidor, que poderá utilizá-los para abater o consumo na fatura dos próximos meses.

2.6. ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito são calculados individualmente para cada sistema através dos valores de energia gerada, potência instalada e irradiação incidente. São necessários para que se possa equalizar e comparar o desempenho de um SFVCR com outro sistema de características distintas ou que esteja instalado em outra localidade.

A. PRODUTIVIDADE OU *YIELD*

É a relação da energia gerada (kWh) também expressa pela integral da potência entregue ao sistema em um dado tempo medido por (kW) e a potência instalada (kWp) de cada módulo fotovoltaico do sistema. Esse índice está vinculado a um intervalo de tempo e quando calculado para um ano é obtido através da Equação 4.

$$Y_F == \frac{\int_0^{8760} P(t)dt}{P_N} = \frac{\text{Energia}}{\text{Potência instalada}} \text{ (kWh/kWp)} \quad (4)$$

O YF é a energia produzida no sistema no que diz respeito ao seu tamanho, consequentemente ele é uma maneira de comparar energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos de tamanhos diferentes (MARION; et al., 2005).

B. TAXA DE DESEMPENHO OU *PERFORMANCE RATIO*

É a relação entre a produtividade (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1.000W/m² incidentes no painel FV, normalmente vinculada a um ano de operação. Esta grandeza é expressa em porcentagem (URBANETZ; *et al.*, 2014a).

$$P_R = \frac{Y_F}{H(t)/G_{ref}} = \frac{Yield}{Irradiação/1000} (\%) \quad (5)$$

De outra forma pode-se também dizer que este valor representa o desempenho descontando as perdas existentes no sistema tais como: perdas nos inversores, nas conexões, e principalmente perdas devido à elevação da temperatura nos módulos devido à temperatura ambiente, entre outras perdas (TIEPOLO, 2015).

C. FATOR DE CAPACIDADE

É o índice em porcentagem que representa a capacidade de gerar energia sobre a energia nominal em um intervalo de tempo, normalmente um ano em horas. É o responsável pela comparação das diferentes fontes de energia e suas gerações. Nota-se que há uma relação entre o fator de capacidade e a produtividade, e esta relação (equação 6) é direta, ou seja, obtendo o valor da produtividade obtém-se o valor do fator de capacidade.

$$C_F = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_N \times T} = \frac{Y_F(h)}{8.760 h} = \frac{Energia}{Potência \times Tempo} (\%) \quad (6)$$

No Brasil os SFVCR's possuem C_F entre 13% e 18% variando de acordo com a disponibilidade do recurso solar e da tecnologia e forma de dimensionamento adotadas. (BENEDITO, 2009).

3. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SFVCR'S NO PARANÁ

3.1. PANORAMA ATUAL DOS SFVCR'S NO PARANÁ

Desde a divulgação de pesquisas realizadas sobre SFVCR, esse tipo de sistema vem ganhando visibilidade entre empresários e instituições. O aumento da demanda por fontes renováveis de energia vem impulsionando o uso desse recurso que, atualmente está presente em diversas cidades do estado, demonstrando que a região tem potencial para se tornar um grande produtor de energia fotovoltaica.

A Tabela 2 apresenta uma lista com os SFCR em operação no estado do Paraná de que se tem registro, apresentada na ordem cronológica de instalação das mesmas.

Tabela 2 – Sistemas em operação no Paraná.

Tipo	Cidade	Potência (kWp)	Data
Corporativo	Curitiba	2,1	dez-11
Corporativo	Curitiba	8,64	out-13
Residencial	Pinhais	2,3	out-13
Corporativo	Curitiba	2	dez-13
Corporativo	Curitiba	2,3	jan-14
Corporativo	Cascavel	1	jan-14
Residencial	Cascavel	3	jan-14
Residencial	Ponta Grossa	1,68	jan-14
Residencial	Curitiba	3,36	fev-14
Residencial	Francisco Beltrão	7,2	fev-14
Residencial	Maringá	2,4	fev-14
Residencial	Ponta Grossa	1,68	fev-14
Residencial	Foz do Iguaçu	1,9	mar-14
Residencial	Londrina	2,4	mai-14
Corporativo	Curitiba	8,34	mai-14
Residencial	Foz do Iguaçu	6	jun-14
Residencial	Curitiba	2	jul-14

Tipo	Cidade	Potência (kWp)	Data
Residencial	Curitiba	5	jul-14
Residencial	Curitiba	3,36	jul-14
Residencial	Curitiba	2,4	jul-14
Corporativo	Maringá	5	ago-14
Residencial	São José do Pinhais	3,36	ago-14
Residencial	Curitiba	2	ago-14
Residencial	Maringá	2	set-14
Corporativo	Curitiba	30,36	nov-14
Corporativo	São José dos Pinhais	4,8	nov-14
Corporativo	Cascavel	13	dez-14
Residencial	Cianorte	14	jan-15
Residencial	Foz do Iguaçu	3	jan-15
Residencial	Curitiba	1,5	jan-15
Corporativo	Umuarama	2,2	fev-15
Residencial	Curitiba	1,47	fev-15
Corporativo	Foz do Iguaçu	2,64	fev-15
Residencial	Curitiba	3,36	mar-15
Residencial	Arapoti	0,46	mar-15
Residencial	Curitiba	7,5	mar-15
Corporativo	Curitiba	20	mar-15
Residencial	Foz do Iguaçu	2	abr-15
Residencial	Foz do Iguaçu	1,7	abr-15
Residencial	Laranjeiras do Sul	2,5	abr-15
Residencial	Cascavel	3	abr-15
Residencial	Maringá	2,5	abr-15
Corporativo	Curitiba	20,16	mai-15
Corporativo	Campo Largo	3	abr-15
Corporativo	Curitiba	20,4	abr-15
Corporativo	Curitiba	50,4	jun-15
Residencial	Pinhais	3,75	jun-15
Residencial	Curitiba	2,2	jul-15
Corporativo	Curitiba	5	jul-15
Residencial	Curitiba	1,5	jul-15

