

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - ÊNFASE ELETROTÉCNICA**

**BRUNO GONÇALVES DE LIMA
RAYSA ROOS HACK
REBECCA BARRETO AVENÇA**

**COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE IRRADIAÇÃO APRESENTADOS
POR DIFERENTES FONTES DE DADOS NO ESTADO DO PARANÁ
E DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA POR FONTE FOTOVOLTAICA EM CURITIBA.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2015**

**BRUNO GONÇALVES DE LIMA
RAYSA ROOS HACK
REBECCA BARRETO AVENÇA**

**COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE IRRADIAÇÃO APRESENTADOS
POR DIFERENTES FONTES DE DADOS NO ESTADO DO PARANÁ
E DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA POR FONTE FOTOVOLTAICA EM CURITIBA.**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentado à disciplina de TCC-2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase 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: Prof. Msc Gerson Maximo Tiepolo

**CURITIBA
2015**

Bruno Gonçalves de Lima
Raysa Roos Hack
Rebecca Barreto Avença

Comparação dos níveis de irradiação apresentados por diferentes fontes de dados no estado do Paraná e determinação do potencial de geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica 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, 26 de Fevereiro 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

Gerson Maximo Tiepolo, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Gerson Maximo Tiepolo, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar nosso caminho e estar presente sempre quando nos faltou força para seguir em frente, nos protegendo e guiando em nossas escolhas.

Ao professor Gerson M. Tiepolo, por nos acolher como seus orientandos, apoiando e direcionando a construção deste trabalho, concedendo grande parte de seu tempo, aconselhando com seu conhecimento na área e em assuntos complexos com muita disposição e paciência.

Aos amigos que fizemos durante esses anos, que nos ajudaram, apoiaram e entenderam quando não podíamos estar presentes.

Agradeço meus pais Fernando e Jocemara, meus irmãos e todos familiares pelo apoio constante e por sempre acreditarem no meu potencial para realizar essa tão sonhada conquista.

Agradeço a todos os meus amigos que sempre estiveram do lado tanto nas horas de tensão com a faculdade, como nas horas de lazer e descontração, principalmente nas horas de lazer e descontração.

Agradeço também a minha noiva e colega neste trabalho, Raysa. Entre o stress e as coisas boas que a faculdade nos proporcionou, foi uma jornada que com você do meu lado, sem dúvida, ficou muito mais fácil e prazerosa.

Em geral, agradeço a todos pelo apoio e reconhecimento no final dessa jornada. Muito Obrigado!!

A minha mãe Miriam, falecida em 07/07/2014, que infelizmente não pôde estar presente neste momento tão feliz da minha vida, mas que não poderia deixar de dedicar a ela, pois se hoje estou aqui, devo muitas coisas a ela e por seus ensinamentos e valores passados. Obrigada por tudo! Saudades eternas!

Ao meu pai Isair, que me proporcionou o estudo para ingressar em uma Universidade Federal e que tem muito orgulho disso, obrigada pelos conselhos, por ouvir e por ter paciência nos dias mais críticos.

A minha irmã Bruna por também ter orgulho de ter uma irmã Engenheira, por ter paciência e ajudar quando precisei.

Agradeço ao meu amor Bruno, por ter me ajudado, e muito, a conseguir esse diploma, por fazer parte deste trabalho e por ter muita paciência nas semanas de provas.

Ao meu lindo, lindo, lindo, carinhoso e amado filho que apesar de seus cinco anos de idade, muito compreendeu minha ausência, e por ser meu maior motivador com seu beijo carinhoso ao acordar ou sua alegria ao ver minha chegada. Obrigada amor da minha vida.

A minha mãe Delaine e ao meu pai Carlos “in memoriam”, os quais foram minha primeira base de educação. Pelo apoio constante em todas as etapas de minha vida. Ao CP que entrou na minha vida e continua me apoiando sempre. Obrigada mãe e CP pelas tantas noites de sono tardio a minha espera, pelo cuidado com meu filho, pelas caronas de Kombi, pelo apoio afetivo e material em todo esse processo. Aos meus irmão por estarem sempre por perto. A vocês não tenho e nunca teria palavras o suficiente para agradecer tudo que fizeram e fazem por mim, por nossa família.

Ao meu namorado Gustavo, por ser meu melhor amigo e companheiro de todas as horas, pelo carinho, compreensão, amor, paciência (principalmente nas semanas das provas).

A minha equipe Bruno e Raysa, que assumiram junto comigo este desafio. Escrevemos e reescrevemos este trabalho tantas vezes para deixá-lo melhor e podermos dizer FIM, dizer FIM galera, acabou, estamos formados.

“A satisfação está no esforço e não
apenas na realização final.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

LIMA, Bruno G., HACK, Raysa R., AVENÇA, Rebecca B. **Comparação dos níveis de irradiação apresentados por diferentes fontes de dados no estado do Paraná e determinação do potencial de geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica em Curitiba.** 2015. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

O Brasil é hoje um país com alto destaque quando se trata de fontes de energia renováveis. Possui uma alta capacidade de transformar energia limpa através de fontes alternativas, e isso proporciona outras maneiras de colaborar com a geração hidrelétrica, maior potencial renovável de energia na matriz brasileira. Como a exploração do potencial hidrelétrico está saturando, e novos empreendimentos em grandes centrais hidrelétricas vão contra as políticas verdes de sustentabilidade em vigor, é importante considerar outras formas de geração de energia de forma renovável, como a solar fotovoltaica, pois este tipo de energia é considerada sustentável e limpa, e o Brasil tem uma ótima média anual de irradiação solar para ser aproveitada para a produção de energia elétrica. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo para comparar as fontes de dados de irradiação solar disponíveis, e determinar o potencial de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica na cidade de Curitiba. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário fazer uma revisão bibliográfica sobre conceitos de radiação solar, efeito fotovoltaico, tipos de sistemas fotovoltaicos, instrumentos de medição, componentes básicos de sistemas fotovoltaicos que abrangem a geração de energia através de módulos fotovoltaicos e sobre os dados de irradiação disponíveis no Paraná. Através desses dados foi possível determinar a diferença entre as bases de dados analisadas, qual o potencial de geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica na cidade de Curitiba, e quanto dessa energia gerada representa no consumo total de energia elétrica na cidade. Foi também determinada a área necessária para suprir o consumo total de energia elétrica de Curitiba por fonte fotovoltaica, e uma perspectiva para 2050. Como resultado dessa pesquisa, verificou-se que uma quantidade de energia elétrica significativa poderia ser gerada através dessa fonte, mostrando a importância do investimento nessa fonte de energia renovável, para o desenvolvimento da cidade de Curitiba.

Palavras-chave: Potencial de geração. Bases de dados. Irradiação. Energia elétrica. Fotovoltaico. Renovável. Consumo. Área. Curitiba.

ABSTRACT

LIMA, Bruno G., HACK, Raysa R., AVENÇA, Rebecca B. **Comparison of irradiation levels presented by different data sources in the state of Paraná and determination of the potential of electric energy generation from photovoltaic source in Curitiba.** 2015. 98 pp. Final dissertation (Bachelor Degree) – Industrial Electrical Engineering - Electrotechnic. Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2015.

Brazil is today a country with a high emphasis when the subject is renewable energy sources. It has a high ability to turn clean energy through alternative sources, and this provides other ways to collaborate with energy generation in the country, which has as most generation potential in the Brazilian matrix, the hydropower. As the exploration of the hydroelectric potential is saturating, and new developments in large hydropower centers go against the current green sustainability policies, it's important to consider other forms of renewable energy generation, such as solar photovoltaics, as this type of energy is considered sustainable and clean, and Brazil has a great average annual solar irradiation to be harnessed for energy production electric. This work aims to develop a study to compare the sources of solar irradiation data available, and determine the potential of electricity generation from photovoltaic solar source in the city of Curitiba. To the development of this work, it was necessary to review existing literature on solar radiation concepts, photovoltaic effect, types of photovoltaic systems, measuring instruments, basic components of photovoltaic systems that span power generation through photovoltaic modules and over irradiation data available in Paraná. Through these data it was possible to determine the difference between both analyzed databases, determine the potential of electricity generation from photovoltaic source in the city of Curitiba, and how much of that generated energy represents in the total consumption of electricity in the city. It was also determined the area required to attend the total consumption of electricity by photovoltaic source in Curitiba, and an outlook for 2050. As a result of this research it was found that a significant amount of electricity could be generated by this source, showing the importance in the investment of renewable energy source for the development of the city of Curitiba.

Keywords: Generation potential. Databases. Irradiation. Electrical energy. Photovoltaic. Renewable. Consumption. Area. Curitiba.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz da Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica	21
Figura 2 – Capacidade instalada por tipo de fonte na matriz elétrica brasileira.	22
Figura 3 – Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,45°, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.	24
Figura 4 – Representação dos eventos-chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas	26
Figura 5 – Constituição Básica de um sistema fotovoltaico autônomo isolado	29
Figura 6 – Constituição Básica do sistema fotovoltaico conectado à rede.....	29
Figura 7 – Esquema de uma casa com sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.....	30
Figura 8 – Piranômetro.....	31
Figura 9 – Pireliômetros de Cavidade Absoluta e de Incidência Normal.....	32
Figura 10 – Exemplo de Heliógrafo Campbell-Stokes.....	32
Figura 11 – Símbolo de módulo fotovoltaico.	34
Figura 12 – Corte de uma célula fotovoltaica.	35
Figura 13 – Célula, módulo e painel fotovoltaico.....	36
Figura 14 – Tipos de células fotovoltaicas de silício cristalino.....	37
Figura 15 – Filmes finos de a-Si.....	38
Figura 16 – Módulos fotovoltaicos de CdTe em aplicações arquitetônicas.	39
Figura 17 – Módulos fotovoltaicos de CIGS em aplicações arquitetônicas.	40
Figura 18 – Evolução mundial acumulado de capacidade instalada de energia fotovoltaica 2000-2013.....	41
Figura 19 – Evolução das instalações anuais globais 2000-2013.....	42
Figura 20 – Divisão do mercado europeu em Energia Fotovoltaica em 2013.....	42
Figura 21 – Radiação solar global horizontal média diária anual.	46
Figura 22 – Radiação solar no plano inclinado média diária anual.	47
Figura 23 – Radiação média diária do total anual no plano horizontal e inclinado por região	48
Figura 24 – Detalhe de uma Estação Meteorológica Automática (EMA).....	49
Figura 25 – Distribuição das Estações Meteorológicas Automáticas pelo território brasileiro.....	50
Figura 26 – Vista frontal do EV da UTFPR.....	51

Figura 27 – Painel FV e inversor do EV da UTFPR	51
Figura 28 – Dados da tabela disponibilizada pelo INMET	53
Figura 29 – Tabela desconsiderando os valores negativos.	54
Figura 30 – Conversão da unidade de kJ/m ² para kWh/m ²	55
Figura 31 – Base de dados do ATLAS publicado em 2006.....	56
Figura 32 – Base de dados do ATLAS 2006 com filtro na coluna da longitude.....	57
Figura 33 – Base de dados do ATLAS 2006 com filtro nas colunas de longitude e latitude.....	58
Figura 34 – Software Google Earth	59
Figura 35 – Google Earth com o marcador nas coordenadas do INMET	60
Figura 36 – Google Earth com o marcador nas coordenadas do INMET e nas cinco coordenadas da base filtrada do ATLAS 2006.....	60
Figura 37 – Ferramenta de medição de distância entre dois pontos do Google Earth.....	61
Figura 38 – Tela de entrada do RADIASOL com os dados do ATLAS 2006.....	63
Figura 39 – Tela do RADIASOL com o gráfico de irradiação diária média, referente à base de dados do ATLAS 2006.....	63
Figura 40 – Irradiação média do EV obtida pelo piranômetro em 2012.	68
Figura 41 – Tela inicial do RADIASOL com os dados de irradiação do INMET MÉDIA inseridos.....	80
Figura 42 – Tela do RADIASOL com os dados de irradiação do INMET MÉDIA convertidos para o plano ideal.....	81
Figura 43 – Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Apresentação dos valores de irradiação do INMET e ATLAS 2006 no plano do EV.....	65
Gráfico 2 – Apresentação dos valores de irradiação do INMET de 2012 e do ATLAS 2006 no plano do EV, junto com os dados de irradiação obtidos pelo piranômetro do EV.	69
Gráfico 3 – Irradiações médias mensais encontradas no plano do painel FV do EV para as bases de dados INMET MÉDIA, 2012, 2013, 2014 e ATLAS 2006.....	72
Gráfico 4 – Diferença das Irradiações diárias médias no plano do painel FV do EV entre a INMET MÉDIA e o ATLAS 2006.	74
Gráfico 5 – Diferença das Irradiações médias anuais do INMET MÉDIA e do ATLAS 2006 no plano do EV.....	74
Gráfico 6 – Diferença das Irradiações médias anuais do INMET MÉDIA e do ATLAS 2006 no plano do EV e dos dados reais do EV.....	75
Gráfico 7 – Irradiações médias anuais das bases do INMET, da base do ATLAS 2006, e da média dos valores do EV.....	76
Gráfico 8 – Diferença da Geração estimada de EE anual.....	85
Gráfico 9 – Percentual de Capacidade de Atendimento ao consumo atual de Curitiba por fonte fotovoltaica com os dados do INMET.....	87
Gráfico 10 – Percentual de Capacidade de Atendimento ao consumo atual de Curitiba por fonte fotovoltaica com os dados do ATLAS 2006.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de Classificação de sistemas fotovoltaicos.....	28
Tabela 2 – Estações de coletas, para validação do projeto BRASIL-SR	45
Tabela 3 – Médias diárias mensais de irradiação no plano horizontal do INMET.	56
Tabela 4 – Coordenadas filtradas da Base de dados do ATLAS.	58
Tabela 5 – Distâncias entre a estação do INMET e as cinco coordenadas da base do ATLAS 2006.	61
Tabela 6 – Irradiações diárias médias no plano horizontal dos dados do INMET e do ATLAS 2006.	61
Tabela 7 – Irradiação diária média do ATLAS 2006 obtida pelo programa RADIASOL para a inclinação e desvio azimutal encontrados no EV.	64
Tabela 8 – Irradiações diárias médias do INMET no plano do painel FV do EV obtida pelo programa RADIASOL para inclinação e desvio azimutal encontrados no EV. ...	65
Tabela 9 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2012 x valores do ATLAS 2006	67
Tabela 10 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2012 x valores medidos no EV em 2012 x valores do ATLAS 2006	68
Tabela 11 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2013 x valores do ATLAS 2006	70
Tabela 12 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2014 x valores do ATLAS 2006	71
Tabela 13 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET MÉDIA x valores do ATLAS 2006	73
Tabela 14 – Médias diárias mensais e a média diária anual da base INMET MÉDIA convertida para o plano inclinado (considerado ideal de geração).....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

a-Si - silício amorfo hidrogenado;

CdTe - telureto de cádmio;

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica;

CIGS - Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio;

CIS - Disseleneto de Cobre e Índio.;

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

c-Si - silício cristalino;

EE - Energia Elétrica;

EMA - Estação Meteorológica Automática;

EMC - Estação Meteorológica Convencional;

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

EPIA - Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica;

EV - Escritório Verde;

FV - Fotovoltaico;

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia;

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social

m-Si - silício monocristalino;

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora;

PDC - Plataformas de Coleta de Dados;

p-Si - silício policristalino;

RPC – Rede Paranaense de Comunicação;

SFCR - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede elétrica;

SFI - Sistema Fotovoltaico Isolado;

STC - Standard Test Conditions;

TD – Taxa de Desempenho;

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	TEMA.....	16
1.1.1	Delimitação do Tema.....	17
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	17
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	JUSTIFICATIVA.....	18
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	18
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2.	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	21
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL	21
2.2	ENERGIA SOLAR.....	23
2.3	RADIAÇÃO SOLAR	23
2.4	EFEITO FOTOVOLTAICO	25
2.5	TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	27
2.5.1	Sistemas Fotovoltaicos Isolados.....	28
2.5.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede.....	29
2.6	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR	31
2.6.1	Piranômetro	31
2.6.2	Pireliômetro.....	32
2.6.3	Heliógrafo.....	32
2.7	TERMINOLOGIA	33
2.8	COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	35
2.8.1	Painéis ou módulos de células fotovoltaicas.....	35
2.8.2	Tecnologias Disponíveis	36
2.9	SITUAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO	40
3.	COMPARAÇÃO DAS BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR.....	44
3.1	BASES DE DADOS	44
3.1.1	ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR.....	44
3.1.2	INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA.....	48

3.1.3	ESCRITÓRIO VERDE	50
3.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS BASES DE DADOS.....	52
3.3	ANÁLISE DAS DIFERENÇAS	66
3.3.1	Comparação mês a mês dos três anos de dados do INMET com o ATLAS 2006 e EV.....	66
3.3.2	Comparação da Média mensal do INMET com o ATLAS 2006.	72
3.3.3	Comparação da Média anual do INMET MÉDIA com o ATLAS 2006.....	74
4.	CÁLCULO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO EM CURITIBA	77
4.1	A CIDADE DE CURITIBA	77
4.1.1	Conjuntura energética da grande Curitiba	77
4.2	CÁLCULO PARA DETERMINAR O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE FOTOVOLTAICA	78
4.2.1	Cálculo da energia elétrica em Curitiba com base nos dados do INMET .	78
4.2.1.1	Potência do sistema Fotovoltaico	78
4.2.1.2	Irradiação Média	80
4.2.1.3	Taxa de Desempenho.....	82
4.2.1.4	Gstc - irradiância solar na condição STC.....	83
4.2.1.5	Apresentação dos resultados.....	83
4.2.2	Cálculo da energia elétrica em Curitiba com base nos dados do ATLAS 2006.....	84
4.3	RESULTADOS.....	85
4.4	CONSUMO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	86
4.4.1	Premissas adotadas e cálculos.....	86
4.5	ÁREA NECESSÁRIA PARA SUPRIR O CONSUMO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA DE CURITIBA POR FONTE FOTOVOLTAICA.....	88
4.5.1	Área necessária para suprir a demanda de 2013	89
4.5.2	Área necessária para suprir a demanda de 2050	89
5.	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS.....	93
	ANEXO A – Tabela de conversão de valores de Energia	98

1. INTRODUÇÃO

O aumento de demanda e consumo por energia elétrica decorrente do progresso tecnológico e do avanço no desenvolvimento humano, em conjunto com a real possibilidade da redução da oferta de combustíveis convencionais, somado ao aumento da preocupação com o meio ambiente tem alertado a sociedade que as fontes alternativas de energia são uma boa opção para esta nova fase.

Muito se tem falado sobre o aproveitamento da energia solar no planeta. A energia solar fotovoltaica tem sido nos últimos anos, uma das formas de energia renováveis mais investidas globalmente (FIEP, 2013).

Segundo Mattos (2009) o mundo vem observando um crescimento muito acentuado no consumo de energia e muitas unidades geradoras foram construídas.

Atualmente, há uma necessidade crescente de energia elétrica, tanto nos ramos industriais quanto residenciais (CHRISTOFOLI, 2011). Visando esse crescimento abundante, ainda em seus primeiros passos mas com imenso potencial, a geração que aproveita a irradiação solar (fotovoltaica), a força dos ventos (eólica) e a biomassa, tem no Brasil o cenário ideal para desenvolver-se (ANEEL, 2013).

Segundo a EPE (2012), do ponto de vista estratégico, em relação à energia solar, o Brasil possui uma série de características favoráveis, tais como: altos níveis de irradiação e grandes reservas de quartzo de qualidade. Tais fatores aumentam a atração dos investidores e o desenvolvimento interno.

Tratando-se de uma nova tecnologia, sob a ótica de investimentos, sua entrada no mercado, inclui níveis de risco e custo superiores aos observados nas tecnologias atualmente utilizadas.

Neste sentido, reconhecendo suas vantagens e também seus desafios, desenvolve-se esta pesquisa para encontrar um meio de incentivar a energia solar na cidade de Curitiba.

1.1 TEMA

Comparação dos níveis de irradiação apresentados por diferentes fontes de dados no estado do Paraná e determinação do potencial de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica em Curitiba.

1.1.1 Delimitação do Tema

Análise dos dados de irradiação obtidos por diferentes tipos de fontes de dados, e determinação do potencial de geração fotovoltaica em Curitiba.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Existem várias fontes com dados de irradiação solar, como por exemplo, o Atlas Brasileiro de Energia Solar publicado em 2006 e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os quais serão as fontes a serem comparadas nesta pesquisa.

Com base nos valores de irradiação encontrados nestas duas fontes, será possível projetar os valores de energia elétrica gerada num sistema fotovoltaico implantado. Com base nestas informações será possível estimar o potencial de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica em Curitiba.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo para comparar as fontes de dados de irradiação solar disponíveis, e determinar o potencial de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica em Curitiba.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar e levantar dados de irradiação solar do estado do Paraná, consultando os dados das fontes disponíveis, como o INMET, o Atlas Brasileiro de Energia solar e os dados reais obtidos pelo Escritório Verde;
- Comparar esses dados obtidos e apontar as diferenças entre elas, para obter uma informação mais precisa para o desenvolvimento do estudo;
- Determinar o potencial de geração fotovoltaica em Curitiba;

- Verificar o quanto representaria esta geração estimada de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica no consumo de energia elétrica na cidade de Curitiba.
- Determinar a área necessária para suprir o consumo total de Energia Elétrica de Curitiba por fonte fotovoltaica.

1.4 JUSTIFICATIVA

A Energia solar é uma ótima opção, pois é abundante, permanente e renovável além de não poluir e nem prejudicar o ecossistema. A radiação solar também pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes.