Tipo	Cidade	Potência (kWp)	Data
Residencial	Curitiba	4,6	jul-15
Corporativo	Curitiba	1,5	jul-15
Corporativo	Cascavel	20	jul-15
Corporativo	Francisco Beltrão	5	jul-15
Residencial	Andirá	3	jul-15
Residencial	Florestópolis	1,5	jul-15
Residencial	Curitiba	0,46	ago-15
Residencial	Colombo	0,46	ago-15
Residencial	Curitiba	2	ago-15
Residencial	Curitiba	3	ago-15
Residencial	Curitiba	2	ago-15
Residencial	Chopinzinho	2	ago-15
Residencial	Foz do Iguaçu	7,5	ago-15
Residencial	Ampére	3	ago-15
Residencial	Maringá	2	ago-15
Residencial	Maringá	8,1	ago-15
Residencial	União da Vitória	1,5	ago-15
Residencial	Porto União	1,5	ago-15
Residencial	Pinhais	3	set-15
Residencial	Fazenda Rio Grande	1,25	set-15
Residencial	Curitiba	1,75	set-15
Residencial	Curitiba	3,75	set-15
Corporativo	Curitiba	3	set-15
Residencial	Foz do Iguaçu	4,6	set-15
Residencial	Ponta Grossa	4	set-15
Corporativo	Curitiba	3	set-15
Corporativo	Curitiba	3	set-15
Residencial	Curitiba	2	out-15
Residencial	Curitiba	3	out-15
Residencial	Pinhais	3	out-15
Corporativo	Curitiba	10	out-15
Residencial	Jataizinho	3	out-15
Residencial	Francisco Beltrão	4	out-15

Tipo	Cidade	Potência (kWp)	Data
Residencial	Foz do Iguaçu	4,2	out-15
Residencial	Foz do Iguaçu	6	out-15
Residencial	Foz do Iguaçu	3,6	out-15
Corporativo	Capanema	25	out-15
Corporativo	Maringá	4	out-15
Residencial	Maringá	8	out-15
Residencial	Maringá	5	out-15
Corporativo	Curitiba	10,2	out-15
Total		491,29 kWp	

Fonte: Dados provenientes de informação cinzenta coletada de maneira não formal.

O Gráfico 1 mostra a expansão da energia solar através de SFVCR's no estado, com os valores das potências adicionadas e com a potência acumulada ao longo dos anos, conforme os dados da Tabela 2.

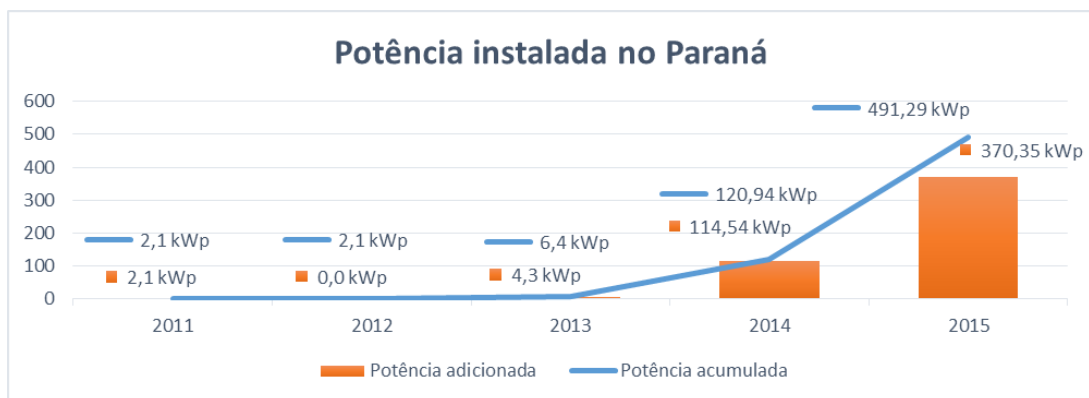


Gráfico 1 - Potência instalada no Paraná.

Fonte: Dados provenientes de informação cinzenta coletada de maneira não formal.

Dentro desses sistemas mostrados na tabela, destaca-se o da Elcosul Indústria e Comércio de Produtos Eletromecânicos por ser o maior existente no estado do Paraná, colocado em operação com o auxílio da empresa ELCO Engenharia e mostrado nas figuras 12 e 13. Esse sistema tem 50,4kWp de potência instalada, composto por 168 módulos fotovoltaicos policristalinos de 300W cada, conectados a 2 inversores de 20kW e um inversor de 10kW. O plano em que o painel se encontra possui desvio azimutal de 25° oeste e tem a inclinação ideal para sua localização, 25°.



Figura 12 – Detalhe dos módulos da Elcosul.

Fonte: ELCO Engenharia.



Figura 13 – Módulos da Elcosul.

Fonte: ELCO Engenharia.

3.2. ESCRITÓRIO VERDE UTFPR

O Escritório Verde é um projeto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná focado no desenvolvimento sustentável e que serve como um “laboratório vivo” aberto ao público para demonstração da ecoeficiência dos produtos e das tecnologias empregadas em sua construção. Esse modelo foi baseado nas universidades americanas e construído com a ajuda de empresas parceiras para envolver e incentivar os acadêmicos a reduzir impactos ambientais.



Figura 14 - Fachada do EV.

Fonte: ESCRITÓRIO VERDE, 2015.

Esta construção conta com diversas alternativas sustentáveis, como por exemplo a utilização de paredes duplas do sistema *wood-frame*, composto por madeiras tratadas de reflorestamento.

Outro ponto importante diz respeito à economia de energia elétrica, que conta com várias medidas como: o ecotelhado (aplicação de vegetação sobre a laje para isolamento acústico e térmico) que diminui a energia utilizada para refrigerar o ambiente, as lâmpadas de LED que possuem maior eficiência e o sistema fotovoltaico que gera energia de forma menos poluente e agressiva.

3.2.1. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O Sistema Fotovoltaico do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná é uma das instalações existentes na cidade de Curitiba mostrando a viabilidade destes sistemas no Brasil. Esta instalação é do tipo aplicada à edificação e nela é possível encontrar dois tipos de sistemas: o fotovoltaico isolado, e fotovoltaico conectado à rede. Neste estudo será abordado apenas o conectado à rede, que ocupa uma área de 15m² da cobertura e cujo funcionamento foi explicado anteriormente.

Seu sistema fotovoltaico entrou em funcionamento em dezembro de 2011 e consiste em um painel composto por 10 módulos Kyocera KD-210GX-LPU de 210 Wp cada, ligados em série e totalizando uma potência de 2,1kWp, conectado à rede elétrica, sem o uso de baterias, através de um inversor PVPOWERED modelo PVP2000 monofásico em 220V de 2kW de potência nominal (URBANETZ; *et al.*, 2014b). O painel em questão é apresentado na Figura 15 e corresponde ao assinalado em vermelho.



Figura 15 - Painel fotovoltaico do EV.

Fonte: ESCRITÓRIO VERDE, 2015.

3.2.2. GERAÇÃO

Os dados da energia gerada pelo sistema durante os anos de 2012, 2013 e 2014 já foram coletados em trabalhos anteriores e serão utilizados também nesse trabalho como forma de acompanhamento. Já os dados de janeiro a outubro de 2015 foram coletados mês a mês através do site <https://www.mypvpower.com/dashboard/976>, onde ficam armazenados os dados referentes ao sistema. A energia gerada em cada mês é apresentada no Gráfico 2.

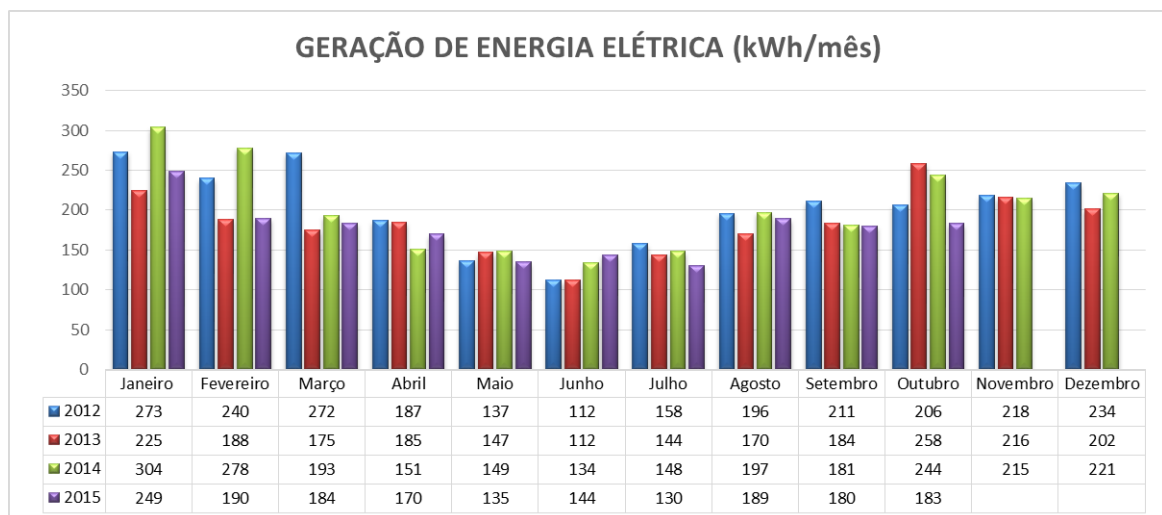


Gráfico 2 - Geração do EV.

Fonte: Adaptado de GEHRING; et al., 2014.

3.2.3. IRRADIAÇÃO

Como o piranômetro instalado no Bloco B da UTFPR - Câmpus Curitiba - Sede Centro entrou em operação há pouco tempo e ainda não possui um histórico de medição, foi necessário consultar o banco de dados do INMET procurando a estação mais próxima, utilizando-se então os dados referentes à estação A807 localizada em Curitiba-PR. Os dados fornecidos são os valores por hora da irradiância (kJ/m^2) no plano horizontal, por isso foi necessário converter e integrar esses valores para obter a irradiação diária média ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$) referente a cada mês analisado, apresentada no Gráfico 3.

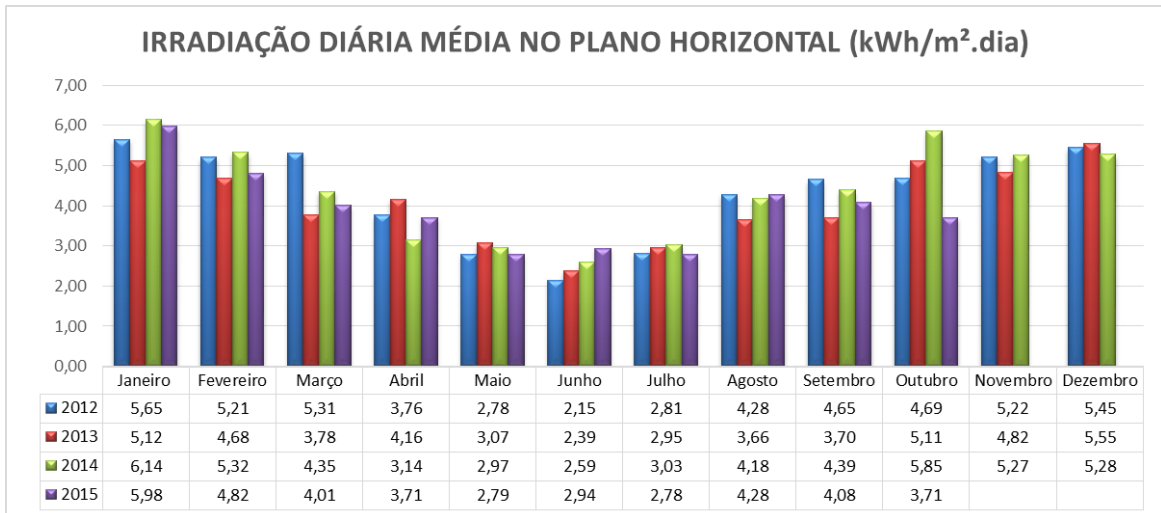


Gráfico 3 - Irradiação no plano horizontal.

Fonte: Dados fornecidos pelo INMET (exceto julho, agosto, setembro e outubro de 2014 que foram corrigidos a partir de dados do SIMEPAR).

Ao analisar o sistema é necessário saber também os valores da irradiação incidente no plano em que o painel se encontra e no caso do EV o plano é inclinado a 15° com desvio azimutal de 22° oeste (URBANETZ; *et al.*,2014a). Para obter esses valores utilizou-se o programa RADIASOL, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar do Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS, que a partir da inserção dos valores de irradiação no plano horizontal, permite identificar os valores de irradiação para qualquer plano.

A Figura 16 mostra a tela de entrada do RADIASOL, na qual foi criada uma estação para cada ano analisado, inserindo as coordenadas do local (latitude: -25,44° e longitude: -49,27°) e a irradiação média diária no plano horizontal para cada mês.