A maior parte da energia elétrica brasileira é proveniente das usinas hidrelétricas, que representam 67,5% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2014) da capacidade instalada de energia elétrica, mas que ocasionam consideráveis impactos ambientais.

A produção de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas tem perspectivas promissoras, sendo cada vez mais usada no mundo, principalmente em países europeus. Aliado a isto, o preço das células fotovoltaicas está diminuindo devido à demanda, propiciando a sua aplicação principalmente em ambientes urbanos em forma de geração distribuída.

Dentro da matriz elétrica tem-se geração e demanda de energia, considerando que a geração por fonte hidráulica, que é a mais usada no Brasil, pode se tornar insuficiente ao longo dos anos, e como a demanda de energia está em um elevado ritmo de crescimento, faz-se necessário o uso de outras fontes de energia.

A partir do momento em que é conhecido o potencial de geração fotovoltaica em Curitiba, com um possível aumento de demanda, pode-se não somente utilizar energia por fonte hidráulica, como também por fonte fotovoltaica, pois está cada vez mais viável o uso desse tipo de energia.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente será feito uma pesquisa de referencial teórico utilizando como material de apoio livros, artigos, revistas e dissertações.

Em seguida, será consultado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, para obter os dados que serão usados com referência na comparação dos dados obtidos pelo INMET. Com esses dados obtidos, serão feitas comparações para apontar as diferenças entre eles, e também com dados de irradiação do Escritório Verde.

Será então determinado o potencial de geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica em Curitiba, e uma análise do consumo de energia elétrica de Curitiba. Posteriormente será feita uma análise para determinar a área necessária para suprir o consumo total de Energia Elétrica de Curitiba por fonte fotovoltaica.

Por fim, será elaborada as conclusões finais deste trabalho.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) será composto das seguintes etapas:

1ª Etapa: Revisão Bibliográfica

Para esta etapa será feito um breve levantamento do material bibliográfico sobre geração de energia fotovoltaica, bem como seus tipos, aplicações, formas de instalação e vantagens.

2ª Etapa: Levantamento de dados

Será feito um levantamento dos dados do INMET e serão consultados os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006 e obtidos os dados reais de irradiação do Escritório Verde.

3ª Etapa: Comparação dos dados

Esta etapa será destinada para comparação dos dados obtidos, com apresentação de gráficos e tabelas.

4ª Etapa: Determinação do potencial fotovoltaico de Curitiba.

Será determinado o potencial de geração de energia fotovoltaica em Curitiba considerando diferentes fontes de dados. Será estabelecido o percentual de participação da fonte fotovoltaica para atender a demanda de Energia Elétrica de Curitiba, sendo estipulada a área necessária para suprir o consumo total de Energia Elétrica de Curitiba por fonte fotovoltaica.

2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL

O Brasil apresenta, devido sua extensão territorial, uma matriz energética bastante diversificada, usando tanto fontes renováveis como não renováveis.

A matriz energética nacional é considerada uma das mais limpas do mundo, com 70,2% da oferta de energia elétrica brasileira proveniente de fontes renováveis, enquanto a média mundial é menor que 20% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2014).

A Figura 1 mostra a capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil sem importação contratada:

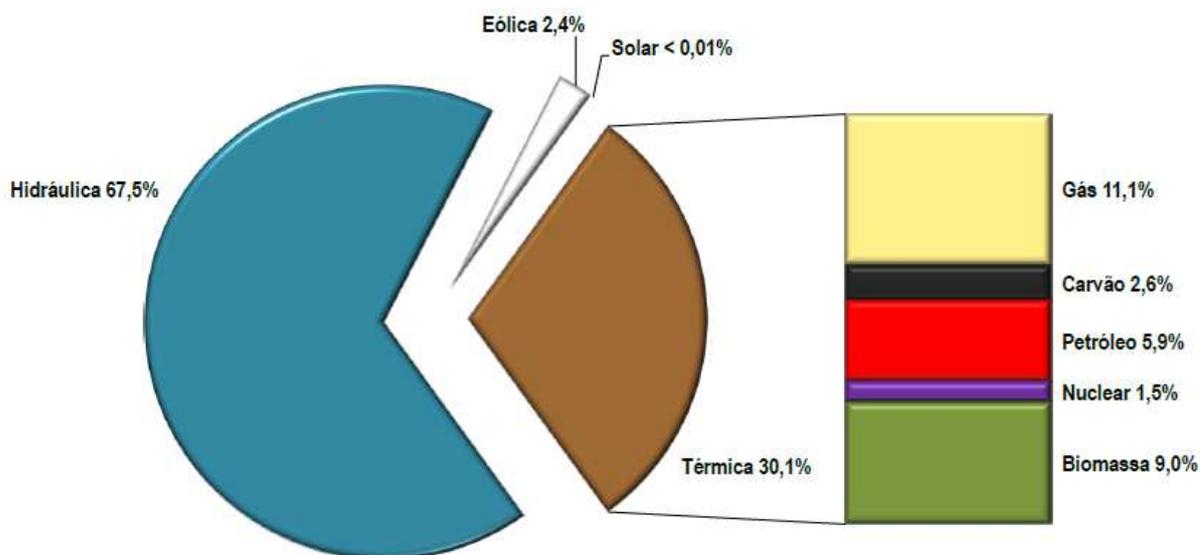


Figura 1 – Matriz da Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica
Fonte - Ministério de Minas e Energia (2014)

No mês de maio de 2014 a capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 129.068 MW. Em comparação com o mesmo mês em 2013, destaca-se a redução da participação da fonte hidráulica (de 68,5% para 67,5%) e o aumento da participação da fonte eólica (de 1,7% para 2,4%) e térmica (de 29,8% para 30,1%), em especial, biomassa (de 8,6% para 9,0%) e carvão (de 2,4% para 2,6%) como mostra a Figura 2 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2014).

Fonte	Mai/13	Mai/14			Evolução da Capacidade Instalada (Mai/14 / Mai/13)
	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	% Capacidade Disponível (sem importação contratada)	
Hidráulica	84.801	1.109	87.069	67,5%	2,7%
Térmica	37.007	1.839	38.883	30,1%	5,1%
Gás	13.854	157	14.286	11,1%	3,1%
Carvão	3.024	13	3.389	2,6%	12,1%
Petróleo	7.451	1.186	7.642	5,9%	2,6%
Nuclear	2.007	2	1.990	1,5%	-0,8%
Biomassa	10.671	481	11.576	9,0%	8,5%
Eólica	2.075	147	3.106	2,4%	49,7%
Solar Fotovoltaica	8	108	9	<0,01%	22,8%
Capacidade Total - Brasil	123.890	3.203	129.068	100,0%	4,2%

Figura 2 – Capacidade instalada por tipo de fonte na matriz elétrica brasileira.
Fonte - Ministério de Minas e Energia (2014)

Para contribuir com uma matriz energética extremamente renovável no Brasil, o estado do Paraná possui grandes usinas hidroelétricas em seu território, como Itaipu, Governador Ney Aminthas de Barros Braga (Segredo) e Governador Bento Munhoz da Rocha Netto (Foz do Areia) (COPEL, 2013).

Porém, o impacto ambiental que a construção de uma usina hidroelétrica causa ao inundar vastas áreas para formação do reservatório que movimentará as turbinas dos geradores, tem questionado e dificultado cada vez mais a expansão da produção de eletricidade em novas usinas hidrelétricas (URBANETZ, 2010). Outro empecilho para a implantação de novas hidrelétricas é a realocação das famílias, que se faz necessária, nas áreas a serem inundadas pelos reservatórios das usinas, gerando um grande impacto social (TIEPOLO et al., 2013).

A necessidade de gerar energia com baixo impacto ambiental, de forma limpa e próxima aos centros urbanos de maior consumo pode ser sanada através da geração por módulos solares fotovoltaicos (URBANETZ, 2010).

Os sistemas fotovoltaicos possuem baixo impacto ambiental, produzem energia através de uma fonte renovável e de maneira silenciosa. Esta tecnologia, já utilizada em países desenvolvidos desde o início dos anos 80, pode ser amplamente aplicada no Brasil, um país ensolarado por natureza e de grande extensão territorial, onde a geração distribuída tem muito a contribuir. Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a possibilidade de aplicação em meios urbanos, onde é grande o consumo da energia gerada de forma convencional, podendo ser instalados em edifícios, condomínios residenciais, casas isoladas, indústrias e comércios. (URBANETZ, 2010).

Assim, fica visível que o uso da tecnologia fotovoltaica pode trazer melhorias para o sistema elétrico brasileiro e mundial.

2.2 ENERGIA SOLAR

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano na atualidade. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra, ou seja, as fontes de energia são, em última instância, derivadas, em sua maioria, da energia do Sol (CRESESB, 2014).

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre através de efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma força eletromotriz, provocada pela junção de dois metais, em condições específicas. No segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, através do uso de células solares (PEREIRA et al., 2006).

Anualmente o planeta Terra recebe $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, valor 10.000 vezes maior que o consumo mundial de energia neste período. Este fato indica que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar representa uma inesgotável fonte energética, possuindo assim um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia (térmica, elétrica, etc.). Uma das possíveis formas de conversão da energia solar é conseguida através do efeito fotovoltaico que ocorre em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas (CRESESB, 2014).

2.3 RADIAÇÃO SOLAR

Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética.

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, depende da latitude local e da posição no tempo

(hora do dia e dia do ano). Isso devido à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução), movimentos ilustrados na Figura 3 (CRESESB, 2014).

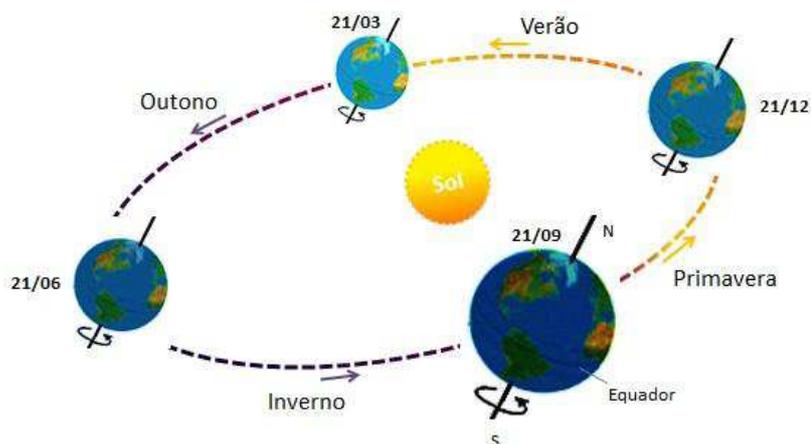


Figura 3 – Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.
Fonte: CRESESB (2014).

Na Figura 3 é possível observar a variação da duração dos dias ao longo do ano para uma determinada localidade, resultante da inclinação do eixo da Terra. Verificam-se dias mais longos, por exemplo, em localidades no hemisfério Sul, no solstício de verão e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador terrestre a duração dos dias é sempre igual e nas suas proximidades as variações são pequenas ao longo do ano. É possível também observar que nos equinócios, as durações dos dias são as mesmas para qualquer localidade. (CRESESB, 2014).

Uma das possíveis formas de conversão da energia solar é conseguida através do efeito fotovoltaico que ocorre em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas. Estas células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado (CEPEL, 2004).

2.4 EFEITO FOTOVOLTAICO

Todos os dias, o planeta Terra recebe energia do sol, de forma gratuita e limpa. Além de trazerem a luz e o calor, que são essenciais para a vida na Terra, os raios provenientes do sol podem ser aproveitados para a geração de eletricidade.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz.

Mais tarde, em 1877, dois inventores norte americanos, utilizaram as propriedades fotocondutores do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz. Tratava-se de um filme de selênio depositado num substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia de contato frontal. Apesar da baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, nos finais do século XIX o engenheiro alemão Werner Siemens comercializou células de selênio como fotômetros para máquinas fotográficas. (VALLÉRA et al., 2006).

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca por empresas do setor de telecomunicações de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi à chamada “corrida espacial”. A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo, peso e segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço.

Em 1978 a produção da indústria fotovoltaica no mundo já ultrapassava a marca de 1 MWp/ano. Os Estados Unidos foram líderes mundiais na produção dessa tecnologia durante a maior parte da década de 1990. No final dessa década, políticas de governo na Alemanha e no Japão resultaram em aumentos substanciais no desenvolvimento desse mercado. Essas políticas foram impulsionadas, em parte, por um forte compromisso com a redução de gás carbônico, conforme previsto pelo Protocolo de Kyoto, e em parte para desenvolver o mercado dessa tecnologia para exportação.

Em 1998, a produção mundial de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150 MWp, sendo o silício quase absoluto dentre os materiais utilizados. A grande mudança no desenvolvimento do mercado fotovoltaico resultou do rápido aumento da produção chinesa, observado desde 2006. Três anos antes, a Ásia não figurava

entre os dez maiores fabricantes do mundo, entretanto, em 2008, três destes eram da China e um de Taiwan e, um ano depois, a China já ocupava a liderança na fabricação de módulos (CRESESB, 2014).

Os principais eventos associados ao desenvolvimento dos equipamentos de conversão da energia solar fotovoltaica podem ser visualizados na Figura 4.



Figura 4 – Representação dos eventos-chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas
Fonte: CRESESB, 2014.

A geração de eletricidade a partir da luz solar é feita por células solares, baseadas no efeito fotovoltaico que consiste na conversão da energia luminosa incidente sobre materiais semicondutores em eletricidade. Grande parte das células disponíveis comercialmente utilizam o silício como material base para sua fabricação, podendo ser encontradas na forma de silício monocristalino, multicristalino, amorfo entre outros. As mais difundidas são fabricadas com lâminas de silício mono e multicristalino, com área entre 50 e 150 cm² e espessura entre 0,2 a 0,3 mm. A parte superior da célula apresenta raias de material condutor que têm a finalidade de extrair a corrente elétrica gerada quando as células são expostas à luz solar.

As células fotovoltaicas são agrupadas em associações em série e em paralelo para produzir corrente e tensão adequadas às aplicações elétricas. O conjunto é encapsulado, para proporcionar proteção mecânica contra danos externos, compondo assim os módulos fotovoltaicos, os elementos básicos oferecidos no mercado, que possuem uma densidade de potência de 100 Wp/m² (VALLÉRA et al., 2006).

2.5 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Conforme ABNT NBR 11704, os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos, quanto à interligação com o sistema público de fornecimento de energia elétrica, em isolados e conectados à rede elétrica e, quanto à configuração, em puros e híbridos.

A Tabela 1 mostra exemplos de classificação de sistemas fotovoltaicos.

Tabela 1 – Exemplos de Classificação de sistemas fotovoltaicos

Tipo de sistema		Alimentação dos consumidores	Acumulação de energia elétrica	Componentes básicos	Aplicações típicas
Sistemas isolados	Puros	Tensão contínua	Não	Seguidor de potência máxima (desejável)	Bombeamento, produção de hidrogênio etc.
			Sim	Controlador de carga e acumulador	Iluminação, telecomunicações, sinalização náutica, cerca elétrica, proteção catódica etc.
		Tensão alternada	Não	Inversor	Bombeamento, uso industrial etc.
			Sim	Controlador de carga, acumulador e inversor	Eletificação rural, bombeamento, telecomunicações, uso industrial, iluminação etc.
	Híbridos	Tensão contínua	Sim	Controlador de carga, acumulador e gerador complementar	Telecomunicações, iluminação, sinalização rodoviária e ferroviária etc.
		Tensão alternada	Opcional	Controlador de carga, acumulador opcional e gerador complementar	Iluminação, uso industrial etc.
Sistemas conectados à rede elétrica	Puros	Tensão alternada	Não	Inversor	Aplicações residenciais, comerciais e industriais, produção de energia para a rede pública etc.
	Híbridos	Tensão alternada	Não	Inversor e gerador complementar	Aplicações residenciais, comerciais e industriais, produção de energia para a rede pública etc.
			Sim	Inversor, gerador complementar e acumulador	Eletificação rural, uso industrial, suprimento ininterrupto de energia etc.
NOTA Todos os tipos de sistemas possuem gerador fotovoltaico entre os componentes básicos.					

Fonte - ABNT NBR 11704 (2008).

Os sistemas puros são aqueles que utilizam gerador fotovoltaico como único gerador de energia elétrica e os sistemas híbridos são aqueles que resultam da associação do gerador fotovoltaico com outros tipos de geradores de energia elétrica (ABNT, 2008).

2.5.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

Os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) não possuem qualquer conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica. Estes são geralmente aplicados em locais distantes da rede elétrica comercial, fornecendo energia para usos específicos como: estações repetidoras de telefonia celular, rádio comunicação, sinalização, bombeamento de água, eletrificação de cercas, telefonia móvel, iluminação e na composição de sistemas híbridos com óleo diesel e/ou eólico (DEMONTI, 2003).

Para Rüter et al (2007) este tipo de sistema é composto de painéis fotovoltaicos, controlador de carga, baterias e inversor, como mostra a Figura 5.

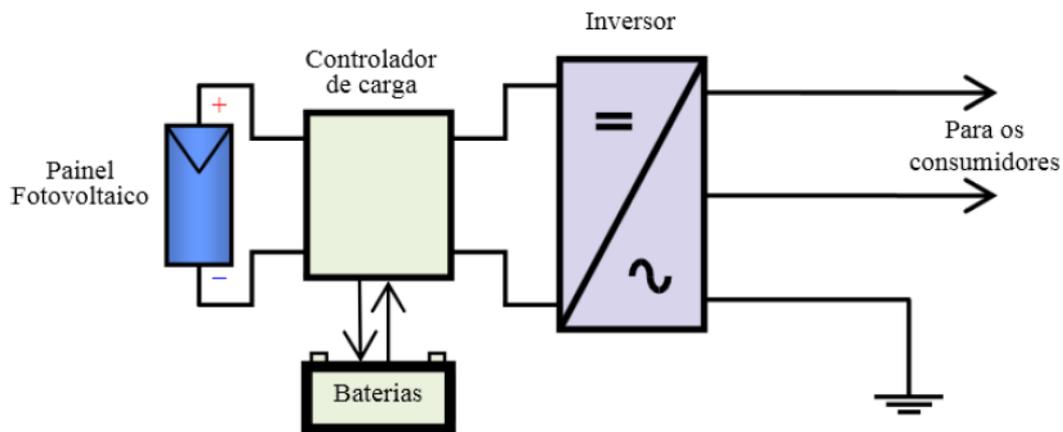


Figura 5 – Constituição Básica de um sistema fotovoltaico autônomo isolado
Fonte: RÜTHER et al., 2007.

2.5.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede

Os SFCRs são constituídos por: painel FV e inversor. Não são utilizados elementos para armazenar a energia elétrica. Basicamente, a rede elétrica da concessionária é vista como o elemento armazenador, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede (URBANETZ, 2010). A Figura 6 mostra a configuração básica de um sistema conectado à rede.

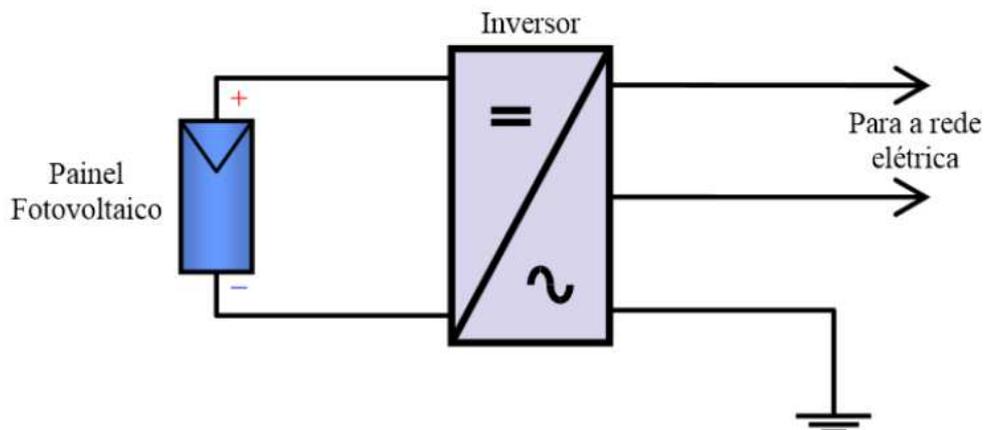


Figura 6 – Constituição Básica do sistema fotovoltaico conectado à rede
Fonte: RÜTHER et al., 2007.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser classificados como de grande ou de pequeno porte. As grandes centrais fotovoltaicas são as de grande porte, que fornecem a potência à rede elétrica instantaneamente por meio de um ou

mais inversores e transformadores. Por ocuparem grandes áreas e estarem geralmente afastadas do centro de consumo, necessitam de sistema de transmissão e distribuição até o ponto de consumo. Os sistemas de pequeno porte formam a chamada geração distribuída que é constituída pelos módulos montados nas edificações residenciais e comerciais ou áreas livres. Este sistema tem como principais vantagens a diminuição das perdas, por serem produzidas junto à carga, ocupam um espaço já utilizado, além da redução de investimentos em linhas de transmissão e distribuição (CÂMARA, 2011).

A Figura 7 mostra todos os elementos que são utilizados em uma instalação fotovoltaica interligada à rede.