RADIÇÃO SOLAR

Selecione um país e uma estação

País:

Estação:

OK Editar Sair

Latitude: N/S: Longitude: E/W:

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,98	4,82	4,01	3,71	2,79	2,94	2,78	4,28	4,08	3,71	0,00	0,00

Radiação em kWh/m²

Figura 16 - Tela inicial do RADIASOL para a estação EV UTFPR 2015.

Fonte: Autoria própria.

Após criada cada estação é necessário inserir a inclinação e o desvio azimutal relativo ao plano do painel, como mostrado na Figura 17. O RADIASOL fornece então os resultados que podem ser apresentados na forma de gráfico ou tabela, de acordo com a opção do usuário.

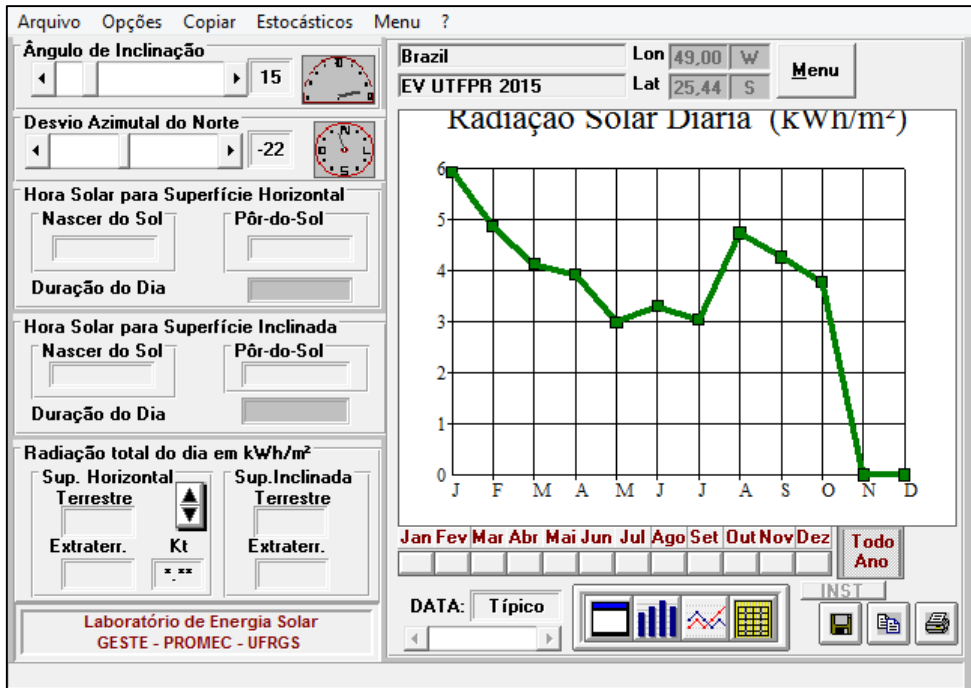


Figura 17 - Tela de ajustes e resultados do RADIASOL para a estação EV UTFPR 2015.

Fonte: Autoria própria.

Os valores encontrados para a irradiação média diária mensal incidente no EV são apresentados no Gráfico 4.

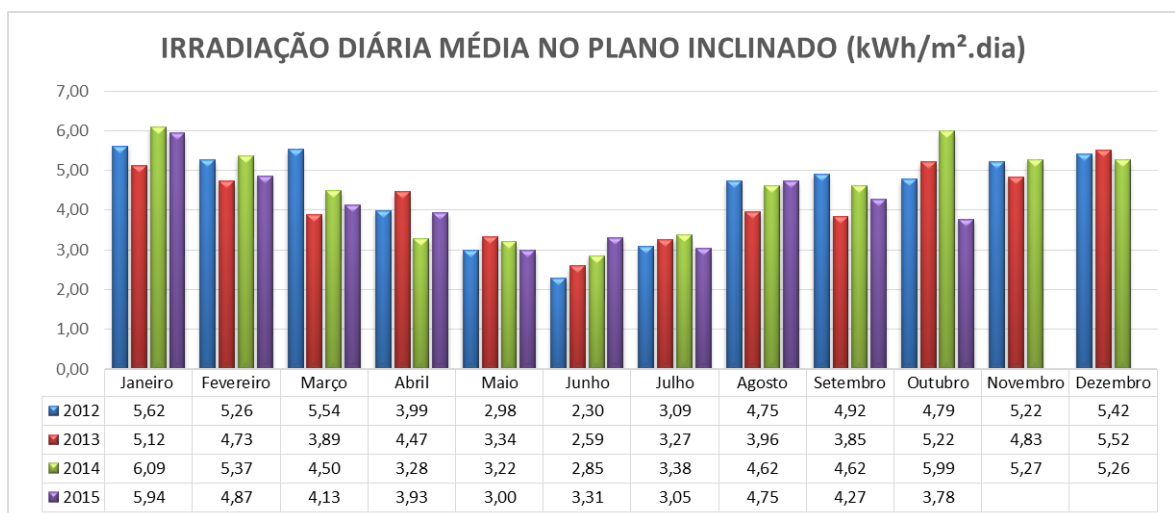


Gráfico 4 - Irradiação no plano inclinado do EV.

Fonte: Autoria própria.

3.2.4. ÍNDICES DE MÉRITO

A. PRODUTIVIDADE OU *YIELD*

A partir dos valores de geração apresentados no Gráfico 2 e utilizando a Equação 4 foi possível obter os valores de produtividade do EV, os quais são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Produtividade EV.

PRODUTIVIDADE (kWh/kWp)				
Mês	2012	2013	2014	2015
Janeiro	130,00	107,14	144,76	118,57
Fevereiro	114,29	89,52	132,38	90,48
Março	129,52	83,33	91,90	87,62
Abril	89,05	88,10	71,90	80,95
Mai	65,24	70,00	70,95	64,29
Junho	53,33	53,33	63,81	68,57
Julho	75,24	68,57	70,48	61,90
Agosto	93,33	80,95	93,81	90,00
Setembro	100,48	87,62	86,19	85,71
Outubro	98,10	122,86	116,19	87,14
Novembro	103,81	102,86	102,38	
Dezembro	111,43	96,19	105,24	
Anual	1163,81	1050,48	1150,00	

Fonte: Autoria própria.