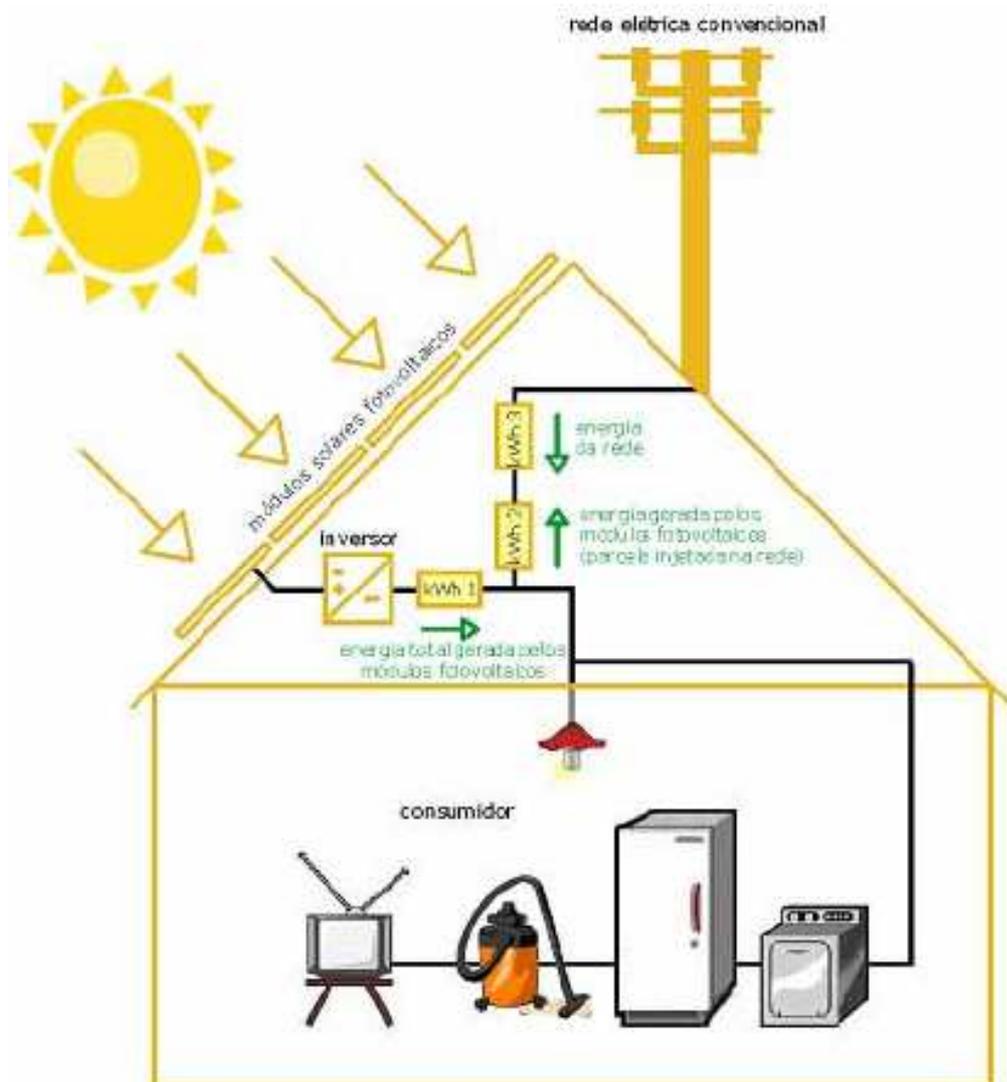


Figura 7 – Esquema de uma casa com sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica
Fonte: Rütther, 2004

2.6 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre é de grande importância para o estudo das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações (CRESESB, 2006).

Os equipamentos utilizados para medição destas componentes são os radiômetros, dentre eles o piranômetro, o pireliômetro e o heliógrafo.

2.6.1 Piranômetro

Os piranômetros são instrumentos de medição de elevada precisão, que medem a radiação solar num plano horizontal. Compõem-se principalmente de duas semi-esferas de vidro, um prato de metal preto que é usado como superfície absorvente, os termoelementos e uma concha de metal branco. A radiação solar atravessa o vidro semi-esférico, incidindo perpendicularmente sobre a superfície absorvente, aquecendo-a. Uma vez que o aquecimento depende diretamente da irradiação, esta pode ser calculada recorrendo à diferença de temperatura do metal branco e a superfície absorvente. Para calcular esta diferença de temperatura é utilizada uma fila de termoelementos, dispostos em paralelo, que proporcionam uma tensão proporcional à diferença de temperatura (PORTAL ENERGIA, 2004).

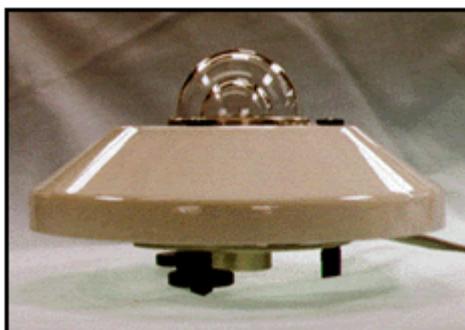


Figura 8 – Piranômetro.
Fonte – CRESESB (2004)

2.6.2 Pireliômetro

Os pireliômetros são instrumentos que medem a radiação direta. Ele se caracteriza por apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor à medida que acompanha o movimento do sol (CRESESB, 2004).



Figura 9 – Pireliômetros de Cavidade Absoluta e de Incidência Normal.
Fonte: CRESESB (2004)

2.6.3 Heliógrafo

Instrumento que determina a duração da incidência solar através de uma fita que enegrece ao ser incidida pela radiação direta do sol, que é focalizada através de uma esfera de cristal.



Figura 10 – Exemplo de Heliógrafo Campbell-Stokes.
Fonte: CRESESB (2004)

2.7 TERMINOLOGIA

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) serve como base para que haja um padrão quando o assunto é a energia fotovoltaica. A NBR 10899 – 2006 a norma que define os termos técnicos relativos à conversão fotovoltaica de energia radiante solar em energia elétrica. A seguir, alguns termos encontrados na norma, relevantes para o entendimento deste trabalho (ABNT, 2006).

- **Albedo:** Índice relativo à fração da energia radiante solar, recebida em uma unidade de área, devida a refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo, sendo a irradiância devida ao albedo simbolizada por "Galb".
- **Ângulo de incidência (θ):** ângulo entre o raio incidente (direção do Sol) e a normal à superfície da célula ou módulo.
- **Arranjo ou gerador fotovoltaico:** Um ou mais painéis fotovoltaicos interligados eletricamente, de modo a prover uma única saída de corrente elétrica.
- **Célula solar ou célula fotovoltaica:** Dispositivo fotovoltaico elementar especificadamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica.
- **Concentrador solar:** Montagem que inclui componentes ópticos, como espelhos ou lentes, para concentrar a radiação solar sobre células solares.
- **Condições-padrão de referência para ensaio:** Temperatura de junção da célula em 25°C, irradiância total de 1000 W/m² normal à superfície de ensaio e espectro AM 1,5, sendo simbolizada por "STC" (*Standard Test Conditions*).
- **Eficiência de conversão fotovoltaica:** Razão entre a potência máxima fornecida e o produto da área do módulo, ou da célula, pela irradiância total, para valores preestabelecidos de temperatura, especificada na forma de porcentagem, simbolizada por "η" e calculada pela equação (1).

$$\eta(\%) = \frac{P_{MP}}{(A_{MT} \cdot ou \cdot A_{CT}) \cdot G_{TOT}} \cdot 100\% \quad (1)$$

- **Irradiação difusa:** Irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia.
- **Irradiação direta:** Irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia.

- **Irradiação global:** Irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia.
- **Irradiação solar:** Irradiação solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado.
- **Irradiação total:** Irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia.
- **Irradiância difusa:** Potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta.
- **Irradiância direta:** Irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser normal ou horizontal.
- **Irradiância global:** Potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, sendo igual à irradiância direta mais a irradiância difusa.
- **Irradiância solar:** Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado e simbolizada por "G".
- **Irradiância total:** Potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer, simbolizada por "GTOT".
- **Módulo fotovoltaico:** unidade básica formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica, representada pela Figura 11, onde o triângulo indica o pólo positivo.



Figura 11 – Símbolo de módulo fotovoltaico.
Fonte: ABNT (2006).

- **Potência de pico:** Potência nominal de saída de um conversor fotovoltaico, sob as condições padrão de referência para ensaio, sendo a unidade simbolizada por “Wp”.
- **Rastreador solar:** Mecanismo que proporciona o seguimento do movimento aparente do sol.
- **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 off system*) se refere ao sistema fotovoltaico, não incluindo os módulos fotovoltaicos.

2.8 COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.8.1 Painéis ou módulos de células fotovoltaicas

Os painéis fotovoltaicos são um conjunto de módulos fotovoltaicos, e os módulos, um conjunto de células fotovoltaicas (ABNT, 2006a). Estas células são protegidas contra as intempéries, e são associadas eletricamente para a transmissão de corrente. A Figura 12 mostra uma fração de uma célula fotovoltaica.

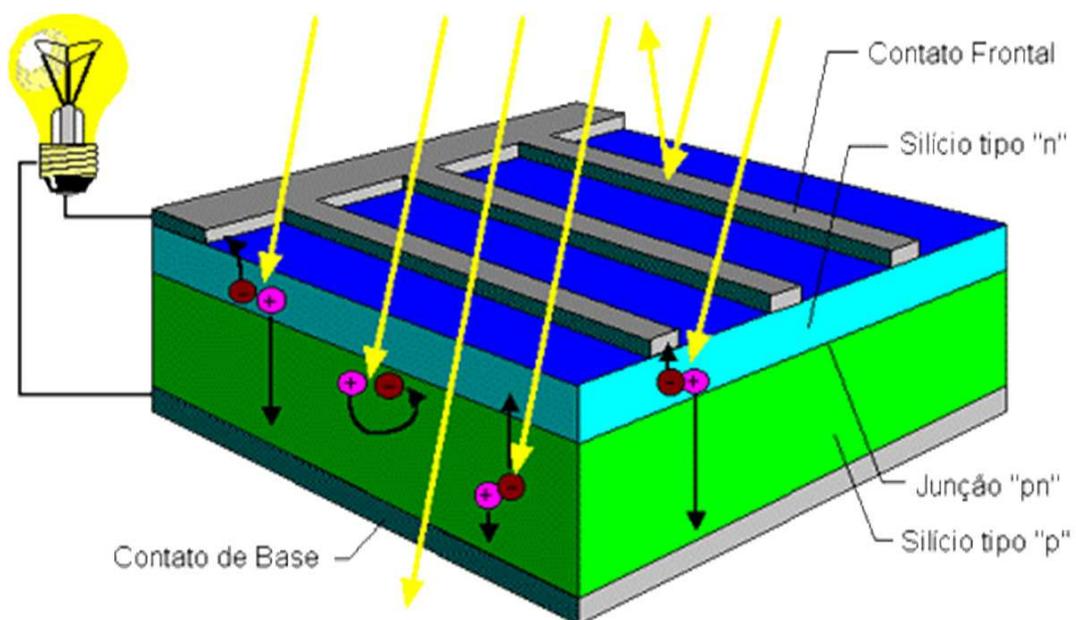


Figura 12 – Corte de uma célula fotovoltaica.
Fonte: CRESESB, 2006.

A célula fotovoltaica é composta por uma camada de material tipo P justaposta a uma camada de material tipo N que, ao serem unidas, forma-se um campo elétrico próximo à junção. Quando ela é exposta à luz, a energia dos fótons da luz do sol permite que elétrons presentes na camada P consigam passar para a camada N, criando uma diferença de potencial nas extremidades do semiconductor. Se forem conectados fios às extremidades e estes forem ligados a uma carga, haverá um fluxo de corrente elétrica, fazendo os elétrons retornarem para a camada P, reiniciando o processo. Em resumo, a luz do Sol fornece energia para impulsionar os elétrons em um só sentido, estabelecendo assim, a corrente elétrica (ELETROSUL, 2014)

Um módulo pode possuir um número variado de células, geralmente são formados por 33 a 36 ligadas em série ou em paralelo, mas este número depende da necessidade de tensão e corrente (CASTRO, 2008). A Figura 13 mostra um exemplo.

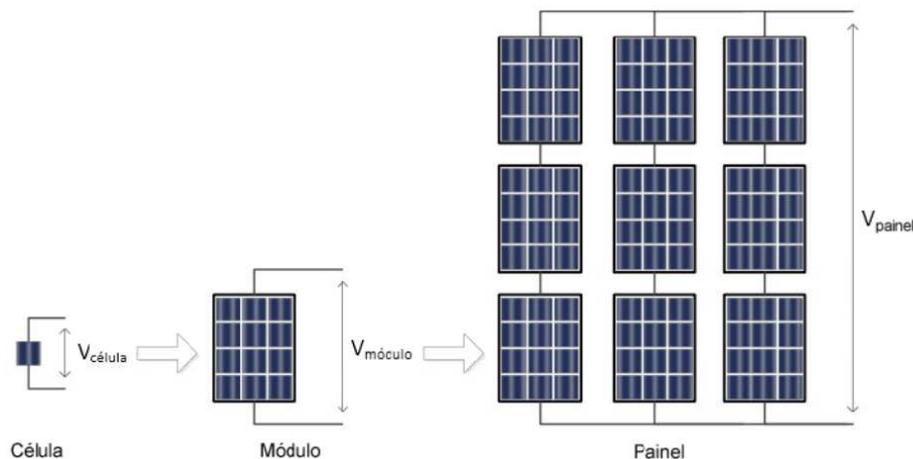


Figura 13 – Célula, módulo e painel fotovoltaico
Fonte: ALMEIDA (2012).

2.8.2 Tecnologias Disponíveis

Para a produção das células solares fotovoltaicas, destacam-se alguns materiais por ordem decrescente de maturidade e utilização. São eles, o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂ ou CIS e Cu(InGa)Se₂ ou CIGS) (RÜTHER, 2004).

I. Silício cristalino (c-Si)

A robustez e confiabilidade foram responsáveis pela consolidação desta tecnologia no mercado fotovoltaico, que é hoje a mais tradicional e com maior escala de produção a nível comercial. Esse material pode ser de dois tipos: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si) como ilustrado na Figura 14.

O m-Si é bastante utilizado em aplicações comerciais, pois possui elevada eficiência, além de ser a mais antiga tecnologia fotovoltaica. Já o p-Si por ser formado por diversos cristais, possui uma eficiência menor. Esse material (p-Si) tem o menor custo para a produção, uma vez que é necessária menos matéria e energia elétrica no processo de produção (AMÉRICA DO SOL, 2011).

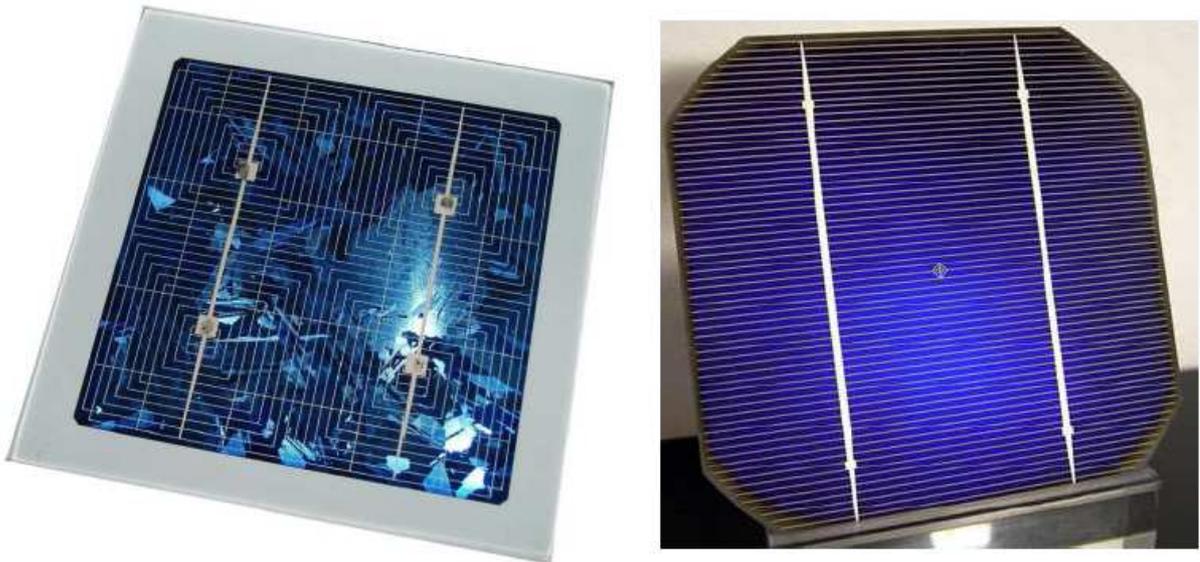


Figura 14 – Tipos de células fotovoltaicas de silício cristalino.
Fonte: KAMBOR, 2007.

II. Silício amorfo hidrogenado (a-Si)

O material denominado amorfo é aquele que não apresenta estrutura cristalina, mas, ainda assim, preserva suas propriedades de semicondutor. Apresenta um menor coeficiente de temperatura do que o c-Si, além de menor perda de eficiência em condições de baixa irradiância. Uma das desvantagens é o fato de que os módulos de a-Si ocupam maiores áreas e apresentam maiores custos de mão de obra e material para sua instalação, em comparação com os módulos de c-Si (CRESESB, 2014).

Por serem mais flexíveis e por ter aparência estética mais atraente, o silício amorfo tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil.



Figura 15 – Filmes finos de a-Si.
Fonte: AMÉRICA DO SOL, 2011.

III. Telureto de cádmio (CdTe)

O CdTe, também na forma de filmes finos, é o mais recente competidor do c-Si e a-Si no mercado fotovoltaico. Possui custos de produção baixos para grande escala e tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica. Estes módulos, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro, também apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si (RÜTHER, 2004).



Figura 16 – Módulos fotovoltaicos de CdTe em aplicações arquitetônicas.
Fonte: RÜTHER (2004).

IV. Disseleneto de cobre e índio (CIGS)

As células solares fabricadas a partir da família de compostos baseados no disseleneto de cobre e índio são bastante similares a do Telureto de cádmio, assim como as células de CdTe, também envolvem problemas ligados à toxicidade dos elementos e a pouca abundância. Não são fáceis de serem fabricadas em escala industrial, razão pelo qual as empresas ativas nesta área levaram alguns anos para desenvolverem uma boa capacidade de produção. Devido à boa aparência, são atrativos para aplicações integradas a edifícios, conforme Figura 17, além de terem uma boa eficiência (chegam a 12%, bem superior as de silício amorfo – a-Si) (AMÉRICA DO SOL, 2011).



Figura 17 – Módulos fotovoltaicos de CIGS em aplicações arquitetônicas.
Fonte: RÜTHER (2004).

2.9 SITUAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO.

Segundo a Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica – EPIA (2014), O mercado de fotovoltaico tem crescido ao longo da última década a um ritmo notável e está no caminho para se tornar uma importante fonte de geração de energia para o mundo. Em 2013 a capacidade fotovoltaica instalada no mundo chegou a quase 138,9 GW (contra 100 GW em 2012). Essa capacidade instalada pode gerar pelo menos 160 terawatts-hora (TWh) de eletricidade por ano.

A Europa é líder mundial em termos de capacidade instalada acumulada, com 81,5 GW até 2013. Isso representa 59% da capacidade fotovoltaica acumulada do mundo, seguida pelos países da Ásia-Pacífico 40,6 GW instalado. As Américas representam 13,7 GW, como mostrado na Figura 18.

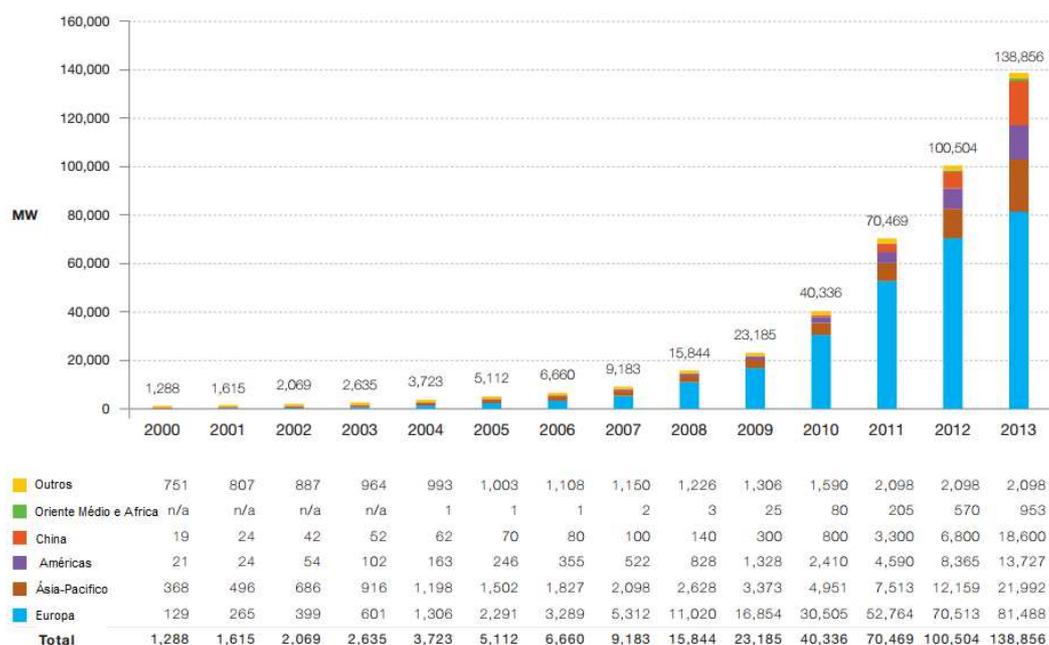


Figura 18 – Evolução mundial acumulada de capacidade instalada de energia fotovoltaica 2000-2013
Fonte: EPIA (2014)

Segundo dados da EPIA (2014) em 2013 foram instalados pelo mundo cerca de 38GW, o que representa um aumento de quase 30% comparado a 2012 como visto na Figura 19. Este aumento de sistemas fotovoltaicos tem-se com a redução de preço mais rápido do que o esperado nos últimos anos, deixando assim a energia fotovoltaica como uma fonte de energia competitiva antes do final desta década.

A Europa instalou aproximadamente 11MW, ou seja, 28,61% do montante total, e a Alemanha lidera este ranking de instalações na Europa com 3,304MWp, ou seja 30% seguido pelo Reino unido com 1,546 MWp, equivalente a 14% conforme visto na Figura 20.

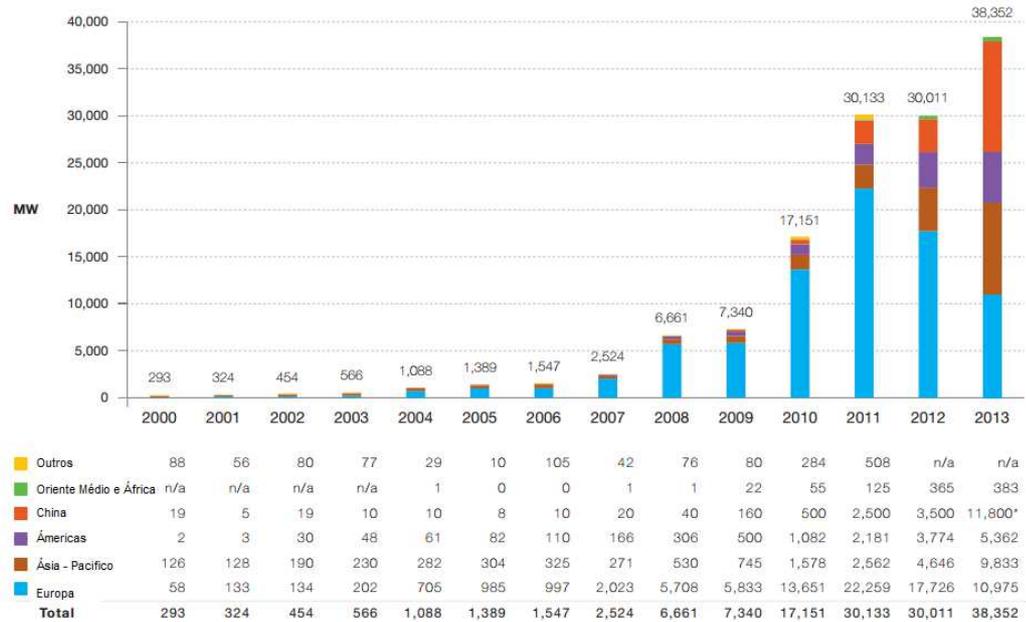


Figura 19 – Evolução das instalações anuais globais 2000-2013
Fonte: EPIA 2014

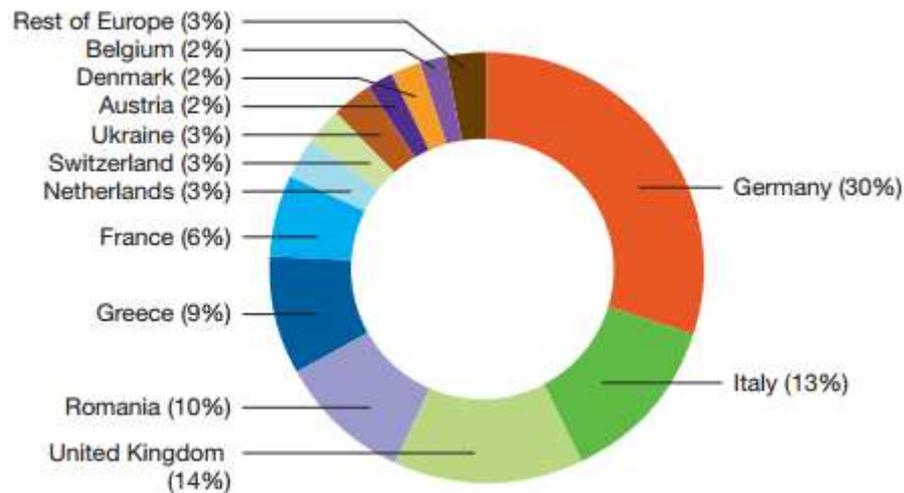


Figura 20 – Divisão do mercado europeu em Energia Fotovoltaica em 2013
Fonte: EPIA 2014

Mais é no mercado fora da Europa que esta evolução se mostra maior, pois em 2013 foram instalados mais de 27 GW de sistemas fotovoltaicos fora da Europa, um salto de quase 100% em comparação com os 13,9 GW em 2012.

A China teve um rápido desenvolvimento nesta área de energia fotovoltaica, só em 2013 ela instalou 11,8 GW de sistemas fotovoltaicos, mais que a soma de toda a Europa. Isso representa 30,76% da instalação global de 2013 e 43% da instalação dos países fora da Europa (EPIA, 2014).

Segundo a EPIA (2014), pela primeira vez na história, as cinco principais fontes de eletricidade instaladas recentemente na Europa foram energias renováveis com energia hidrelétrica, biomassa e termosolar, eólica e fotovoltaica. No Brasil como nossa matriz energética é muito grande, ainda não se tem valores expressivos de energia fotovoltaica, enquanto a Europa tem aproximadamente 81 MW instalados, o Brasil, segundo Tiepolo et al. (2013), tem uma capacidade instalada de geração de energia por fonte fotovoltaica que se aproxima de 2 MWp. A capacidade instalada atualmente em 2014 segundo a ANEEL (2014), já chegou em 14MW instalados e possui mais 30 MW de potencia outorgada, que ainda não iniciaram a construção.

3. COMPARAÇÃO DAS BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

3.1 BASES DE DADOS

3.1.1 ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

O Atlas Brasileiro de Energia Solar foi desenvolvido através do projeto SWERA com objetivo de levantamento de dados de irradiação solar, climatológicos e de imagens de satélite com grande confiabilidade, que abrangem todo o Brasil, e assim suprir a demanda de informações necessárias para impulsionar o desenvolvimento de projetos para aproveitamento dessa fonte de energia (CRESESB, 2014).

Este projeto foi financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE) (PEREIRA, et al., 2006).

Várias técnicas foram desenvolvidas para obtenção da solução exata da equação de transferência radiativa. Dentre elas podem-se citar os métodos que utilizam harmônicos esféricos, ordenadas discretas, técnica de Monte Carlo e diferenças finitas. Estas técnicas necessitam um tempo computacional elevado, inviabilizando seu uso operacional. Como alternativa, foram desenvolvidos métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor e possibilitam a obtenção de estimativas confiáveis de irradiação solar para utilização operacional e rotineira.

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” (PEREIRA et al., 2006).

O método dos dois fluxos se baseia na decomposição do fluxo de radiação em dois sentidos de propagação opostos e na direção perpendicular à superfície – um fluxo de radiação no sentido do topo da atmosfera e outro incidente na superfície. Uma análise comparativa dos resultados determinou umas discrepâncias da ordem de 3% (MARTINS et al., 2003).

Para validar o projeto, o modelo BRASIL –SR, foi comparado com um modelo conhecido e amplamente empregado na Comunidade Europeia o modelo HELIOSAT como “benchmark”. Em uma segunda etapa, os dados do modelo BRASIL-SR foram comparados aos dados reais de estações solarimétricas distribuídas por todo território nacional.

A Tabela 2 a seguir mostra o numero de plataformas de coleta de dados (PDC) utilizadas para validação do modelo BRASIL-SR.

Tabela 2 – Estações de coletas, para validação do projeto BRASIL-SR

Região Brasileira	Nº de estações	Período de Dados
Norte	11	2002 a 2005
Nordeste	13	2003 a 2005
Centro-Oeste	25	2002 a 2005
Sudeste	38	2002 a 2005
Sul	11	2004 a 2005

Fonte: PEREIRA et al., 2006

Apesar da extensão continental do nosso país, e de diferentes características climatológicas, observa-se que o Brasil possui um alto nível de irradiação solar, com médias anuais relativamente altas em todo país.

Conforme mostra a Figura 21, o nordeste do país tem os maiores índices de radiação solar, mais especificamente o norte da Bahia que possui uma irradiação global diária de 6,5 kWh/m², Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano. O litoral norte de Santa Catarina possui a menor irradiação média diária anual chegando a 4,5 kWh/m², esta região possui ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano (PEREIRA, 2006).

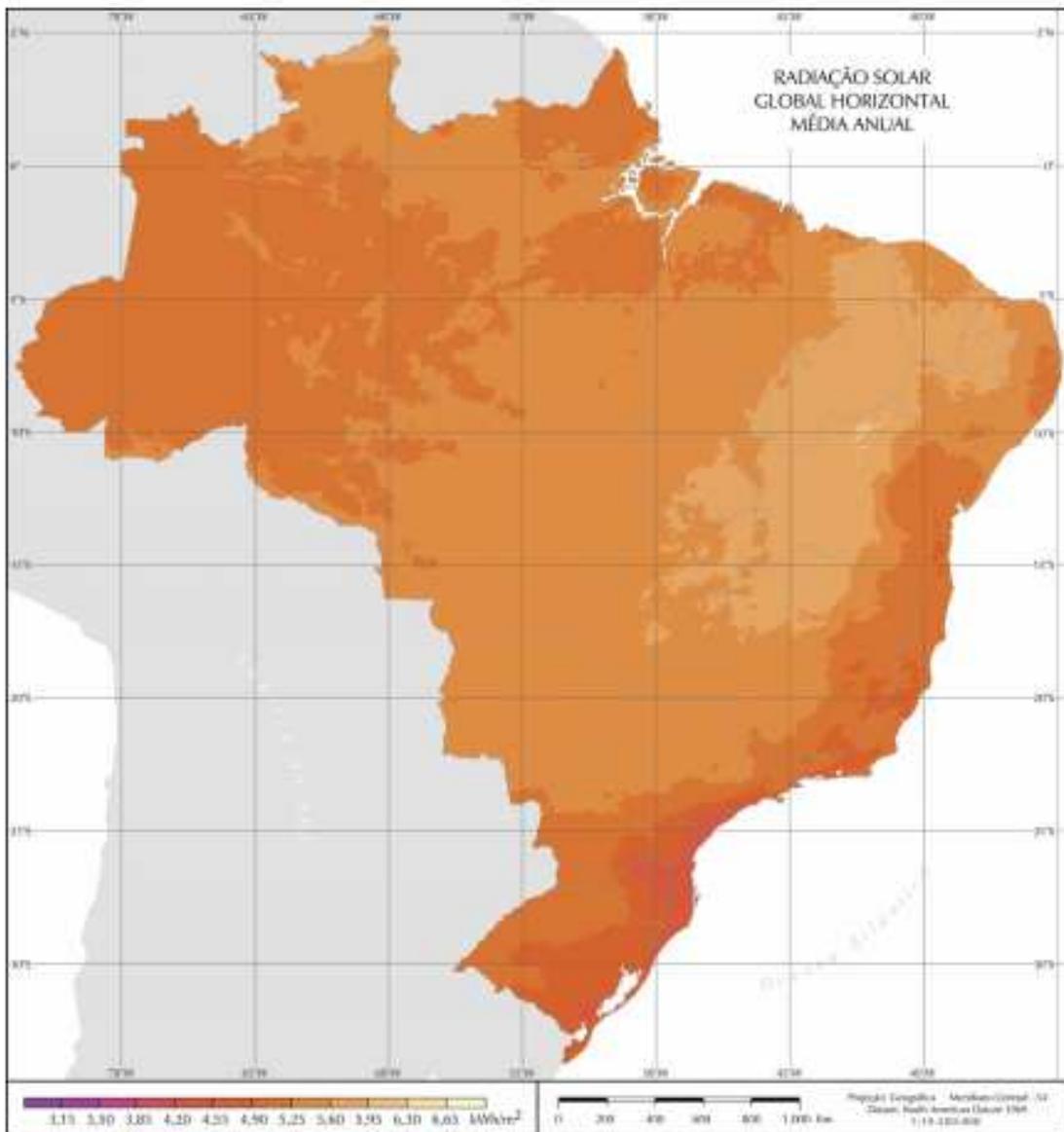


Figura 21 – Radiação solar global horizontal média diária anual.
Fonte: PEREIRA et al., 2006

Ao analisar a Figura 22, que leva em consideração a radiação solar no plano inclinado, segundo Pereira et al. (2006), esta inclinação apresenta forte influência sobre o albedo da superfície. Os maiores níveis de radiação deste plano ocorrem na faixa que vai do Nordeste ao Sudeste durante a Primavera e os menores valores em todas as regiões do Brasil ocorrem durante os meses de Inverno.

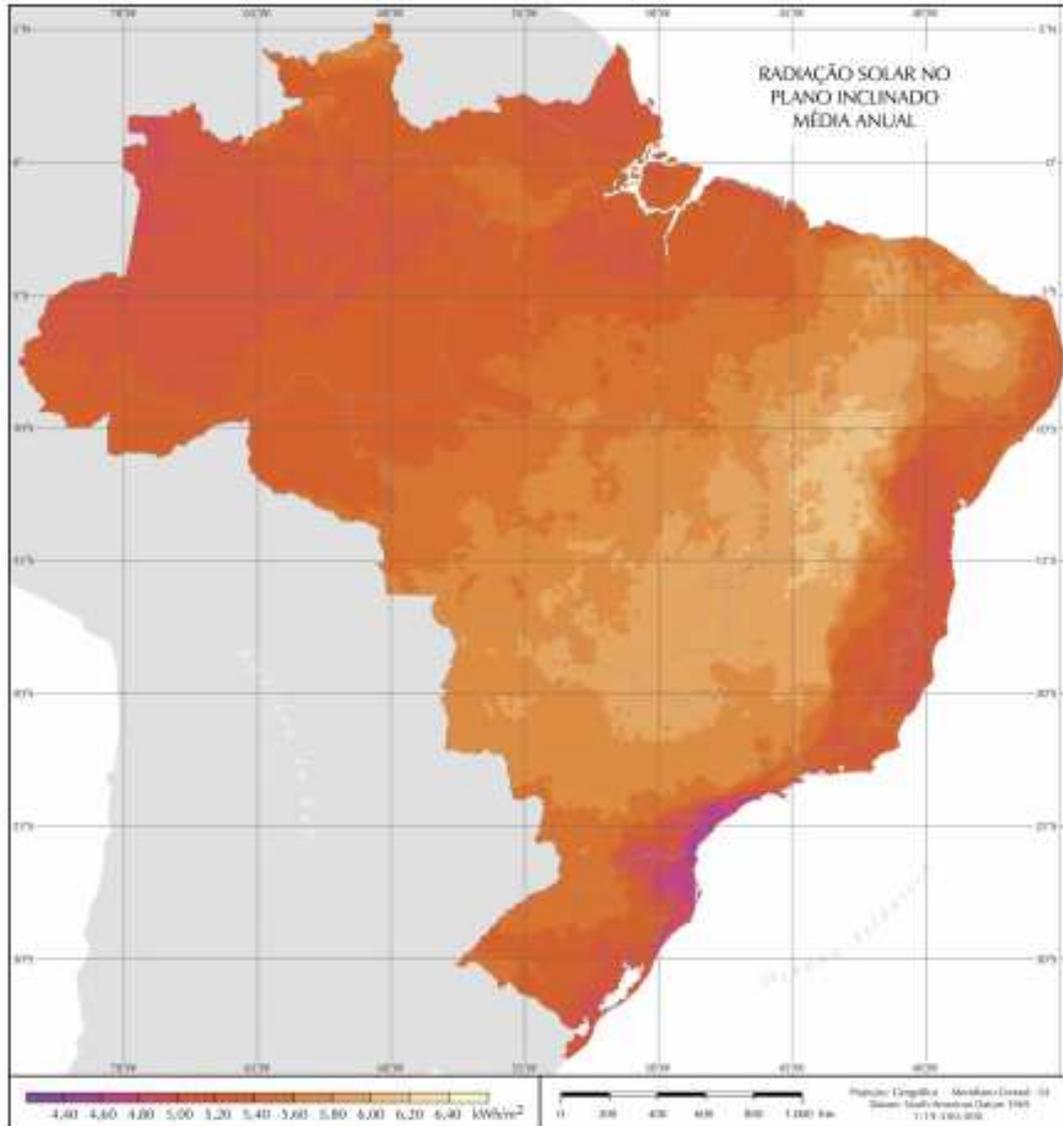


Figura 22 – Radiação solar no plano inclinado média diária anual.
 Fonte: PEREIRA et al., 2006

A Figura 23 mostra de uma forma simplificada, um resumo da radiação solar no território brasileiro, separando-o nas mesmas cinco regiões encontradas no Brasil.

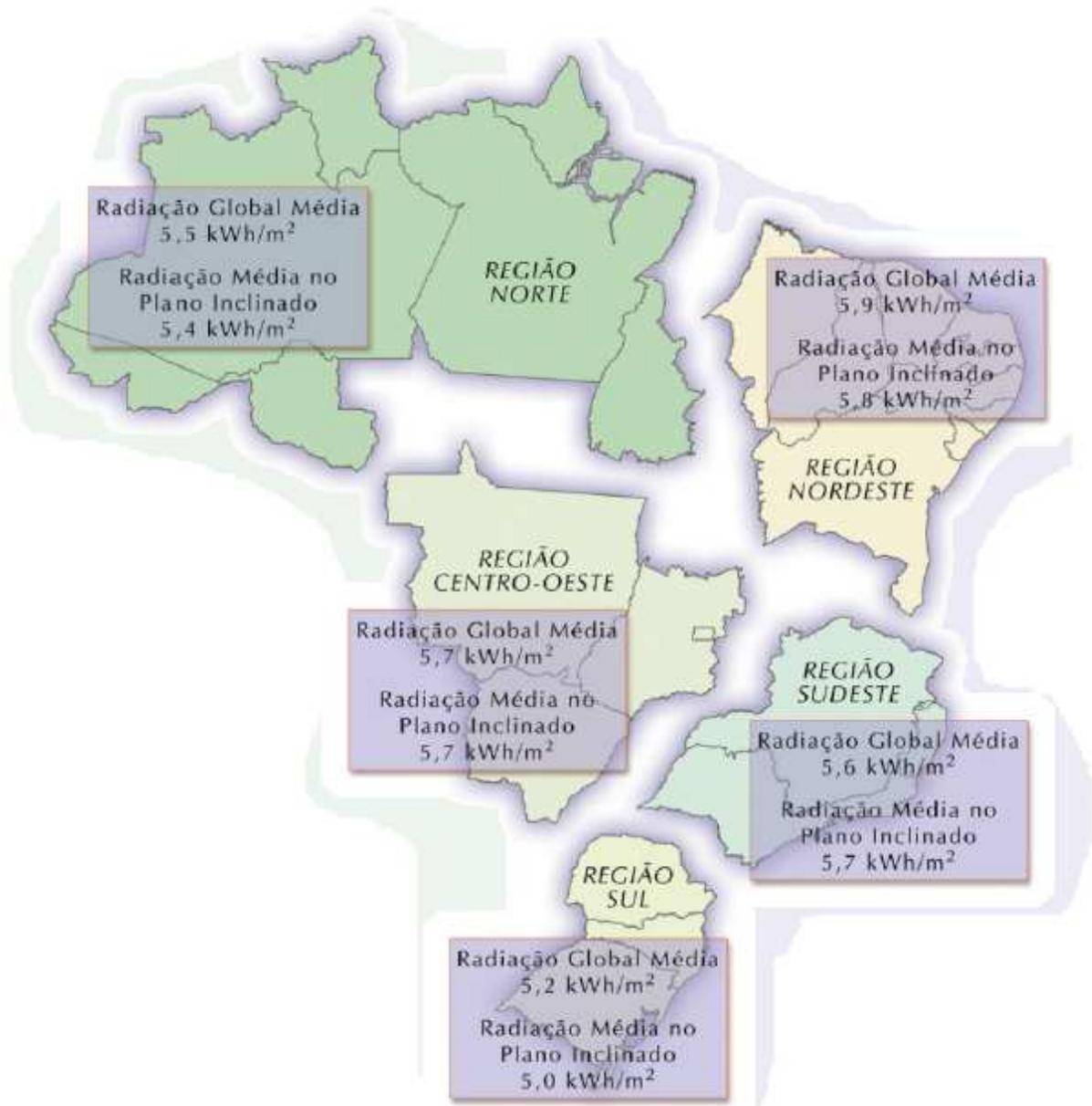


Figura 23 – Radiação média diária do total anual no plano horizontal e inclinado por região
 Fonte: PEREIRA et al., 2006

3.1.2 INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) surgiu pelo Decreto 7.672 do presidente Nilo Peçanha, em 18 de novembro de 1909, com o nome de Diretoria de Meteorologia e Astronomia. Ao longo do tempo, passou por vários nomes, mas só em 19 de novembro 1992 com a Lei 8.490 obteve a denominação de Instituto Nacional de Meteorologia.

O INMET possui dois tipos de estações, a estação meteorológica automática (EMA), que coleta dados meteorológicos, tais como pressão atmosférica,

temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar global, direção e velocidade dos ventos, e a cada hora, esses dados são integralizados e transmitidos para a unidade do INMET em Brasília, onde os dados recebidos são validados, através de um controle de qualidade e armazenados em um banco de dados e em seguida disponibilizados gratuitamente na internet. A Figura 24 mostra o detalhe de uma das estações automáticas.



Figura 24 – Detalhe de uma Estação Meteorológica Automática (EMA).
Fonte: INMET

A segunda estação é chamada de estação meteorológica convencional (EMC) na qual registra continuamente os parâmetros meteorológicos, esses dados são lidos e anotados a cada intervalo de 15 minutos. Com isso, estes dados são enviados a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer.