B. TAXA DE DESEMPENHO OU *PERFORMANCE RATIO*

A partir da Equação 5 calculou-se as taxas de desempenho do sistema, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Taxa de desempenho EV.

TAXA DE DESEMPENHO (%)				
Mês	2012	2013	2014	2015
Janeiro	74,59%	67,54%	76,74%	64,41%
Fevereiro	74,89%	67,58%	87,99%	66,35%
Março	75,46%	69,12%	65,94%	68,39%
Abril	74,32%	65,74%	73,01%	68,59%
Maiο	70,52%	67,57%	71,15%	69,22%
Junho	77,29%	68,53%	74,68%	69,01%
Julho	78,62%	67,64%	67,34%	65,45%
Agosto	63,40%	65,88%	65,47%	61,13%
Setembro	68,11%	75,84%	62,20%	66,91%
Outubro	66,13%	75,92%	62,57%	74,43%
Novembro	66,24%	70,93%	64,72%	
Dezembro	66,33%	56,26%	64,55%	
Anual	71,33%	68,21%	69,70%	67,39%

Fonte: Aatoria própria.

C. FATOR DE CAPACIDADE

A partir da Equação 6 foi calculado o fator de capacidade para cada mês analisado, esses valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fator de capacidade EV.

FATOR DE CAPACIDADE (%)				
Mês	2012	2013	2014	2015
Janeiro	17,47%	14,40%	19,46%	15,94%
Fevereiro	16,42%	13,32%	19,70%	13,46%
Março	17,41%	11,20%	12,35%	11,78%
Abril	12,37%	12,24%	9,99%	11,24%
Maiο	8,77%	9,41%	9,54%	8,64%
Junho	7,41%	7,41%	8,86%	9,52%
Julho	10,11%	9,22%	9,47%	8,32%
Agosto	12,54%	10,88%	12,61%	12,10%
Setembro	13,96%	12,17%	11,97%	11,90%
Outubro	13,18%	16,51%	15,62%	11,71%
Novembro	14,42%	14,29%	14,22%	
Dezembro	14,98%	12,93%	14,14%	
Anual	13,25%	12,00%	13,16%	11,46%

Fonte: Aatoria própria.

3.3. ELCO

A ELCO é uma empresa com atuação na área de Engenharia Elétrica, Automação, Produção e Distribuição de fluídos industriais. Preocupados com a sustentabilidade, criaram em 2011 um departamento conhecido como Diretoria de Desenvolvimento em Energias Alternativas com foco em desenvolvimento de soluções e tecnologias na busca por um sistema de energia mais limpo.



Figura 18 - Fachada da empresa ELCO.

Fonte: ELCO, 2015.

A ação marcante desta empresa foi a construção de um laboratório para experimentos e estudos voltados ao desenvolvimento de soluções para geração distribuída. Esse monitoramento é feito atualmente através da instalação de um gerador híbrido, composto por um sistema eólico de 2,5kW e um sistema solar fotovoltaico de 8,64kWp conectado em paralelo com a rede da concessionária de energia (URBANETZ; *et al.*,2014b).

Os dados e resultados obtidos nesse acompanhamento são frequentemente fornecidos para pesquisas e trabalhos científicos, além de serem usados por estudos da própria empresa com o intuito de ser referência nesse ramo.

3.3.1. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O SFVCR da ELCO é o primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica no Paraná seguindo a Resolução nº482, foi homologado pela COPEL no dia 02 de outubro de 2013. O painel instalado de forma aplicada à edificação, ocupa uma área de 52m² de sua cobertura e está em funcionamento na configuração atual desde 2013.



Figura 19 - Paineis fotovoltaicos ELCO.

Fonte: ELCO, 2015.

O sistema compõe-se de 36 módulos Bosch de silício monocristalino, modelo C-SiM60EU30117, cada um com potência nominal de 240Wp. Esses módulos são ligados em 3 strings de 12 módulos em série, cada uma conectada a um inversor Xantrex modelo GT3.3 com 3.300W de potência nominal (URBANETZ; *et al.*,2014b).

A sala onde se encontram os três inversores, assim como os sistemas de medição e controle do sistema é mostrada na Figura 20.



Figura 20 - Inversores Xantrex instalados na ELCO.

Fonte: ELCO, 2015.

3.3.2. GERAÇÃO

Os dados da energia gerada pelo sistema durante os anos de 2013, 2014 e 2015 foram coletados através do link <https://mega.nz/#F%21IM0GHJCC%21WP6bPHxgLiyt12Or9erKow>, fornecido pela empresa, onde ficam armazenados os dados referentes à memória de massa do inversor. O monitoramento dos dados é feito em apenas um dos três inversores conectados ao sistema, portanto os valores foram multiplicados por três para que se tivesse a energia total gerada. Os valores obtidos para cada mês são apresentados no Gráfico 5.

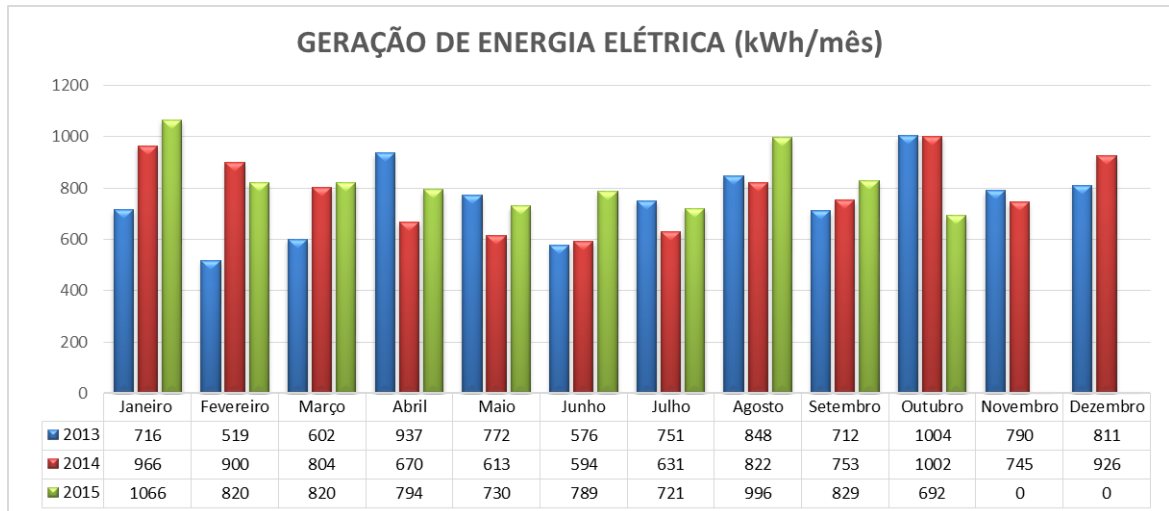


Gráfico 5 - Geração ELCO.