Este Banco de Dados Meteorológicos do INMET contém informações diárias digitalizadas desde 1961, e encontra-se em plena atividade anexando diariamente os dados. Estes dados estão disponíveis para consulta pública de meteorologistas, técnicos e estudantes.

O INMET administra mais de 400 estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil, como mostra Figura 25. Todos esses dados são direcionados a dez Distritos

Regionais que recebem, processam e enviam os mesmos para a sede, localizada em Brasília-DF. A sede, por sua vez, processa estes dados e os enviam por satélite para todo o mundo.



Figura 25 – Distribuição das Estações Meteorológicas Automáticas pelo território brasileiro
Fonte: INMET (2014)

3.1.3 ESCRITÓRIO VERDE

Em dezembro de 2011, foi inaugurado o Escritório Verde (EV) projeto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), uma proposta única no Brasil de uma edificação sustentável modelo de 150 m² que adotou diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas, visando verificar o desempenho destas estratégias, entre elas, a máxima eficiência energética (Escritório Verde, 2013). A Figura 26 ilustra a fachada do EV da UTFPR.



Figura 26 – Vista frontal do EV da UTFPR
Fonte: JUNIOR; JUNIOR; TIEPOLO (2014).

O SFVCR do EV da UTFPR tem uma potência instalada de 2,1kWp (10 módulos KYOCERA de tecnologia de silício Policristalino, modelo KD210GX-LP ligados em série) e um inversor monofásico em 220V de 2kW de potência nominal (PVPOWERED modelo PVP2000), entrou em operação em 14 de Dezembro de 2011. A área ocupada na cobertura da edificação para esse painel é de apenas 15 m² e até o fim de 2014 gerou aproximadamente 7,2 MWh de energia elétrica. A Figura 27 ilustra o painel fotovoltaico e o inversor do SFVCR do EV da UTFPR (JUNIOR; JUNIOR; TIEPOLO, 2014).



Figura 27 – Painel FV e inversor do EV da UTFPR
Fonte: JUNIOR; JUNIOR; TIEPOLO (2014).

3.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS BASES DE DADOS

Neste capítulo, foi realizada a comparação da base de dados de irradiação do ATLAS publicado em 2006, da base de dados do INMET e dos dados de irradiação do EV obtidos pelo piranômetro instalado em 2012. Para isso, foi necessário solicitar os dados do INMET e em seguida definir qual coordenada do ATLAS a ser utilizada.

Para solicitar os dados ao INMET, primeiramente foram analisadas as estações meteorológicas automáticas existentes, e ficou concluído que a estação A807 é a mais indicada, pois está situada em Curitiba, e mais se aproxima do Escritório Verde.

Após definir a estação A807, foi realizado um contato telefônico, e posteriormente e-mail oficial, solicitando os dados para o INMET que depois de uma semana foi enviado uma planilha contendo 23.219 linhas. Esta planilha contém os dados de irradiação solar global no plano horizontal, apresentados em kJ/m^2 por hora, no período de 01/01/2012 as 00h até 31/10/2014 às 23h. A Figura 28 exemplifica parte dessa tabela, mostrando apenas um dia completo de irradiação. Os dados de Novembro e Dezembro de 2014 foram obtidos através do site do INMET.

NOTA: Vale ressaltar que, no período de 19/07/2014 às 15h até 08/1/2014 às 17h a estação do INMET em análise, A807, esteve fora de operação por problemas técnicos, por este motivo não foi possível utilizar os dados destes dias para análise.

ESTAÇÃO METEOROLOGICA AUTOMATICA CURITIBA/PR						
ESTAÇÃO	ANO	MÊS	DIA	HORA (UTC)	Rad, kJ/m ²	
A807	2012	1	1	0	-1.788	
A807	2012	1	1	1	-1.666	
A807	2012	1	1	2	-1.820	
A807	2012	1	1	3	-0,733	
A807	2012	1	1	4	0,578	
A807	2012	1	1	5	-0,776	
A807	2012	1	1	6	0,171	
A807	2012	1	1	7	-1.124	
A807	2012	1	1	8	-2.536	
A807	2012	1	1	9	70.747	
A807	2012	1	1	10	345.241	
A807	2012	1	1	11	866.395	
A807	2012	1	1	12	1.024.769	
A807	2012	1	1	13	1.283.850	
A807	2012	1	1	14	2.234.279	
A807	2012	1	1	15	2.693.677	
A807	2012	1	1	16	1.857.888	
A807	2012	1	1	17	2.480.299	
A807	2012	1	1	18	2.456.715	
A807	2012	1	1	19	2.136.553	
A807	2012	1	1	20	958.245	
A807	2012	1	1	21	372.532	
A807	2012	1	1	22	65.250	
A807	2012	1	1	23	-1.817	

Figura 28 – Dados da tabela disponibilizada pelo INMET

Fonte: INMET

Primeiramente com os dados adquiridos, foram desprezados os valores negativos, considerando-os como zero. Este primeiro passo pode ser visto na Figura 29, mais uma vez foi utilizado um dia completo como exemplo.

ESTAÇÃO METEOROLOGICA AUTOMATICA CURITIBA/PR						
ESTAÇÃO	ANO	MÊS	DIA	HORA (UTC)	Rad, kJ/m ²	Zerar os numeros negativo
A807	2012	1	1	0	-1.788	0
A807	2012	1	1	1	-1.666	0
A807	2012	1	1	2	-1.820	0
A807	2012	1	1	3	-0,733	0
A807	2012	1	1	4	0,578	0,578
A807	2012	1	1	5	-0,776	0
A807	2012	1	1	6	0,171	0,171
A807	2012	1	1	7	-1.124	0
A807	2012	1	1	8	-2.536	0
A807	2012	1	1	9	70.747	70,747
A807	2012	1	1	10	345.241	345,241
A807	2012	1	1	11	866.395	866,395
A807	2012	1	1	12	1.024.769	1024,769
A807	2012	1	1	13	1.283.850	1283,85
A807	2012	1	1	14	2.234.279	2234,279
A807	2012	1	1	15	2.693.677	2693,677
A807	2012	1	1	16	1.857.888	1857,888
A807	2012	1	1	17	2.480.299	2480,299
A807	2012	1	1	18	2.456.715	2456,715
A807	2012	1	1	19	2.136.553	2136,553
A807	2012	1	1	20	958.245	958,245
A807	2012	1	1	21	372.532	372,532
A807	2012	1	1	22	65.250	65,25
A807	2012	1	1	23	-1.817	0

Figura 29 – Tabela desconsiderando os valores negativos.
Fonte: Os autores.

Em seguida foi transformada a unidade dos dados do INMET de kJ/m² para kWh/m², com esta transformação a unidade de ambas as bases se igualam. Para realizar esta transformação de unidades, basta multiplicar os valores de kJ/m² por 0,000278 conforme anexo A. Esta conversão pode ser visualizada na Figura 30.

ESTAÇÃO METEOROLOGICA AUTOMATICA CURITIBA/PR							
ESTAÇÃO	ANO	MÊS	DIA	HORA (UTC)	Rad, kJ/m ²	Zerar os numeros negativo	kWh/m ²
A807	2012	1	1	0	-1.788	0	0
A807	2012	1	1	1	-1.666	0	0
A807	2012	1	1	2	-1.820	0	0
A807	2012	1	1	3	-0.733	0	0
A807	2012	1	1	4	0,578	0,578	0,000160684
A807	2012	1	1	5	-0,776	0	0
A807	2012	1	1	6	0,171	0,171	0,000047538
A807	2012	1	1	7	-1.124	0	0
A807	2012	1	1	8	-2.536	0	0
A807	2012	1	1	9	70.747	70,747	0,019667666
A807	2012	1	1	10	345.241	345,241	0,095976998
A807	2012	1	1	11	866.395	866,395	0,24085781
A807	2012	1	1	12	1.024.769	1024,769	0,284885782
A807	2012	1	1	13	1.283.850	1283,85	0,3569103
A807	2012	1	1	14	2.234.279	2234,279	0,621129562
A807	2012	1	1	15	2.693.677	2693,677	0,748842206
A807	2012	1	1	16	1.857.888	1857,888	0,516492864
A807	2012	1	1	17	2.480.299	2480,299	0,689523122
A807	2012	1	1	18	2.456.715	2456,715	0,68296677
A807	2012	1	1	19	2.136.553	2136,553	0,593961734
A807	2012	1	1	20	958.245	958,245	0,26639211
A807	2012	1	1	21	372.532	372,532	0,103563896
A807	2012	1	1	22	65.250	65,25	0,0181395
A807	2012	1	1	23	-1.817	0	0

Figura 30 – Conversão da unidade de kJ/m² para kWh/m²
Fonte: Os autores.

Com os dados já convertidos em kWh/m², foi possível transformar a irradiação por hora em dias médios mensais de irradiação. Para isso, primeiramente foram somadas as irradiações das 24h de cada dia, e em seguida feito uma média diária mensal. A Tabela 3 apresenta essas médias diárias mensais no plano horizontal já calculada no período avaliado e na coluna da direita mostra a média desse mesmo período (que deste ponto em diante será chamado apenas de INMET MÉDIA).

Esta mesma Tabela será utilizada na comparação com os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Tabela 3 – Médias diárias mensais de irradiação no plano horizontal do INMET.

Médias diárias Mensais [kWh/m ² .dia]				
Mês	INMET 2012	INMET 2013	INMET 2014	INMET MÉDIA (2012-2014)
Jan	5,654	5,119	6,138	5,637
Fev	5,208	4,684	5,324	5,072
Mar	5,313	3,775	4,354	4,481
Abr	3,763	4,159	3,140	3,687
Mai	2,784	3,071	2,968	2,941
Jun	2,151	2,387	2,591	2,376
Jul	2,814	2,851	2,505	2,723
Ago	4,283	3,658		3,970
Set	4,654	3,700		4,177
Out	4,695	5,111	5,398	5,068
Nov	5,221	4,661	5,830	5,237
Dez	5,446	5,552	5,441	5,480

Fonte: Os autores.

A base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar foi disponibilizada em 2006 junto com a publicação do mesmo, e apresenta as médias de irradiação difusa, horizontal e inclinada.

Essa base histórica mostra as médias de irradiação dos 12 meses, a média anual e também a média das estações do ano, para cada coordenada mostrada nas duas primeiras colunas, conforme a Figura 31.

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	LONGITUDE	LATITUDE	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	ANUAL	PRIMAVERA	VERAO	OUTONO	INVERNO
2	-60,27	5,28	5,14	5,18	5,68	5,51	4,32	5,33	5,41	5,92	6,09	5,78	4,68	4,86	5,32	5,51	5,06	5,17	5,56
3	-60,18	5,28	5,14	5,18	5,68	5,51	4,32	5,33	5,41	5,92	6,09	5,78	4,68	4,86	5,32	5,51	5,06	5,17	5,56
4	-60,72	5,18	5,14	5,18	5,68	5,51	4,32	5,33	5,41	5,92	6,09	5,78	4,68	4,86	5,32	5,51	5,06	5,17	5,56
5	-60,63	5,19	5,16	5,63	5,86	5,61	4,61	5,33	5,41	5,92	6,11	5,78	5,08	5,04	5,32	5,51	5,28	5,36	5,56
6	-60,54	5,19	5,16	5,63	5,86	5,61	4,61	5,33	5,41	5,92	6,11	5,78	5,08	5,04	5,32	5,51	5,28	5,36	5,56
7	-60,45	5,19	5,16	5,63	5,86	5,61	4,61	5,33	5,41	5,92	6,11	5,78	5,08	5,04	5,32	5,51	5,28	5,36	5,56
8	-60,36	5,19	5,14	5,18	5,68	5,51	4,32	5,33	5,41	5,92	6,09	5,78	4,68	4,86	5,32	5,51	5,06	5,17	5,56
9	-60,27	5,19	5,06	5,03	5,47	5,42	4,23	5,33	5,43	5,93	6,05	5,78	4,67	4,77	5,26	5,50	4,95	5,04	5,56
10	-60,18	5,19	5,06	5,01	5,44	5,32	4,31	5,28	5,49	5,92	6,12	5,77	4,68	4,76	5,26	5,52	4,94	5,02	5,56
11	-60,09	5,19	5,06	5,01	5,44	5,32	4,31	5,28	5,49	5,92	6,12	5,77	4,68	4,76	5,26	5,52	4,94	5,02	5,56
12	-60,63	5,10	5,41	5,87	6,08	5,77	4,75	5,25	5,50	5,91	6,21	5,98	5,19	5,23	5,60	5,80	5,50	5,53	5,56
13	-60,54	5,10	5,26	5,57	5,84	5,59	4,68	5,27	5,47	5,97	6,28	6,01	5,20	5,01	5,51	5,83	5,28	5,37	5,57
14	-60,45	5,10	5,36	5,51	5,82	5,57	4,61	5,32	5,42	5,97	6,21	5,99	5,07	5,05	5,49	5,76	5,31	5,34	5,57
15	-60,36	5,10	5,31	5,39	5,73	5,46	4,37	5,31	5,42	5,93	6,17	5,89	4,79	5,04	5,40	5,62	5,24	5,19	5,56
16	-60,27	5,10	5,11	5,26	5,55	5,35	4,33	5,32	5,39	5,98	6,13	5,81	4,85	4,95	5,33	5,59	5,10	5,07	5,56
17	-60,17	5,10	5,08	5,32	5,57	5,42	4,41	5,37	5,45	5,97	6,20	5,89	5,12	4,89	5,39	5,74	5,10	5,13	5,60
18	-60,08	5,10	5,06	5,23	5,52	5,38	4,57	5,38	5,47	5,93	6,17	5,92	5,07	4,89	5,38	5,72	5,06	5,16	5,60
19	-59,99	5,10	5,06	5,23	5,52	5,38	4,57	5,38	5,47	5,93	6,17	5,92	5,07	4,89	5,38	5,72	5,06	5,16	5,60
20	-60,62	5,01	5,06	5,23	5,52	5,38	4,57	5,38	5,47	5,93	6,17	5,92	5,07	4,89	5,38	5,72	5,06	5,16	5,60
21	-60,53	5,01	5,44	5,76	6,08	5,76	4,93	5,27	5,54	6,03	6,32	6,09	5,44	5,26	5,66	5,95	5,48	5,59	5,61
22	-60,44	5,01	5,45	5,71	6,00	5,63	4,72	5,28	5,46	5,98	6,30	6,03	5,32	5,17	5,59	5,88	5,44	5,45	5,58
23	-60,35	5,01	5,39	5,63	5,86	5,55	4,47	5,30	5,44	5,98	6,20	5,92	5,10	5,15	5,50	5,74	5,39	5,29	5,57
24	-60,26	5,01	5,19	5,52	5,76	5,54	4,47	5,34	5,42	5,98	6,23	5,88	5,06	5,05	5,45	5,72	5,25	5,26	5,58
25	-60,17	5,01	5,14	5,50	5,74	5,53	4,60	5,38	5,45	5,98	6,13	5,95	5,11	5,07	5,46	5,73	5,24	5,29	5,60
26	-60,08	5,01	5,11	5,39	5,66	5,47	4,52	5,42	5,51	5,97	6,20	6,01	5,30	5,01	5,47	5,84	5,17	5,22	5,63
27	-59,99	5,01	5,11	5,39	5,66	5,47	4,52	5,42	5,51	5,97	6,20	6,01	5,30	5,01	5,47	5,84	5,17	5,22	5,63
28	-60,62	4,92	5,11	5,39	5,66	5,47	4,52	5,42	5,51	5,97	6,20	6,01	5,30	5,01	5,47	5,84	5,17	5,22	5,63
...

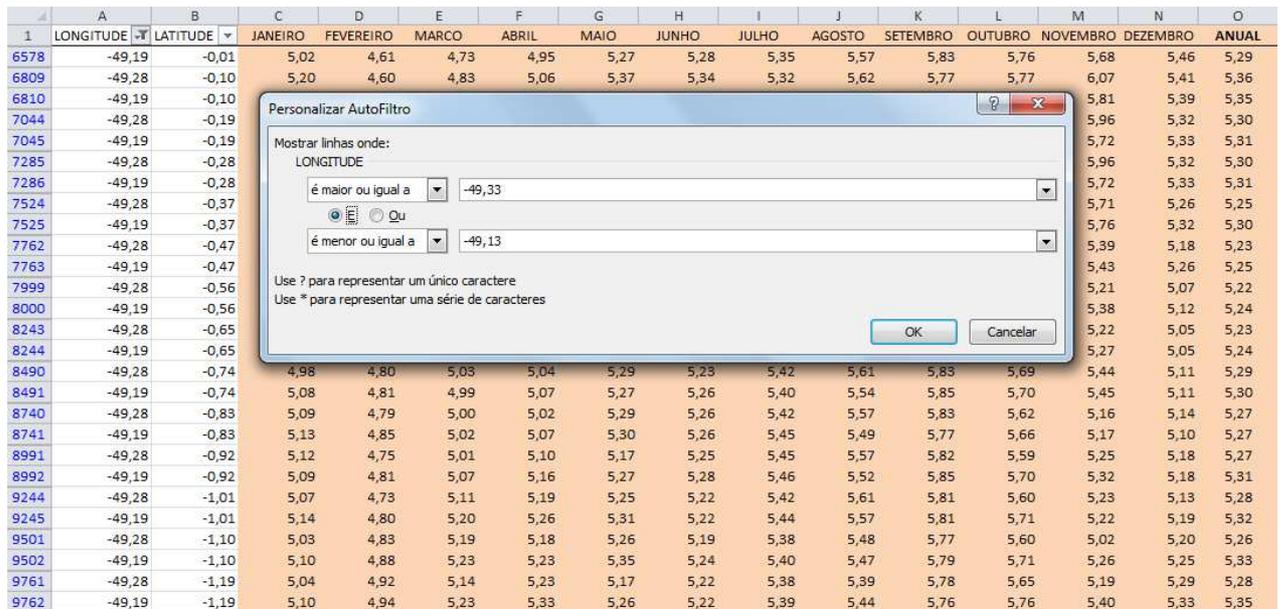
Figura 31 – Base de dados do ATLAS publicado em 2006.

Fonte: Os autores.

Para comparar com os valores de irradiação fornecidos pelo INMET, foi filtrada a base de dados do ATLAS, no plano global horizontal, publicado em 2006 (que deste ponto em diante será chamado apenas de ATLAS 2006). Esse filtro foi feito com as coordenadas aproximadas da estação da qual os dados do INMET foram obtidos, que são Latitude: -25,44 e Longitude: -49,23.

Como a tabela da base de dados do ATLAS 2006 apresenta as coordenadas de pontos equidistantes de 10 km ao longo do Brasil, ela foi filtrada para aproximadamente essas coordenadas, com um intervalo de +0,10 e -0,10, para abranger uma área maior, que engloba a estação do INMET.

Assim, foi filtrada a longitude, para um intervalo de -49,33 até -49,13, como mostra a Figura 32.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	LONGITUDE	LATITUDE	JANEIRO	FEVEREIRO	MARCO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	ANUAL	
6578	-49,19	-0,01	5,02	4,61	4,73	4,95	5,27	5,28	5,35	5,57	5,83	5,76	5,68	5,46	5,29	
6809	-49,28	-0,10	5,20	4,60	4,83	5,06	5,37	5,34	5,32	5,62	5,77	5,77	6,07	5,41	5,36	
6810	-49,19	-0,10												5,81	5,39	5,35
7044	-49,28	-0,19												5,96	5,32	5,30
7045	-49,19	-0,19												5,72	5,33	5,31
7285	-49,28	-0,28												5,96	5,32	5,30
7286	-49,19	-0,28												5,72	5,33	5,31
7524	-49,28	-0,37												5,71	5,26	5,25
7525	-49,19	-0,37												5,76	5,32	5,30
7762	-49,28	-0,47												5,39	5,18	5,23
7763	-49,19	-0,47												5,43	5,26	5,25
7999	-49,28	-0,56												5,21	5,07	5,22
8000	-49,19	-0,56												5,38	5,12	5,24
8243	-49,28	-0,65												5,22	5,05	5,23
8244	-49,19	-0,65												5,27	5,05	5,24
8490	-49,28	-0,74	4,98	4,80	5,03	5,04	5,29	5,23	5,42	5,61	5,83	5,69	5,44	5,11	5,29	
8491	-49,19	-0,74	5,08	4,81	4,99	5,07	5,27	5,26	5,40	5,54	5,85	5,70	5,45	5,11	5,30	
8740	-49,28	-0,83	5,09	4,79	5,00	5,02	5,29	5,26	5,42	5,57	5,83	5,62	5,16	5,14	5,27	
8741	-49,19	-0,83	5,13	4,85	5,02	5,07	5,30	5,26	5,45	5,49	5,77	5,66	5,17	5,10	5,27	
8991	-49,28	-0,92	5,12	4,75	5,01	5,10	5,17	5,25	5,45	5,57	5,82	5,59	5,25	5,18	5,27	
8992	-49,19	-0,92	5,09	4,81	5,07	5,16	5,27	5,28	5,46	5,52	5,85	5,70	5,32	5,18	5,31	
9244	-49,28	-1,01	5,07	4,73	5,11	5,19	5,25	5,22	5,42	5,61	5,81	5,60	5,23	5,13	5,28	
9245	-49,19	-1,01	5,14	4,80	5,20	5,26	5,31	5,22	5,44	5,57	5,81	5,71	5,22	5,19	5,32	
9501	-49,28	-1,10	5,03	4,83	5,19	5,18	5,26	5,19	5,38	5,48	5,77	5,60	5,02	5,20	5,26	
9502	-49,19	-1,10	5,10	4,88	5,23	5,23	5,35	5,24	5,40	5,47	5,79	5,71	5,26	5,25	5,33	
9761	-49,28	-1,19	5,04	4,92	5,14	5,23	5,17	5,22	5,38	5,39	5,78	5,65	5,19	5,29	5,28	
9762	-49,19	-1,19	5,10	4,94	5,23	5,33	5,26	5,22	5,39	5,44	5,76	5,76	5,40	5,33	5,35	

Figura 32 – Base de dados do ATLAS 2006 com filtro na coluna da longitude.

Fonte: Os autores.

Depois foi filtrada a latitude, na coluna B, no intervalo de -25,54 até -25,34, como mostrado na Figura 33.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	LONGITUDE	LATITUDE	JANEIRO	FEVEREIRO	MARCO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	ANUAL
82797	-49,28	-25,34	5,69	5,58	5,10	4,09	3,29	3,08	3,31	4,22	4,33	5,04	5,95	5,96	4,64
82865	-49,27	-25,43	5,67	5,47	5,05	4,12	3,29	3,08	3,28	4,21	4,30	5,02	5,97	5,92	4,61
82866	-49,18	-25,42	5,63	5,46	5,05	4,10	3,26	3,07	3,27	4,16	4,29	4,96	5,95	5,90	4,59
82931	-49,27	-25,52	5,66	5,38	4,99	4,15	3,31	3,04	3,26	4,19	4,29	5,03	6,01	5,91	4,60
82932	-49,17	-25,51	5,70	5,42	4,98	4,11	3,27	3,06	3,26	4,17	4,27	4,94	6,08	5,87	4,59
87225															
87226															
87227															
87228															
87229															
87230															
87231															
87232															
87233															
87234															
87235															
87236															
87237															
87238															
87239															
87240															
87241															
87242															
87243															
87244															
87245															
87246															

Figura 33 – Base de dados do ATLAS 2006 com filtro nas colunas de longitude e latitude.
Fonte: Os autores.

Desta maneira, observa-se que para esses determinados intervalos de latitude e longitude, existem cinco coordenadas que podem ser utilizadas para a comparação com a estação do INMET, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas filtradas da Base de dados do ATLAS.

Coordenadas do ATLAS	
Longitude	Latitude
-49,28	-25,34
-49,27	-25,43
-49,18	-25,42
-49,27	-25,52
-49,17	-25,51

Fonte: Os autores.

Porém, ao acessar o site do Projeto Sonda em agosto de 2014, e realizar o download da base de dados no plano horizontal, foi verificado que os valores de irradiação das bases de dados disponibilizadas em 2006 e 2014 divergem entre si.

Além da diferença nos valores de irradiação, a base de dados de 2006 apresenta os valores em kWh/m²dia, enquanto a base de dados de 2014 disponibiliza a tabela com a unidade de irradiação em Wh/m²dia. Como não pôde ser determinada a origem correta dessa diferença, foi usada para análise deste trabalho, a base de dados do ATLAS 2006.

Para determinar qual das cinco coordenadas apresentadas na Tabela 5 é a mais próxima da desejada, foi utilizado o software Google Earth, cuja janela inicial é mostrada na Figura 34.

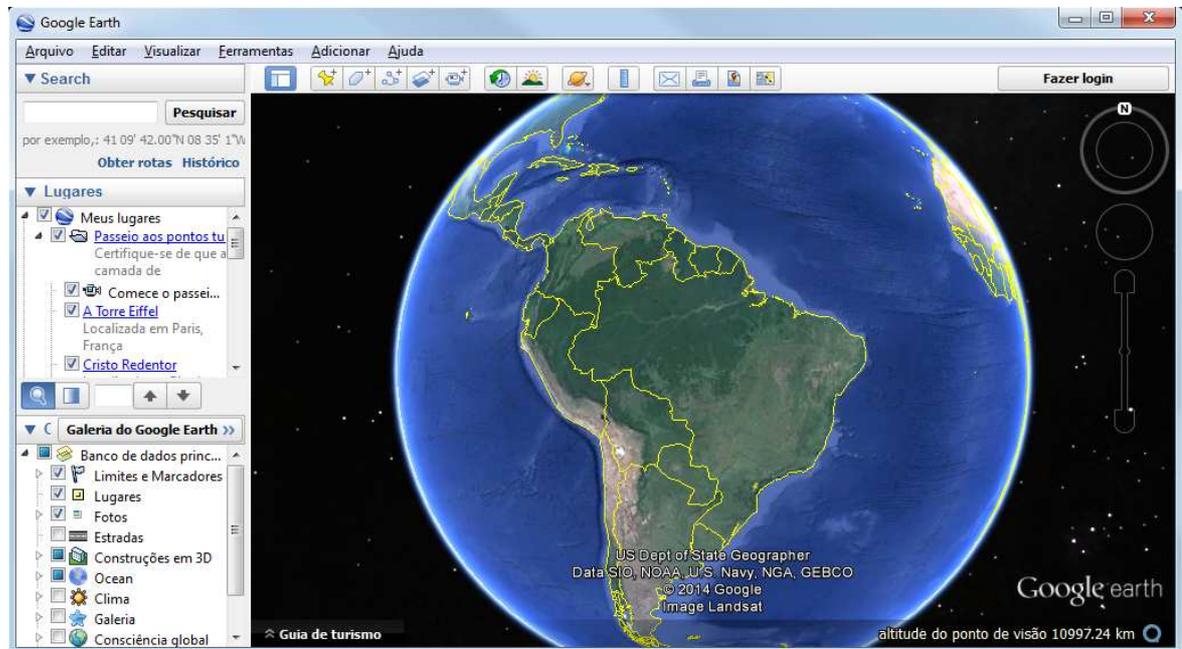


Figura 34 – Software Google Earth
Fonte: Os autores.

Foi colocado um marcador nas coordenadas do INMET, e também um marcador para cada uma das coordenadas restantes do ATLAS 2006, para assim, definir qual coordenada se aproxima mais da estação do INMET, como se pode observar nas Figuras 35 e 36.

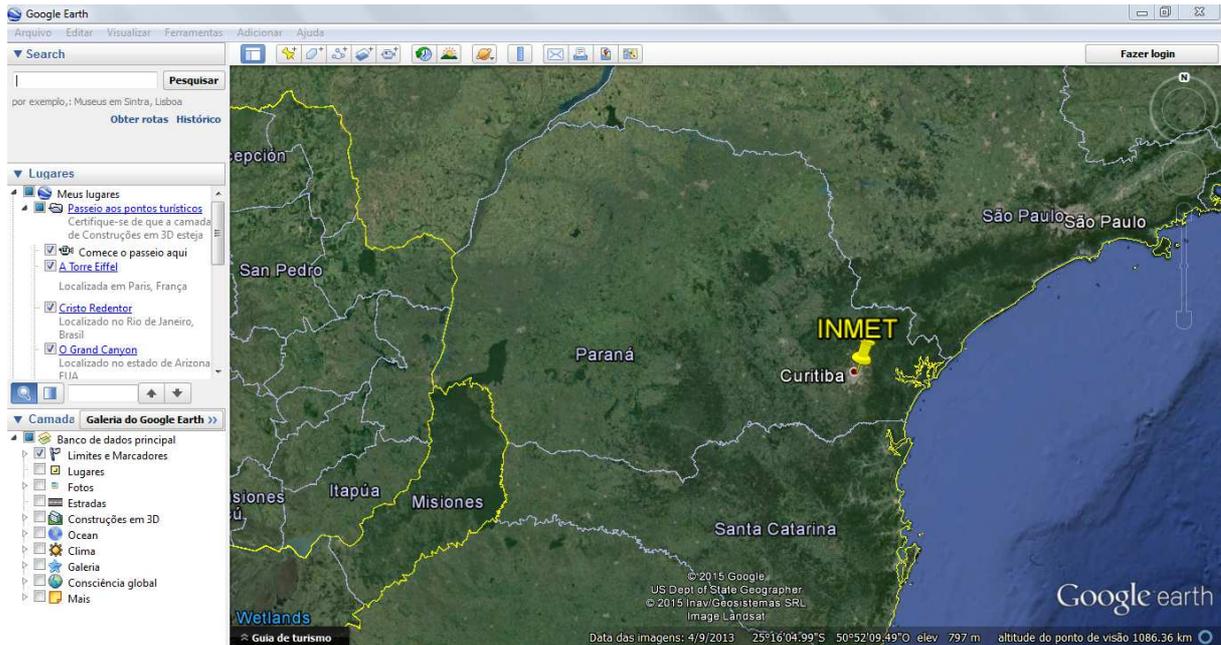


Figura 35 – Google Earth com o marcador nas coordenadas do INMET
Fonte: Os autores.

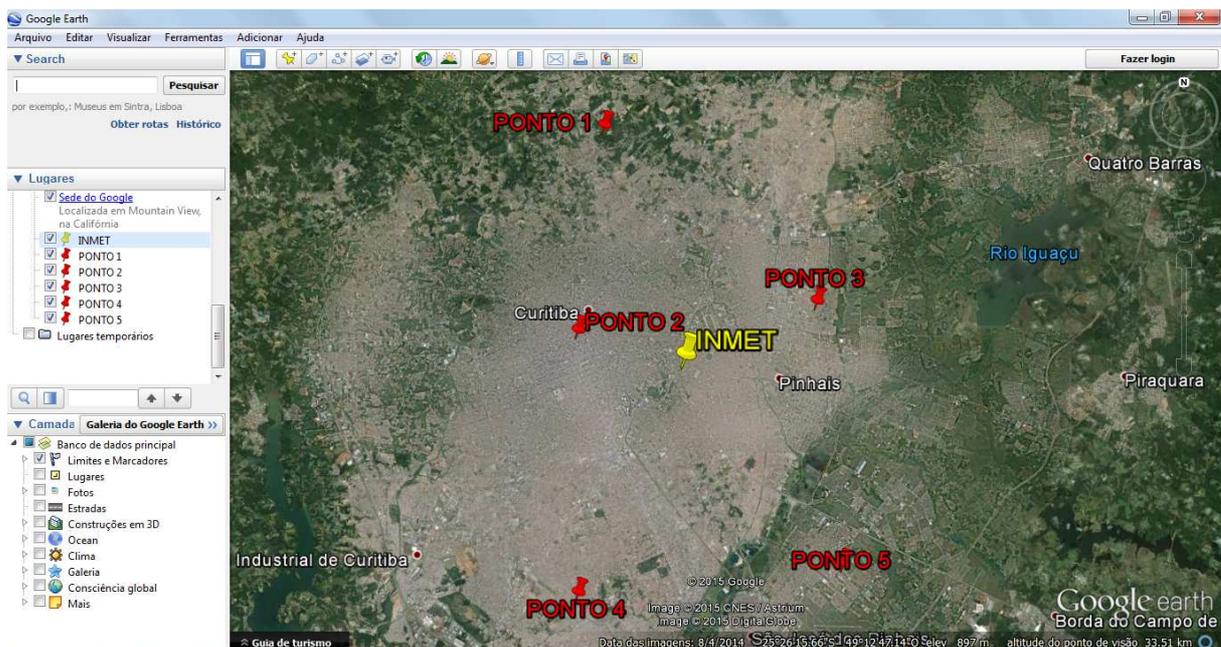


Figura 36 – Google Earth com o marcador nas coordenadas do INMET e nas cinco coordenadas da base filtrada do ATLAS 2006
Fonte: Os autores.

O Google Earth dispõe uma ferramenta que mede a distância aproximada entre dois pontos no mapa, e com essa ferramenta, foram medidas as distâncias entre a estação do INMET e cada uma das cinco coordenadas do ATLAS 2006. O resultado é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Distâncias entre a estação do INMET e as cinco coordenadas da base do ATLAS 2006.

Marcador	Longitude	Latitude	Distancia da estação do INMET (km)
PONTO 1	-49,28	-25,34	9,4
PONTO 2	-49,27	-25,43	4,17
PONTO 3	-49,18	-25,42	5,43
PONTO 4	-49,27	-25,52	9,72
PONTO 5	-49,17	-25,51	9,85

Fonte: Os autores.

As coordenadas mais próximas do INMET são as do PONTO 2, estando aproximadamente a 4,17 km de distância, como pode se observar na Figura 37.

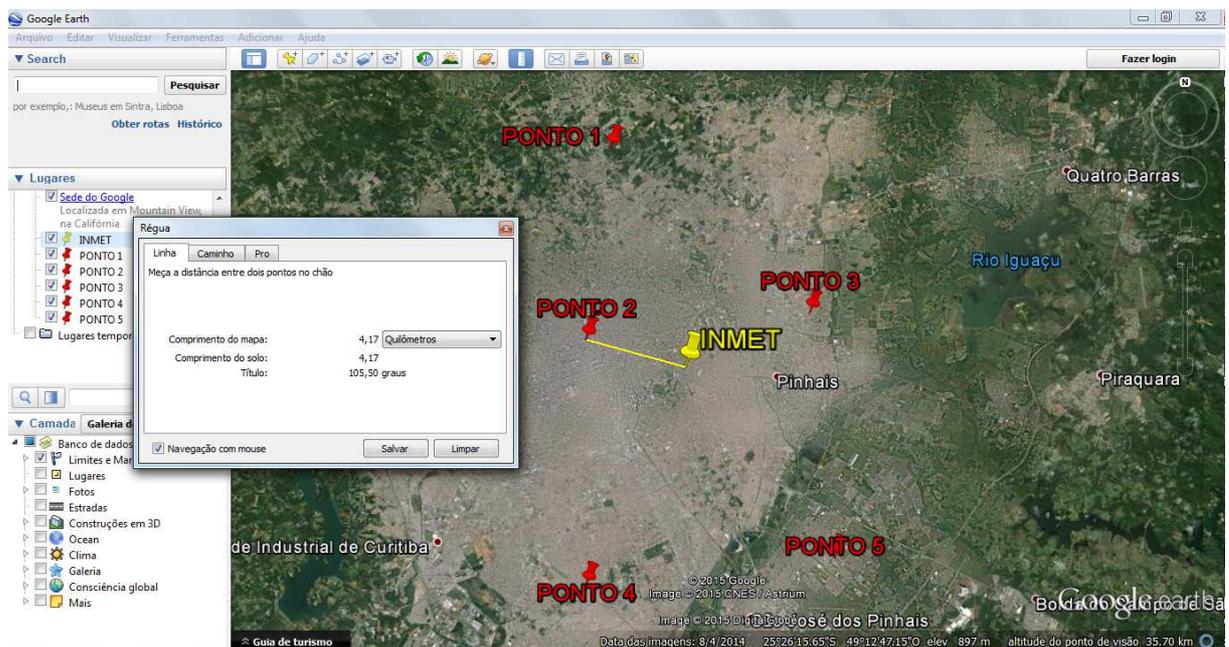


Figura 37 – Ferramenta de medição de distância entre dois pontos do Google Earth
Fonte: Os autores.

Assim, conclui-se que a os dados de irradiação das coordenadas -49,27 de longitude e -25,43 de latitude são os dados do ATLAS 2006 mais próximos das coordenadas da estação do INMET. A Tabela 6 mostra as médias diárias mensais dos dados até então obtidos.

Tabela 6 – Irradiações diárias médias no plano horizontal dos dados do INMET e do ATLAS 2006.

Médias diárias Mensais [kWh/m ² .dia]					
Mês	INMET 2012	INMET 2013	INMET 2014	INMET MÉDIA (2012-2014)	ATLAS 2006 (1995-2005)
Jan	5,654	5,119	6,138	5,637	5,67
Fev	5,208	4,684	5,324	5,072	5,47
Mar	5,313	3,775	4,354	4,481	5,05
Abr	3,763	4,159	3,140	3,687	4,12
Mai	2,784	3,071	2,968	2,941	3,29
Jun	2,151	2,387	2,591	2,376	3,08
Jul	2,814	2,851	2,505	2,723	3,28
Ago	4,283	3,658		3,970	4,21
Set	4,654	3,700		4,177	4,3
Out	4,695	5,111	5,398	5,068	5,02
Nov	5,221	4,661	5,830	5,237	5,97
Dez	5,446	5,552	5,441	5,480	5,92

Fonte: Os autores

Para ser feita uma análise junto ao Escritório Verde, foi convertido às médias diárias mensais do ATLAS 2006 e do INMET, que estão no plano horizontal, para a mesma inclinação que se encontram os módulos fotovoltaicos do EV que, segundo Urbanetz (2014), estão com uma inclinação de 15° e desvio azimutal de 22°.

Para isso foi utilizado 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 38 mostra a tela de entrada do RADIASOL, com os valores de irradiação do ATLAS 2006, já convertidas para o plano do EV, mostradas anteriormente na Tabela 6.

Banco de Dados

País: **Brazil** Estação: **ATLAS**

Latitude: **25,44** N/S: **S** Longitude: **49,23** E/W: **W**

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,67	5,47	5,05	4,12	3,29	3,08	3,28	4,21	4,30	5,02	5,97	5,92

Adicionar Gravar Excluir Limpar Cancelar

Figura 38 – Tela de entrada do RADIASOL com os dados do ATLAS 2006.
Fonte: Os autores.

Ajustando-se a inclinação de 15° e o desvio azimutal de 22° oeste, obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 39 e os valores de irradiação incidentes do ATLAS 2006 no plano dos módulos FV do EV, apresentados posteriormente na Tabela 7.

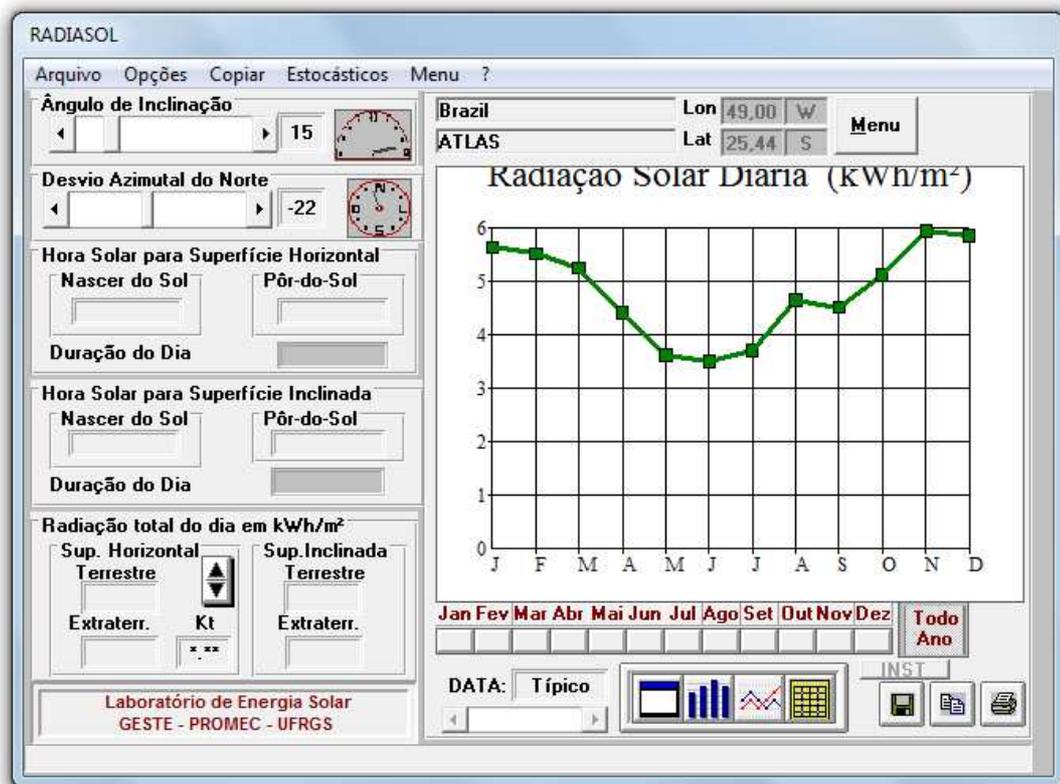


Figura 39 – Tela do RADIASOL com o gráfico de irradiação diária média, referente à base de dados do ATLAS 2006.
Fonte: Os autores.

Tabela 7 – Irradiação diária média do ATLAS 2006 obtida pelo programa RADIASOL para a inclinação e desvio azimutal encontrados no EV.

Média diária Mensal [kWh/m ² .dia]	
Mês	ATLAS 2006 (1995-2005)
Jan	5,644
Fev	5,524
Mar	5,255
Abr	4,42
Mai	3,623
Jun	3,507
Jul	3,715
Ago	4,659
Set	4,52
Out	5,124
Nov	5,952
Dez	5,86

Fonte: Os autores.

O mesmo foi feito para os três anos de dados do INMET, resultando na Tabela 8, que apresenta as médias diárias mensais dos anos 2012, 2013 e 2014 já convertidos para a inclinação e desvio azimutal do EV. Para uma primeira comparação, foi gerado o Gráfico 1 com os dados do INMET e ATLAS 2006.

Tabela 8 – Irradiações diárias médias do INMET no plano do painel FV do EV obtida pelo programa RADIASOL para inclinação e desvio azimutal encontrados no EV.

Média diária Mensal [kWh/m ² .dia]				
Mês	INMET 2012	INMET 2013	INMET 2014	INMET MÉDIA
Jan	5,654	5,119	6,138	5,637
Fev	5,208	4,684	5,324	5,072
Mar	5,313	3,775	4,354	4,481
Abr	3,763	4,159	3,140	3,687
Mai	2,784	3,071	2,968	2,941
Jun	2,151	2,387	2,591	2,376
Jul	2,814	2,851	2,505	2,723
Ago	4,283	3,658		3,970
Set	4,654	3,700		4,177
Out	4,695	5,111	5,398	5,068
Nov	5,221	4,661	5,830	5,237
Dez	5,446	5,552	5,441	5,480
Média diária anual	4,332	4,061	4,369	4,238

Fonte: Os autores.