Fonte: Dados fornecidos pela ELCO Engenharia.

3.3.3. IRRADIAÇÃO

Como atualmente a ELCO não possui instrumentos de medição em suas instalações, os dados de irradiação no plano horizontal serão os mesmos utilizados para o EV, como mostrado no Gráfico 3.

Porém, a irradiação utilizada nos cálculos será obtida através do RADIASOL, criando uma estação para cada ano analisado, inserindo as coordenadas da empresa em questão (latitude: $-25,47^\circ$ e longitude: $-49,26^\circ$) e a irradiação média diária no plano horizontal para cada mês. A tela do RADIASOL para este caso é apresentada na Figura 21.

RADIÇÃO SOLAR

Selecione um país e uma estação

País:

Estação:

OK Editar Sair

Latitude: N/S: Longitude: E/W:

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,98	4,82	4,01	3,71	2,79	2,94	2,78	4,28	4,08	3,71	0,00	0,00

Radiação em kWh/m²

Sair do RADIASOL?

Figura 21 - Tela inicial do RADIASOL para a estação ELCO 2015.

Fonte: Autoria própria.

Após criada a estação para cada ano, foi necessário inserir a inclinação e o desvio azimutal relativo ao plano do painel, 20° e 32° oeste, respectivamente. A tela final do RADIASOL para este caso é mostrada na Figura 22.

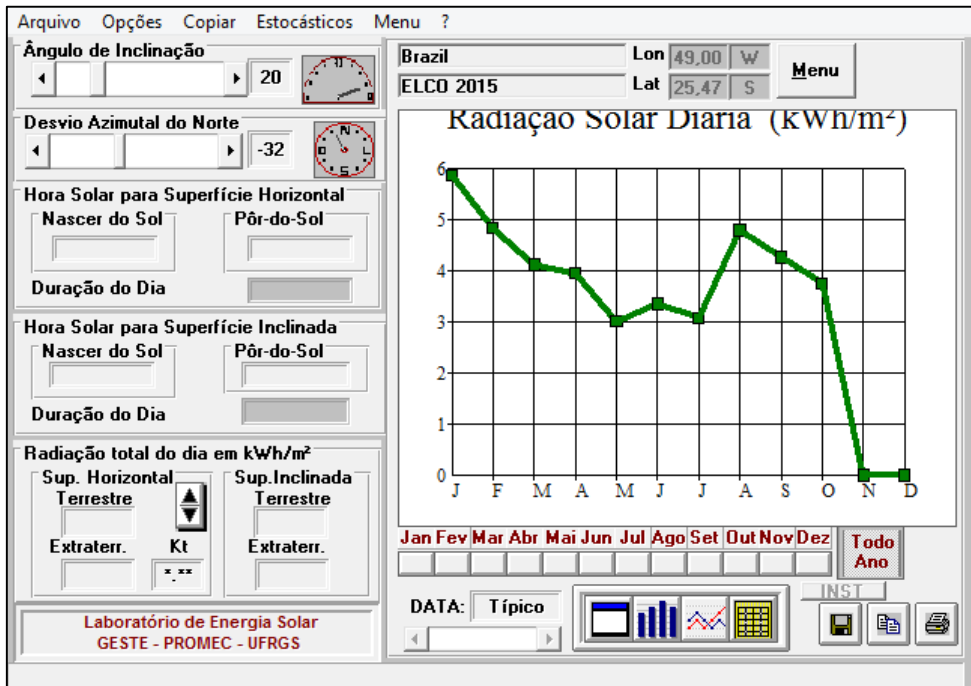


Figura 22 - Tela de ajustes e resultados do RADIASOL para a estação ELCO 2015.

Fonte: Autoria própria.

Os valores de irradiação média diária mensal encontrados para o painel da ELCO são apresentados no Gráfico 6.

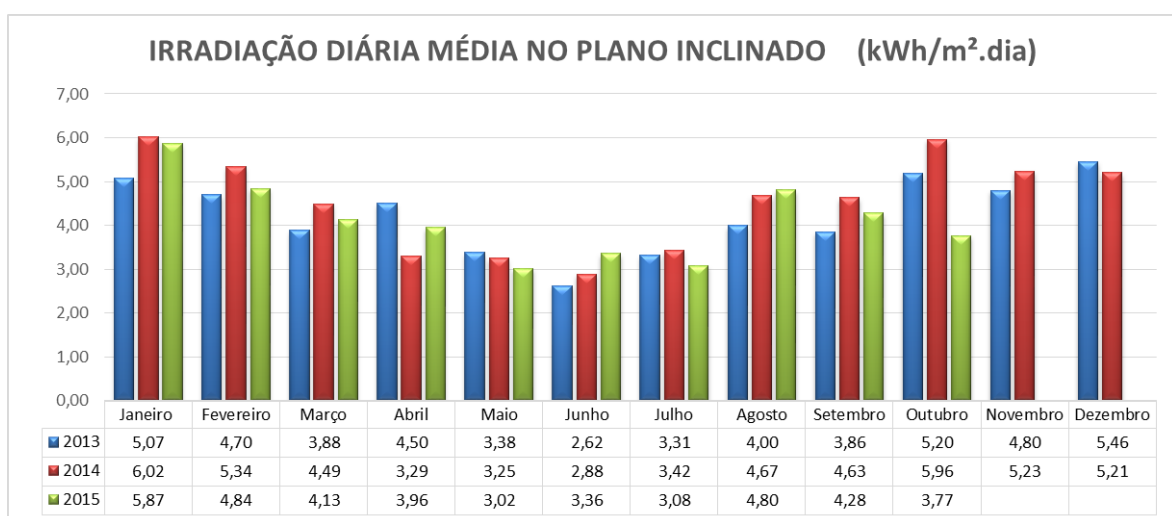


Gráfico 6 - Irradiação no plano inclinado da ELCO.

Fonte: Autoria própria.

3.3.4. ÍNDICES DE MÉRITO

A. PRODUTIVIDADE OU *YIELD*

A partir dos valores de geração apresentados no Item 3.3.2 e utilizando a Equação 4 foi possível obter os valores de produtividade do sistema da ELCO, os quais são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Produtividade ELCO.

PRODUTIVIDADE (kWh/kWp)			
Mês	2013	2014	2015
Janeiro	82,84	111,80	123,40
Fevereiro	60,07	104,19	94,93
Março	69,66	93,03	94,89
Abril	108,45	77,49	91,85
Maió	89,31	70,99	84,46
Junho	66,69	68,78	91,30
Julho	86,90	73,07	83,44
Agosto	98,18	95,19	115,32
Setembro	82,41	87,14	95,98
Outubro	116,16	115,98	80,14
Novembro	91,49	86,23	
Dezembro	93,86	107,16	
Anual	1046,01	1091,05	

Fonte: Autoria própria.

B. TAXA DE DESEMPENHO OU *PERFORMANCE RATIO*

Semelhante ao caso do EV, calculou-se as taxas de desempenho do sistema, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Taxa de desempenho ELCO.

TAXA DE DESEMPENHO (%)			
Mês	2013	2014	2015
Janeiro	52,66%	59,95%	67,81%
Fevereiro	45,62%	69,73%	70,02%
Março	57,85%	66,84%	74,17%
Abril	80,31%	78,44%	77,40%
Mai	85,34%	70,55%	90,25%
Junho	84,94%	79,58%	90,49%
Julho	84,63%	68,90%	87,27%
Agosto	79,25%	65,69%	77,44%
Setembro	71,26%	62,71%	74,78%
Outubro	72,10%	62,78%	68,63%
Novembro	63,52%	54,95%	
Dezembro	55,49%	66,39%	
Anual	69,42%	67,21%	77,83%

Fonte: Autoria própria.

C. FATOR DE CAPACIDADE

A Tabela 8 apresenta os valores mensais do fator de capacidade calculados a partir da Equação 6.

Tabela 8 - Fator de capacidade ELCO.

FATOR DE CAPACIDADE (%)			
Mês	2013	2014	2015
Janeiro	11,13%	15,03%	16,59%
Fevereiro	8,94%	15,50%	14,13%
Março	9,36%	12,50%	12,75%
Abril	15,06%	10,76%	12,76%
Mai	12,00%	9,54%	11,35%
Junho	9,26%	9,55%	12,68%
Julho	11,68%	9,82%	11,21%
Agosto	13,20%	12,79%	15,50%
Setembro	11,45%	12,10%	13,33%
Outubro	15,61%	15,59%	10,77%
Novembro	12,71%	11,98%	
Dezembro	12,62%	14,40%	
Anual	11,92%	12,46%	13,11%

Fonte: Autoria própria.

4. ANÁLISES COMPARATIVAS E CONCLUSÕES

A realização deste trabalho, a partir da metodologia apresentada, permitiu que os objetivos propostos fossem alcançados de maneira satisfatória, viabilizando a análise dos sistemas estudados e a observação do panorama atual dessa energia no Paraná.

Ao publicar a Resolução nº 482, em abril de 2012, a ANEEL determinou que as concessionárias teriam 240 dias para disponibilizar as normas referentes à geração distribuída. Para cumprir essa determinação a Copel publicou em dezembro de 2012 a NTC 905100 – “Acesso de geração distribuída ao sistema da Copel” e, logo após, a empresa ELCO Engenharia iniciou o primeiro processo de homologação de SFVCR, o qual demorou quase um ano para ser finalizado.

O Gráfico 1 mostra que a potência instalada no ano de 2011 é referente ao EV, que iniciou sua operação antes mesmo da Resolução nº 482 e permanece até hoje sem ter sido homologado. Porém, no ano de 2012 não foi conectado nenhum sistema à rede, já que as normas da Copel foram publicadas apenas no final do ano e só possibilitaram o surgimento desses sistemas a partir de 2013.

No decorrer dos primeiros processos a concessionária revisou suas normas e publicou em fevereiro de 2014 a NTC 905200 – “Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da Copel”, elucidando os procedimentos e tornando mais rápida a homologação de geração distribuída. A partir disso a potência instalada no Paraná começou a aumentar significativamente, com mais de 100 kWp adicionados durante 2014 e chegando ao panorama atual com quase 500 kWp instalados, conforme o Gráfico 1.

Ao analisar a presença da energia fotovoltaica no Paraná, é possível concluir que apesar do baixo incentivo governamental, que esbarra principalmente na questão tributária, o número desses sistemas vem aumentando e deixando de ser apenas objeto de estudo nas universidades, pois estão cada vez mais se difundindo no meio industrial e residencial. Cabe salientar que o crescimento da potência instalada de SFVCR's no Paraná desde 2011, apesar de significativo, ainda é baixo para o potencial de irradiação disponível no estado (TIEPOLO,2015).

Através dos valores de irradiação obtidos via *e-mail* com o INMET, apresentados no Gráfico 3, e dos valores de geração coletados pela memória de

massa dos inversores, apresentados nos Gráficos 2 e 5, pôde-se notar que a geração de energia elétrica é proporcional a irradiação incidente no painel FV, a qual também depende da época do ano, sendo maior nos meses de verão e menor nos meses de inverno.

Observando os dados obtidos referentes ao EV percebe-se que durante o período levantado no ano de 2015, o sistema gerou cerca de 1,75 MWh, ou seja, uma média de aproximadamente 175 kWh/mês. Durante o verão a geração chegou perto de 250 kWh/mês, valor que é superior ao necessário para suprir toda a demanda energética da edificação, tornando-a uma edificação de “energia zero” (ZEB – *zero energy building*). Porém, em diversos momentos durante os seus quatro anos de funcionamento, o sistema gerou mais energia do que o necessário e acabou injetando esse excedente na rede, tornando-se uma edificação de “energia positiva”.

No mês de outubro de 2015, apesar da baixa irradiação incidente no painel do escritório verde, cerca de 3,7 kWh/m².dia, pode-se observar que o desempenho global do sistema teve um aumento significativo, passando de 66,91% do mês anterior para 74,43%. Esse aumento coincide com o período posterior à limpeza feita no painel em 26 de setembro de 2015, levando a concluir que o baixo desempenho do sistema durante este ano, quando comparado a 2014, tinha grande contribuição da sujeira acumulada sobre os módulos. O mesmo ocorreu durante o segundo ano de operação, no qual a taxa de desempenho vinha diminuindo e, após a limpeza realizada em 31 de agosto de 2013, ela voltou a subir.