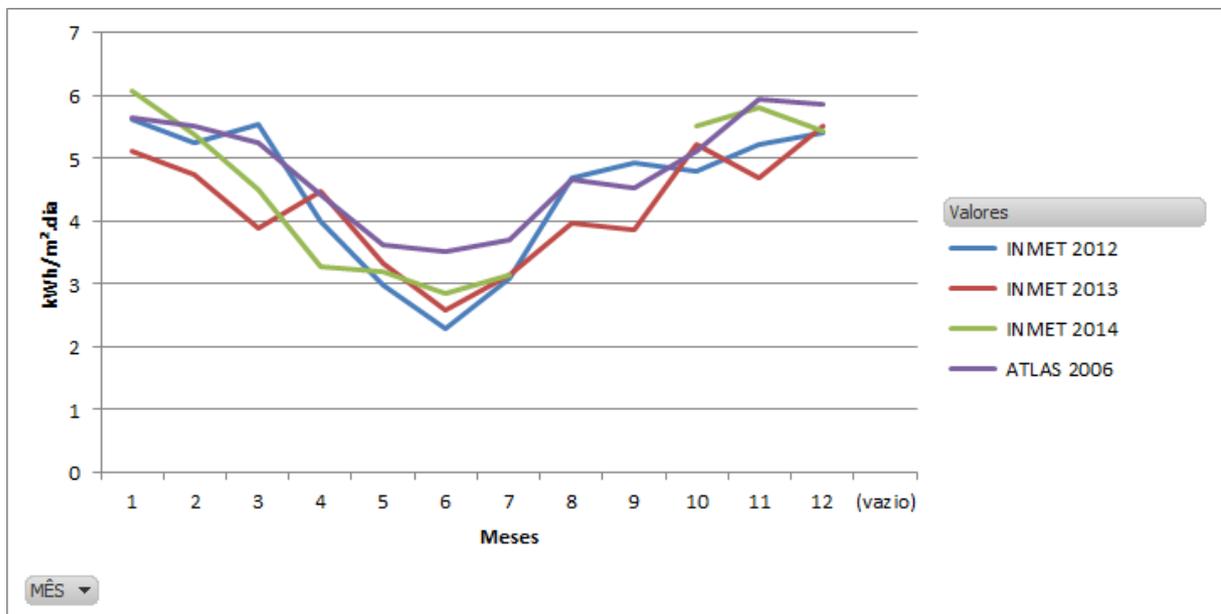


Gráfico 1 – Apresentação dos valores de irradiação do INMET e ATLAS 2006 no plano do EV.
Fonte: Os autores

3.3 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS

Com os dados de irradiações médias diárias mensais já referenciadas ao plano do Escritório Verde, ou seja, inclinação de 15° e o desvio azimutal de 22° oeste, pode-se começar as comparações.

Para uma comparação mais abrangente, os dados foram analisados de três maneiras diferentes, são elas:

- Primeiro, uma comparação mês a mês dos três anos de dados do INMET em relação aos dados do ATLAS 2006. Foi também feita uma comparação com os 6 meses de dados do piranômetro instalado no EV.
- Em seguida, foi feita uma comparação entre o INMET MÉDIA (média dos três anos do INMET) com os dados do ATLAS 2006.
- Posteriormente, foi comparada a irradiação média anual entre INMET MÉDIA e do ATLAS 2006. E por último, foi utilizada as médias anuais das duas bases de dados para comparar com os dados do EV.

3.3.1 Comparação mês a mês dos três anos de dados do INMET com o ATLAS 2006 e EV.

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 7 e 8, foi comparado os dados de irradiação, mantendo o INMET como base.

A Tabela 9 mostra a diferença entre as médias diárias mensais do INMET do ano de 2012 em relação ao ATLAS 2006.

Tabela 9 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2012 x valores do ATLAS 2006

Média diária Mensal [kWh/m ² .dia]			
Mês	INMET 2012	ATLAS 2006	Diferença entre valores de irradiação do INMET em relação ao ATLAS 2006
Jan	5,622	5,644	-0,39%
Fev	5,253	5,524	-5,16%
Mar	5,537	5,255	5,09%
Abr	3,994	4,420	-10,67%
Mai	2,984	3,623	-21,41%
Jun	2,300	3,507	-52,48%
Jul	3,087	3,715	-20,34%
Ago	4,685	4,659	0,55%
Set	4,917	4,520	8,07%
Out	4,785	5,124	-7,08%
Nov	5,224	5,952	-13,94%
Dez	5,411	5,860	-8,30%
Média Diária Anual	4,483	4,817	-7,44%

Fonte: Os autores

Em 2012, foi constatado que em nove meses (75%) do ano, as médias do ATLAS 2006 foram superiores ao INMET, chegando a uma diferença de mais de 50% em Junho. Já os meses que obtiveram a menor diferença foram Janeiro com -0,39%, e Agosto com 0,55%. Setembro foi o mês em que os valores medidos superaram a média histórica, chegando a uma diferença de + 8,07%. A variação total das diferenças deste ano foi de +8,07% à -52,48%.

Neste ano em análise, foi instalado um piranômetro no EV, que esteve em funcionamento, e registrou valores de irradiação, durante os últimos seis meses do ano, mostrados na Figura 40. Assim, foi feita uma comparação entre esses valores do EV, com os valores das duas bases de dados de 2012, mostradas na Tabela 9. Com isso, foi criado o Gráfico 2.

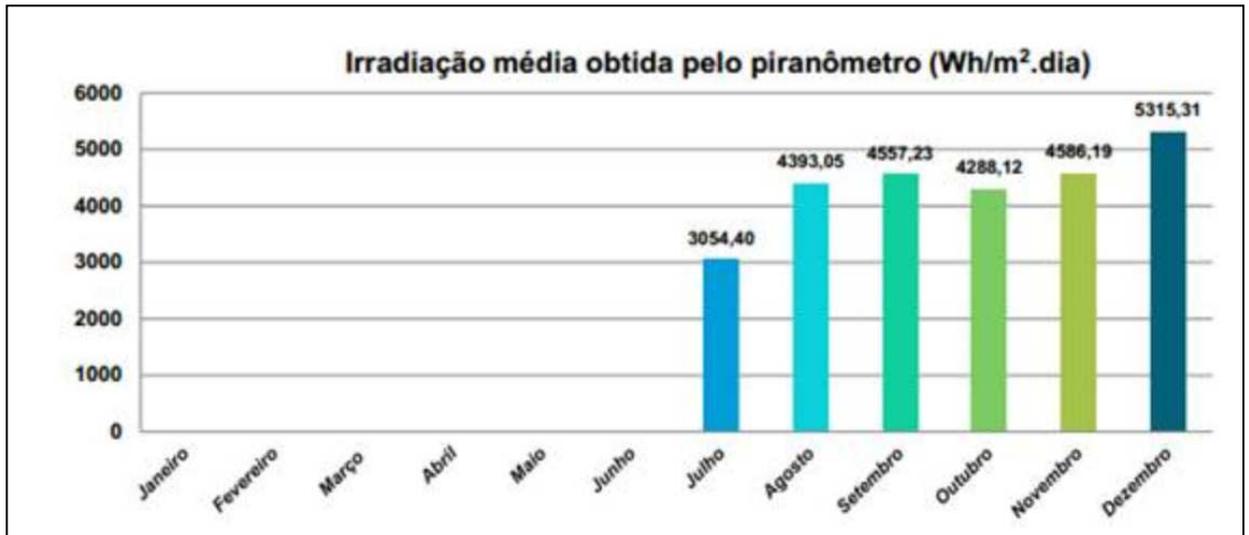


Figura 40 – Irradiação média do EV obtida pelo piranômetro em 2012.
Fonte: FUSANO (2013).

Os dados de irradiação do piranômetro, mostrados na Figura 40, foram convertidos para a unidade kWh/m².dia, e assim gerada a Tabela 10 para comparação com as bases de dados nesse período.

Tabela 10 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2012 x valores medidos no EV em 2012 x valores do ATLAS 2006

Média diária Mensal [kWh/m².dia]			
Mês	INMET 2012	EV 2012	ATLAS 2006
Jul	3,087	3,054	3,715
Ago	4,685	4,393	4,659
Set	4,917	4,557	4,520
Out	4,785	4,288	5,124
Nov	5,224	4,586	5,952
Dez	5,411	5,315	5,860

Fonte: Os autores

Analisando a Tabela 10, nota-se que em quatro meses, dos seis analisados, os dados do EV se aproximaram dos valores de irradiação do INMET, e a curva do Gráfico 2 comprova esse fato.

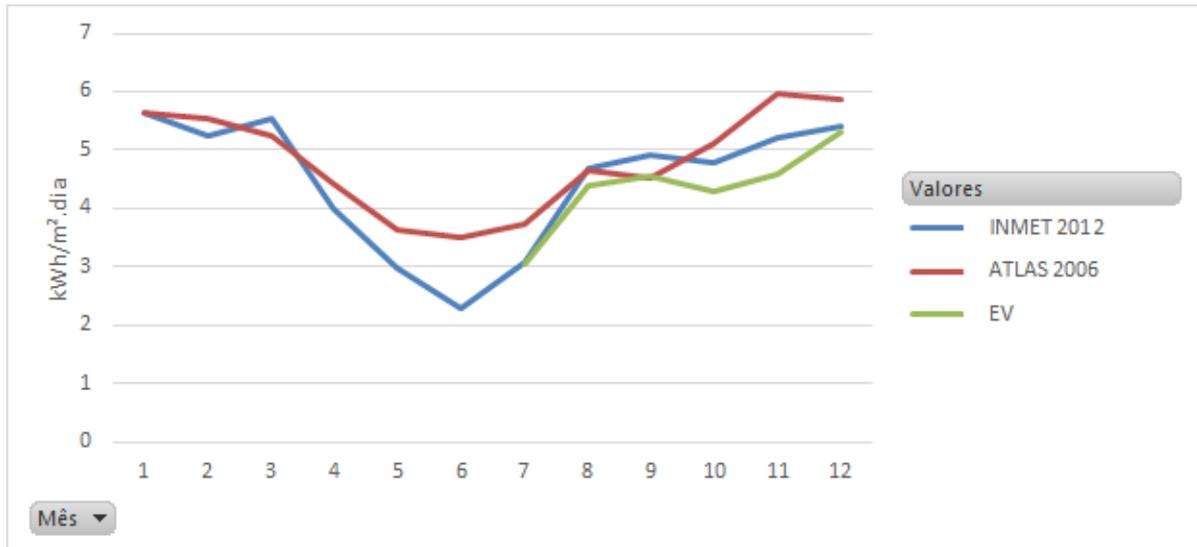


Gráfico 2 – Apresentação dos valores de irradiação do INMET de 2012 e do ATLAS 2006 no plano do EV, junto com os dados de irradiação obtidos pelo piranômetro do EV.

Fonte: Os autores

Ao analisar o Gráfico 2, percebe-se que, os dados medidos no EV se aproximam mais dos dados do INMET. Esta semelhança pode ser traduzida pelo fato desses dois dados serem valores medidos atuais.

Para visualização da comparação do ano de 2013, foi criada a Tabela 11, que mostra a diferença entre as fontes de dados de irradiação, sempre referenciados ao INMET. Percebe-se uma grande distorção entre as médias diárias mensais medidas em cada mês comparado à média histórica de 10 anos do ATLAS 2006.

Tabela 11 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2013 x valores do ATLAS 2006

Média diária Mensal [kWh/m ² dia]			
Mês	INMET 2013	ATLAS 2006 (1995 - 2005)	Diferença entre valores de irradiação do INMET em relação ao ATLAS 2006
Jan	5,117	5,644	-10,30%
Fev	4,731	5,524	-16,76%
Mar	3,889	5,255	-35,12%
Abr	4,467	4,42	1,05%
Mai	3,342	3,623	-8,41%
Jun	2,594	3,507	-35,20%
Jul	3,139	3,715	-18,35%
Ago	3,964	4,659	-17,53%
Set	3,851	4,52	-17,37%
Out	5,22	5,124	1,84%
Nov	4,678	5,952	-27,23%
Dez	5,515	5,86	-6,26%
Média Diária Anual	4,209	4,817	-14,45%

Fonte: Os autores

Em 2013, dos doze meses do ano, o ATLAS 2006 ficou acima do INMET em dez meses, e nos outros dois meses restantes, as médias do INMET não chegaram a 2% acima do ATLAS 2006. O mês de Junho, como no ano anterior, se manteve com a maior diferença, com -35,20%. A variação das diferenças deste ano foi de +1,84% à -35,20%.

No ano de 2014 a estação A807 apresentou algumas falhas e saiu de operação no período de 19/07/2014 às 16h até 08/10/2014 às 15h, por este motivo, na Tabela 12, os meses de Agosto e Setembro estão com valores zerados, já os meses de Julho e Outubro, apresentam a média dos dias medidos.

Tabela 12 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET em 2014 x valores do ATLAS 2006

Média diária Mensal [kWh/m ² .dia]			
Mês	INMET 2014	ATLAS 2006 (1995-2005)	Diferença entre valores de irradiação do INMET em relação ao ATLAS 2006
Jan	6,079	5,644	7,16%
Fev	5,373	5,524	-2,81%
Mar	4,496	5,255	-16,88%
Abr	3,283	4,42	-34,63%
Mai	3,205	3,623	-13,04%
Jun	2,848	3,507	-23,14%
Jul	3,139	3,715	-18,35%
Ago		4,659	-
Set		4,52	-
Out	5,521	5,124	7,19%
Nov	5,815	5,952	-2,36%
Dez	5,44	5,86	-7,72%
Média diária Anual	4,520	4,817	-6,57%

Fonte: Os autores

Em 2014, dentro dos dez meses analisados, o ATLAS 2006 se manteve acima do INMET em 8 deles. O mês de Março obteve a maior diferença este ano, chegando à -34,63%. Nos meses de Janeiro e Outubro, os dados do INMET se sobrepuseram ao do ATLAS 2006, as diferenças foram respectivamente +7,16% e +7,19%. A menor diferença ficou em Novembro com - 2,36%. A variação total das diferenças deste ano foi de +7,16 à -34,63.

Nesta primeira comparação, em todos os anos analisados, as médias do ATLAS 2006 se mantiveram quase todos os meses acima das médias do INMET. O Gráfico 3 mostra as Irradiações médias mensais encontradas no plano do painel FV do EV para os dados do INMET em 2012, 2013 e 2014, para os dados de uma média desses três anos, e para o ATLAS 2006.

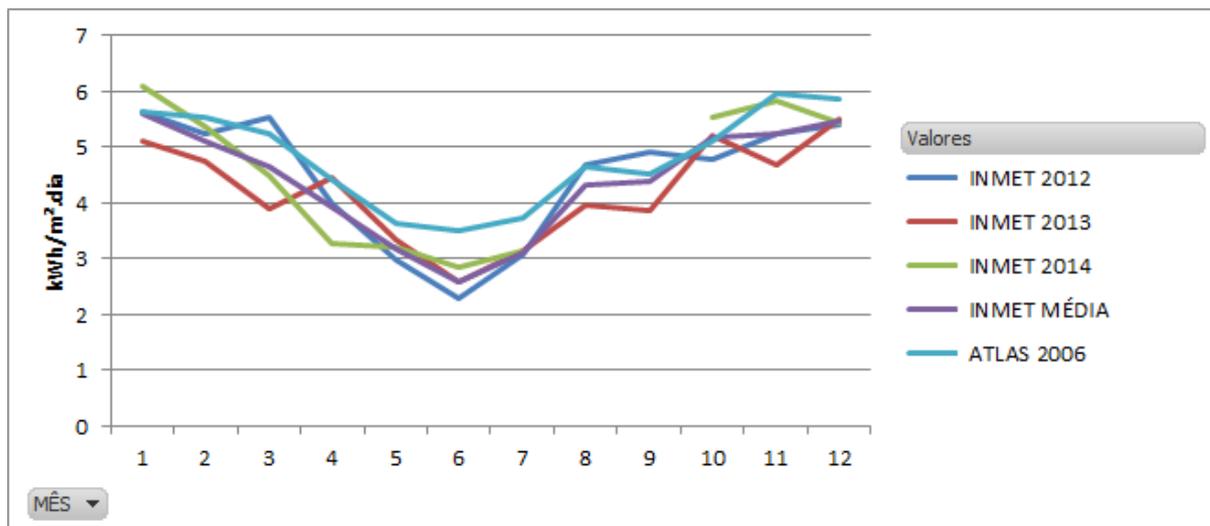


Gráfico 3 – Irradiações médias mensais encontradas no plano do painel FV do EV para as bases de dados INMET MÉDIA, 2012, 2013, 2014 e ATLAS 2006.

Fonte: Os autores

Segundo Pereira (2006), o verão é a época em que os maiores níveis de irradiação ocorrem. Ao realizar uma comparação entre os anos do INMET, foi detectado que as diferenças entre ATLAS 2006 e INMET são as menores. Em Janeiro de 2014, a diferença chegou a +7,16%, com um valor elevado comparado aos outros anos, que se traduz com base no SIMEPAR, onde eles relatam que janeiro de 2014 teve a temperatura mais alta dos últimos sete anos. (RPC, 2014)

Ao realizar uma comparação mês a mês, percebe-se grandes variações entre as duas bases de dados. Essa diferença pode ser justificada, pois os dados coletados do INMET são dados anuais enquanto os dados do ATLAS representam uma média histórica do período de 10 anos.

3.3.2 Comparação da Média mensal do INMET com o ATLAS 2006.

Levando em consideração que o ATLAS 2006 é uma média histórica de 10 anos de dados, foi realizado uma média diária mensal desses 3 anos de dados do INMET (INMET MÉDIA), como mostra a Tabela 13, para assim realizar uma nova comparação com o ATLAS, sempre referenciando a comparação ao INMET.

Tabela 13 – Valores de Irradiações médias diárias mensais do INMET MÉDIA x valores do ATLAS 2006

Médias diárias Mensais [kWh/m ² .dia]			
Mês	INMET MÉDIA (2012–2014)	ATLAS 2006 (1995-2005)	Diferença dos valores do INMET em relação ao ATLAS 2006
Jan	5,61	5,644	-0,61%
Fev	5,12	5,524	-7,89%
Mar	4,64	5,255	-13,25%
Abr	3,91	4,42	-13,04%
Mai	3,18	3,623	-13,93%
Jun	2,58	3,507	-35,93%
Jul	3,12	3,715	-19,07%
Ago	4,32	4,659	-7,85%
Set	4,38	4,52	-3,19%
Out	5,18	5,124	1,08%
Nov	5,24	5,952	-13,59%
Dez	5,46	5,86	-7,33%
Média diária Anual	4,404	4,816	-9,35%

Fonte: Os autores

Com a comparação das médias mensais, o ATLAS 2006 esteve 91,66% do ano acima do INMET. Sendo que o único mês em que o valor do INMET se sobrepôs ao ATLAS foi em Outubro com +1,08%.

Segundo Pereira (2006), a região Sul apresenta a maior variabilidade entre as estações do ano, isto é, o fluxo de radiação solar média no verão é cerca de 65% maior que o fluxo no Inverno, podemos confirmar esta diferença ao longo do ano no Gráfico 4, que mostra a média do INMET MÉDIA em comparação ao ATLAS 2006.

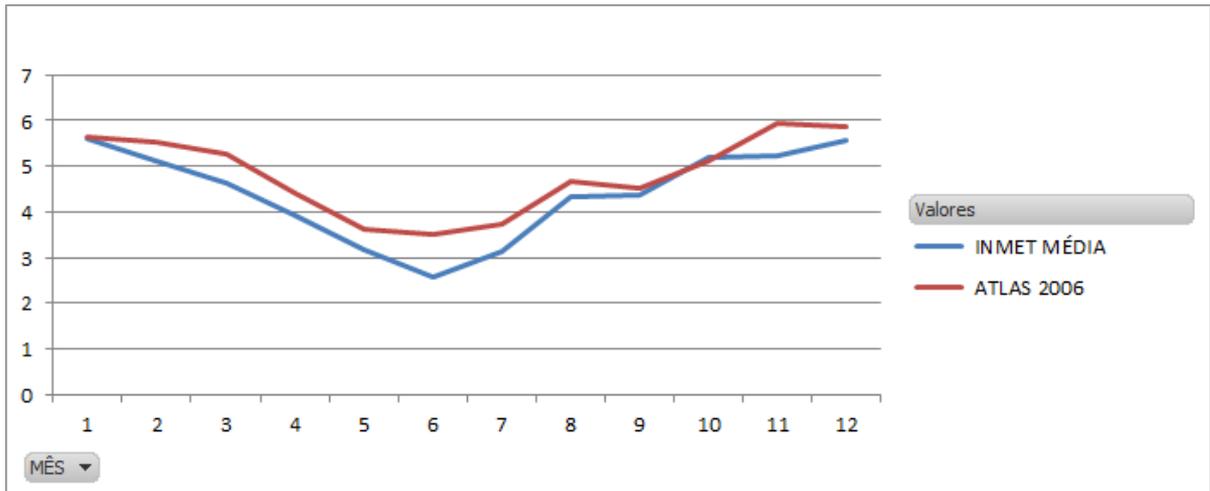


Gráfico 4 – Diferença das Irradiações diárias médias no plano do painel FV do EV entre a INMET MÉDIA e o ATLAS 2006.

Fonte: Os autores

3.3.3 Comparação da Média anual do INMET MÉDIA com o ATLAS 2006.

Para realizar esta comparação, foi utilizada a ultima linha da Tabela 13. Esta linha representa à irradiação média anual, ou seja, um dia médio de irradiação do ano.

Analisando o Gráfico 5, percebe-se que a diferença entre ATLAS 2006 e INMET MÉDIA na média anual, não chega a 10%, diferente do que acontece nas comparações anteriores, onde era apontada as diferenças mês a mês.