De maneira semelhante, esse efeito também pôde ser verificado no sistema da ELCO após a limpeza realizada no dia 02 de maio de 2015, quando a taxa de desempenho saltou de 77,40% em abril de 2015 para 90,25% em maio do mesmo ano, evidenciando igualmente a influência da sujeira nas perdas.

Essa relação entre a queda da taxa de desempenho, que representa o desempenho do sistema descontando as perdas, e a sujeira acumulada sobre o painel, mostra que a limpeza sendo feita a cada dois anos acaba influenciando negativamente na geração de energia e que, portanto, seria pertinente que essa limpeza fosse feita anualmente.

Durante o cálculo dos índices de mérito constatou-se que a produtividade anual do sistema da ELCO está abaixo do esperado, pois até agora só apresentou valores anuais inferiores a 1100 kWh/kWp. A questão é que o painel instalado na sede da empresa ELCO, além de ser composto por módulos de silício monocristalino, que são

mais eficientes, também está melhor posicionado em relação ao sol do que aquele instalado no EV e, portanto, deveria ter uma produtividade superior ao sistema da UTFPR.

O fato é que em 2013 o sistema ainda não estava homologado pela concessionária e, portanto, sofria certa pressão para que não permanecesse operando e fez com que a empresa efetuasse diversos desligamentos durante o ano, principalmente nos três primeiros meses. Já em 2014, os dados originais mostram que o inversor parou de funcionar em diversos momentos, deixando lacunas de geração em praticamente todos os meses do ano. A análise dessas informações permite concluir que tais valores não refletem a real produtividade do sistema da ELCO e que, portanto, esse índice só poderá ser analisado a partir do ano de 2015, durante o qual o sistema tem operado ininterruptamente.

Já no caso do EV, pôde-se perceber que durante os quatro anos de operação o sistema manteve uma produtividade anual bastante satisfatória e proporcional às suas características, sofrendo apenas uma leve queda nos anos de 2013 e 2015 devido as perdas por acúmulo de sujeira já mencionadas.

Outro tópico que ficou evidente foi em relação ao fator de capacidade, cujos valores esperados para o Brasil estão entre 13 e 18%. No entanto, o sistema do EV nos anos de 2013 e 2015, assim como o sistema da ELCO nos dois primeiros anos de operação, não atingiram o valor esperado para esse índice. As justificativas para isso são as mesmas considerações feitas anteriormente para os outros índices de mérito. No caso da ELCO ficou nítido o crescimento do fator de capacidade em 2015, que ultrapassou os 13% antes mesmo do ano acabar. Esse aumento é um reflexo do funcionamento contínuo do sistema e um indício de que a partir desse ano será possível aferir o real desempenho do mesmo.

Conclui-se, portanto, que a energia solar gerada pelos SFVCR's, apesar de depender das condições climáticas pode ser uma solução para o Paraná, visto que o estado tem uma participação gigantesca na produção de energia elétrica através de hidroelétricas e já não possui um espaço físico significativo para expansão de tal fonte, tornando imprescindível o desenvolvimento de novas fontes que possam gerar energia próximo ao ponto de consumo, de maneira limpa, silenciosa e confiável.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf>. Acesso em 24 de janeiro de 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 482**. 17 Abril, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10899**: Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2006.

BENEDITO, R. S., **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**". Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2009.

CAMARA, C. F., **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Lavras, Minas Gerais, 2011.

CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão**. Brasília, DF, Maio, 2010.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. **NTC 905100**: Acesso de geração distribuída ao sistema da Copel. Paraná, 2010.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. **NTC 905200**: Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da Copel. Paraná, 2014.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em 05 de julho de 2014.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em 17 de julho de 2015.

ELCO. Disponível em: <<http://www.elco.eng.br>> .Acesso em 18 de maio de 2015.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – **Síntese do Relatório Final do Balanço Energético Nacional 2014**. Ministério de Minas e Energia - MME. Brasília - DF. 2015.

ESCRITÓRIO VERDE. Disponível em: <<http://www.escriptorioverdeonline.com.br>> Acesso em 18 de maio de 2015.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GEHRING, Adriano A.; LOPES, Lucas F. S.; DALMOLIN, Rodrigo S. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: acompanhamento dos índices de mérito no escritório verde da UTFPR e análise da viabilidade econômica de implantação em residências**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 01 junho de 2015.

MARION, B.; et al. **Performance parameters for grid-connected PV systems**. Memória e Conhecimento. Disponível em: <http://professormksf.blogspot.com.br/2013_08_01_archive.html> Acessado em 24 de janeiro de 2015.

NEOSOLAR. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br>> Acesso em 25 de maio de 2015.

PEREIRA, Ênio B.; COLLE, Sérgio. **A energia que vem do Sol**. Jornal Ciência Hoje, 1997.

PEREIRA, Ênio B.; MARTINS, Fernando R.; ABREU, Samuel L. de; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. 2014.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Editora UFSC - LABSOLAR, v. Único, 2004.

TIEPOLO, Gerson Máximo. Título: **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. Defesa: 17 de março de 2015. Total de folhas: 230 páginas. Tese Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho.

UFRGS, “Programa RADIASOL”, Laboratório de Energia Solar, 2012.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia Fotovoltaica – Módulo introdução**. 2014.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy; TIEPOLO, Gerson M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2014a.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CHINVELSKI, Tiago; SIMÃO, Carla A. F.; MAKISHI, Lilian M. M. **Primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica homologado pela Copel**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. 2014b.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia Solar Fotovoltaica e o Desempenho do SFVCR do Escritório Verde da UTFPR**. Palestra Instituto de Engenharia do Paraná – IEP. Curitiba – PR. 2015.

VALLÊRA, Antônio M.; BRITO, Miguel C. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 29, fascículo 1 e 2, jan. 2006. Disponível em: < <http://gazedefisica.spf.pt/magazine/article/472>> Acesso em: 22 maio 2015.

VERA, Luis Horacio; KRENZINGER, Arno. **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Através de Índice de Mérito**. Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente Vol.15, 2011.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLLI, Jonass Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações – sistemas isolados e conectados à rede**. 1.ed. Editora: Érica Ltda. São Paulo, 2013.