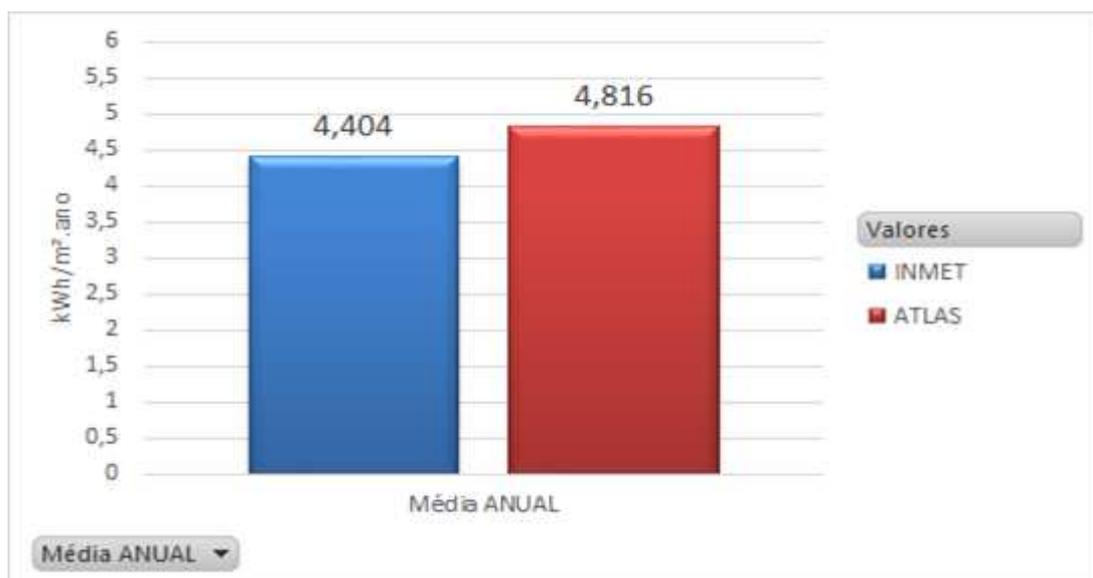


Gráfico 5 – Diferença das Irradiações médias anuais do INMET MÉDIA e do ATLAS 2006 no plano do EV.

Fonte: Os autores

Com a média anual dos dados do ATLAS 2006 e INMET MÉDIA, apresentados no Gráfico 5, foi possível comparar os dados apresentados com os dados do Escritório Verde.

Segundo Fusano (2012) os valores obtidos correspondem ao período de seis meses completos, e com isso foi possível estimar a média anual espelhando os dados para os valores em que não foram feitas as medições, resultando em uma média de irradiação diária no ano de 2012 de 4,32 kWh/m².dia. O Gráfico 6 apresenta a diferença entre os dados.

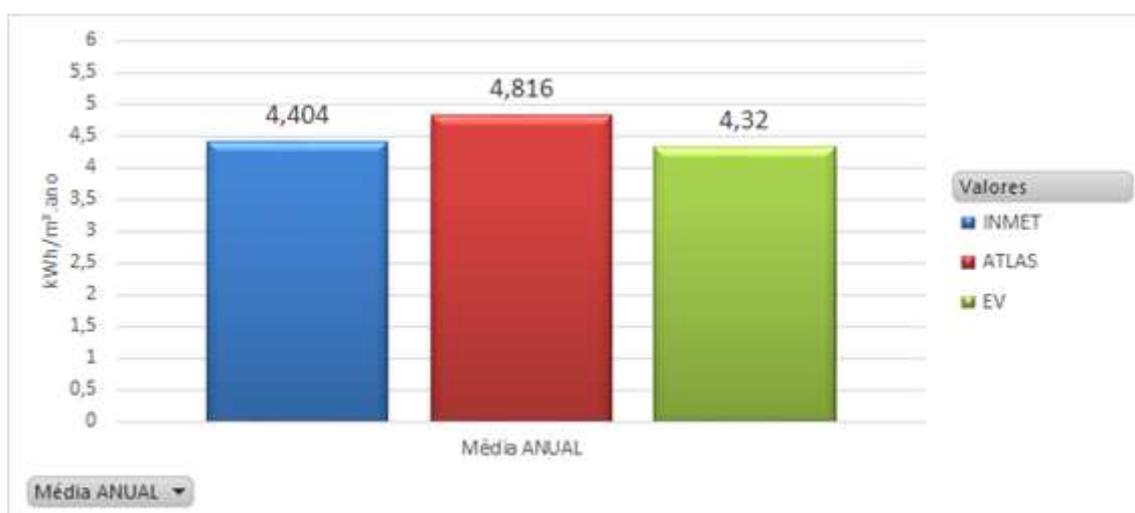


Gráfico 6 – Diferença das Irradiações médias anuais do INMET MÉDIA e do ATLAS 2006 no plano do EV e dos dados reais do EV.

Fonte: Os autores

Em uma rápida análise, foi possível perceber que quando se compara dados reais, como é o caso do INMET e do EV, os valores encontrados são muito próximos. Neste caso, a diferença não chegou a 2%, ficando em 1,91%. Já em comparação com o ATLAS 2006, que detém um histórico de dez anos incluídos nos seus dados, essa diferença se acentua e chega a 10,30%.

O Gráfico 7, apresenta a irradiação média anual de todos os dados contidos neste capítulo.

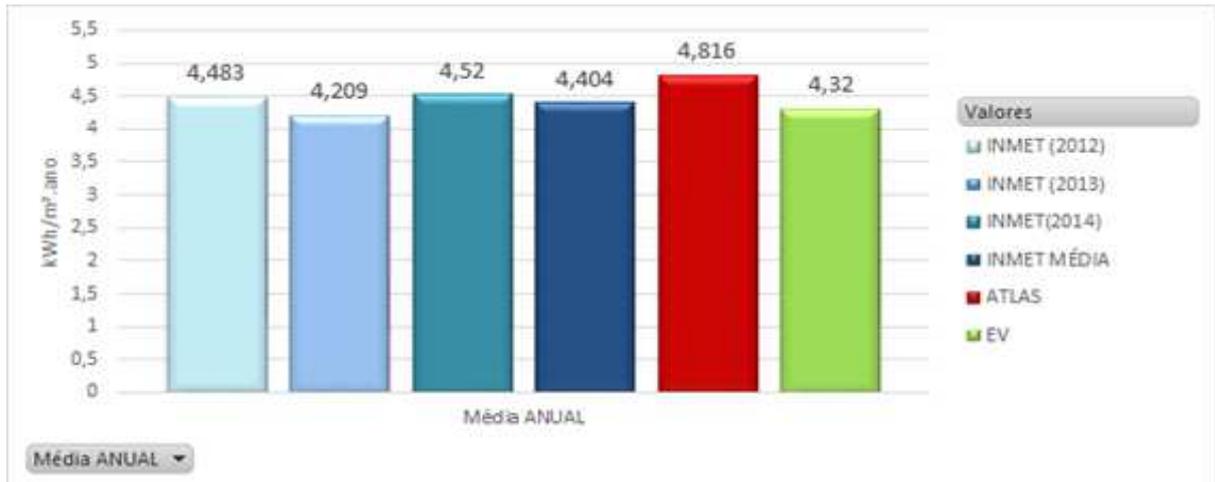


Gráfico 7 – Irradiações médias anuais das bases do INMET, da base do ATLAS 2006, e da média dos valores do EV.

Fonte: Os autores

Visto isso, notou-se que quanto maior for à amostragem de dados do INMET, existe uma tendência de se aproximar dos dados do ATLAS 2006.

Ao analisarmos os dados do Gráfico 7, é possível perceber a diferença de ano para ano. Analisando primeiramente somente os dados do INMET, foi possível perceber que dos três anos, 2014 foi o ano com mais irradiação solar, 6% a mais que 2013, ano com os menores níveis de irradiação. A média do INMET MÉDIA ficou abaixo do ATLAS em quase 10%, implicando que os anos que contemplam os dados do ATLAS, foram anos de irradiação solar elevadas.

4. CÁLCULO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO EM CURITIBA

4.1 A CIDADE DE CURITIBA

Curitiba é a capital do Estado do Paraná, um dos três Estados que compõem a Região Sul da República brasileira. Sua fundação oficial data de 29 de março de 1693, quando foi criada a Câmara. É uma cidade com 1.851.215 habitantes, sua área total é de 434,967 Km², gerando assim uma das maiores densidades demográficas do país com 4.255,99 hab./Km². A "mítica imigrante do trabalho" (observação do poeta Paulo Leminski, falecido no século passado) aliada a gestões municipais sem quebra de continuidade, acabou criando uma Curitiba planejada e premiada internacionalmente, em gestão urbana, meio ambiente e transporte coletivo. (PERFIL DE CURITIBA, 2014).

Curitiba enfrenta agora o desafio de grande metrópole, onde a questão urbana é repensada sob o enfoque humanista de que a cidade é primordialmente de quem nela vive. Seu povo, um admirável cadinho que reuniu estrangeiros de todas as partes do mundo e brasileiros de todos os recantos, ensina no dia-a-dia a arte do encontro e da convivência. (PERFIL DE CURITIBA, 2014).

4.1.1 Conjuntura energética da grande Curitiba

A Copel foi criada em outubro de 1954, é a maior empresa do Paraná e atua com tecnologia de ponta nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia, além de telecomunicações. Opera um abrangente e eficaz sistema elétrico com parque gerador próprio de usinas, linhas de transmissão, subestações, linhas e redes elétricas do sistema de distribuição e um moderno e poderoso sistema óptico de telecomunicações que integra todas as cidades do Estado. Efetua em média, mais de 70 mil novas ligações a cada ano, atendendo praticamente 100% dos domicílios nas áreas urbanas e passa de 90% nas regiões rurais (A COPEL, 2014).

O consumo energético de Curitiba atual é de 4.697.216 MWh. Os dados foram consultados no caderno estatístico dos municípios (IPARDES, 2014).

4.2 CÁLCULO PARA DETERMINAR O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE FOTOVOLTAICA

Para estimar o potencial de geração fotovoltaica em Curitiba foi calculado, com base no INMET MÉDIA e no ATLAS 2006, a geração de EE.

Para os dados do INMET MÉDIA foi utilizada a equação de Energia Elétrica em função da irradiação média e da potência do sistema. E para determinar a geração de EE com os dados do ATLAS 2006, foi utilizado como base o Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná.

4.2.1 Cálculo da energia elétrica em Curitiba com base nos dados do INMET

Para o cálculo da energia elétrica gerada em Curitiba com os dados do INMET, foi utilizada Equação (2):

$$\text{Energia Elétrica} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) = \frac{\text{Pot. Pannel(kWp)} \times \text{Irradi. média} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times \text{dia} \right) \times \text{TD}}{\text{Gstc} \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)} \quad (2)$$

Onde:

- Pot. Pannel: potência do sistema fotovoltaico;
- Irradi. média: valor da irradiação;
- TD: Taxa de Desempenho ou *Performance Ratio*;
- Gstc: irradiância solar na condição STC (1000 W/m², temperatura ambiente de 25°C, e Massa de Ar de 1,5).

A seguir foi citado cada componente da equação (2), e seus valores especificados.

4.2.1.1 Potência do sistema Fotovoltaico

Nos anos de 2002 e 2003, Rossi e Krüger (2004) realizaram um levantamento em alguns bairros da cidade de Curitiba, das porcentagens de ocupação de solo. Foram considerados catorze bairros da cidade: Bairro Alto, Cajuru, Fazendinha,

Portão, Santa Felicidade, São Brás, São Lourenço, Barreirinha, Campo Comprido, Cidade Industrial, Mercês, Pinheirinho, Santa Quitéria e Xaxim.

Em cada bairro foi obtida uma foto aérea de uma área com aproximadamente 49.000 m². Com isso foi realizado um quantitativo de cada área para estabelecer qual era a porcentagem dos seguintes elementos: área verde (matas e bosques), área construída, área pavimentada, área livre (gramados, plantações e terra batida) e área de água (piscinas, rios, córregos e lagos) (ROSSI; KRÜGER, 2004).

Com esta amostra, pode-se calcular uma média aproximada da área construída em Curitiba, ou seja, 24,05% da cidade é formada por edificações. Segundo a Prefeitura Municipal de Curitiba (2013), a cidade possui uma área de 434,967 km². Com isso conclui-se que aproximadamente 104,61 km² da cidade de Curitiba é composta de edificações, porém nem toda edificação é apta para a exploração do potencial fotovoltaico. Algumas coberturas das edificações podem não estar aptas para instalação dos módulos voltados para o norte geográfico, algumas podem ter um desvio azimutal considerável, devido às limitações físicas e outros fatores.

Então foi considerada como premissa neste trabalho, que apenas 8% da área de edificações de Curitiba estão em condições ideais, ou muito próximas das ideais, para a instalação do sistema fotovoltaico, logo, a área total para geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos é de 8,4 km².

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE -, que é um órgão vinculado ao Ministério de Minas e Energia, publicou em 2012 uma nota técnica com o título de Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Essa nota técnica mostra a eficiência na conversão direta da energia do Sol em energia Elétrica para módulos disponíveis no mercado e a comparação das áreas necessárias para a produção de 1 kWp. Com isso, conforme essa nota técnica, para implantar 1 kWp, utiliza-se em torno de 8 m² de módulos fotovoltaicos com tecnologia de Silício Policristalino. Desta forma, considerando que a área disponível na cidade de Curitiba é de 8,4 km², então a potência que poderia ser implantada nessa área é de aproximadamente 1,05 GWp.

4.2.1.2 Irradiação Média

Para calcular a EE gerada em condições ideais, a irradiação disponibilizada pelo INMET precisou ser convertida para um plano ideal, onde as condições de inclinação e orientação fossem otimizadas para o sistema ficar o mais próximo do ideal. Assim, com o auxílio do software RADIASOL, foi convertido os dados da média dos 3 anos do INMET, contidos na Tabela 3 (média mensal dos dados de irradiação dos anos 2012, 2013 e 2014), para as condições ideais, ou seja, inclinação igual à latitude, que para a cidade de Curitiba a latitude considerada foi de $25,42^\circ$, e orientação igual ao Norte Verdadeiro (geográfico). A Figura 41 mostra os dados no plano horizontal inseridos no software RADIASOL e a Figura 42 mostra o gráfico desses dados já convertidos para o plano ideal.

The screenshot shows the RADIASOL software interface. At the top, it says "Selecione um país e uma estação" (Select a country and a station). Below this, there are two dropdown menus: "País" (Country) set to "Brazil" and "Estação" (Station) set to "INMET MÉDIA". To the right, there is a small globe icon with the text "RADIÇÃO SOLAR" above it. Below the dropdowns are three buttons: "OK", "Editar" (Edit), and "Sair" (Exit). The main part of the interface contains input fields for "Latitude" (25,00), "N/S:" (S), "Longitude" (49,00), and "E/W:" (W). Below these is a table of monthly radiation data in kWh/m²:

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,64	5,07	4,48	3,68	2,94	2,37	2,72	3,97	4,17	5,06	5,23	5,48

At the bottom of the table, it says "Radiação em kWh/m²".

Figura 41 – Tela inicial do RADIASOL com os dados de irradiação do INMET MEDIA inseridos.
Fonte: Os autores.

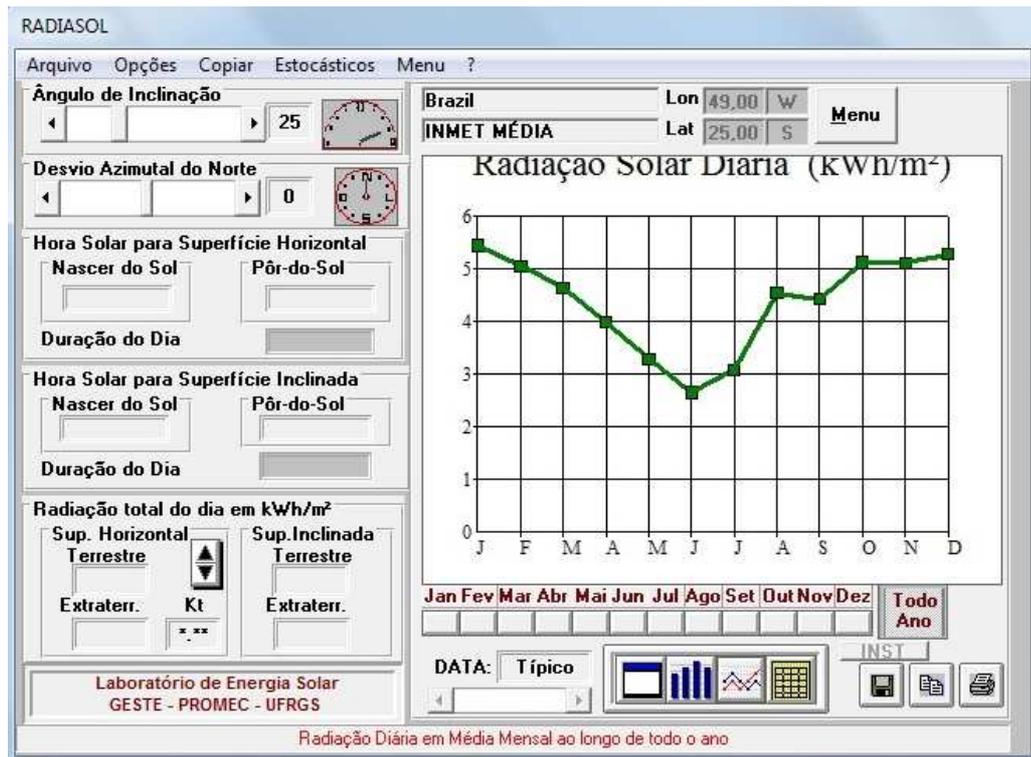


Figura 42 – Tela do RADIASOL com os dados de irradiação do INMET MÉDIA convertidos para o plano ideal.
Fonte: Os autores.

A Tabela 14, obtida através da Figura 42, apresenta os valores de irradiação média diária mensal. Através dela foi possível determinar a média diária anual de irradiação igual a 4,39 kWh/m².dia. Este valor foi utilizado para o cálculo estimado da geração de EE por fonte fotovoltaica.

Tabela 14 – Médias diárias mensais e a média diária anual da base INMET MÉDIA convertida para o plano inclinado (considerado ideal de geração).

Média diária Mensal [kWh/m ² .dia]	
Mês	INMET MÉDIA (2012-2014)
Jan	5,45
Fev	5,05
Mar	4,65
Abr	3,98
Mai	3,29
Jun	2,65
Jul	3,09
Ago	4,54
Set	4,42
Out	5,13
Nov	5,11
Dez	5,28
Média diária anual	4,39

Fonte: Os autores.

4.2.1.3 Taxa de Desempenho

A 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 (condição STC) incidentes no painel fotovoltaico, normalmente vinculada a um ano de operação, normalmente expressa em porcentagem (URBANETZ e CASAGRANDE, 2012). De outra forma pode 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 (TIEPOLO et al., 2013).

A Equação (3) apresenta a grandeza em questão, onde *Yield* é a relação entre a energia gerada (kWh) e a potência FV instalada (kWp), normalmente vinculada a um ano de operação.

$$TD(\%) = \frac{Yield}{Irradiação/1000} \quad (3)$$

Para o cálculo do potencial fotovoltaico de Curitiba foi considerado a Taxa de Desempenho utilizada na elaboração do mapa fotovoltaico do Paraná, que é 75% ou 0,75 (TIEPOLO et al., 2014).

4.2.1.4 G_{stc} - irradiância solar na condição STC

Um módulo fotovoltaico é geralmente identificado pela sua potência de pico (W_p), mas para isso algumas características compatíveis com a aplicação específica devem ser observadas. A definição de pico de um módulo fotovoltaico é feita nas condições-padrão de ensaio (STC, do inglês Standard Test Conditions), considerando irradiância solar de 1.000 W/m² sob uma distribuição espectral padrão para massa de ar de 1,5 e temperatura de célula de 25°C. Com isso foi utilizado G_{STC} igual a 1 kW/m² (ROCHA, 2014).

4.2.1.5 Apresentação dos resultados

Para calcular a energia elétrica gerada estimada em Curitiba com os dados de irradiação do INMET, foi utilizada a Equação (2). Considerado as premissas adotadas, onde a Pot. Pannel é igual a 1,05 GW_p, a Irradiação diária média é 4,39 kWh/m².dia, a TD é 0,75 e o G_{stc} é igual a 1kW/m², obteve-se o seguinte resultado:

$$\text{Energia Elétrica} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) = \frac{1,05(\text{GWp}) \times 4,39 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times \text{dia} \right) \times 0,75}{1 \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)}$$

$$\text{Energia Elétrica} = 3,457 \text{ GWh/dia}$$

Portanto, considerando a média dos três anos de dados analisados do INMET MÉDIA, para a potência definida (1,05 GW_p), um dia médio tem uma geração estimada de 3,457 GWh/dia. Para estimar a geração de EE anual, este valor foi multiplicado pelo número de dias de um ano, ou seja, 365 dias, tendo como resultado, uma geração média anual estimada de 1,261 TWh/ano.

4.2.2 Cálculo da energia elétrica em Curitiba com base nos dados do ATLAS 2006

Para calcular a energia elétrica gerada em Curitiba com os dados de irradiação do ATLAS 2006, foi usado o Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná, mostrado na Figura 43.

A escala de cores representa na parte superior os valores de irradiação global anual no plano inclinado e com os módulos orientados para o norte geográfico, enquanto na parte inferior são apresentados os valores correspondentes de energia elétrica anual estimada, gerada por um sistema de 1kWp e com TD de 0,75 (TIEPOLO et al., 2014).

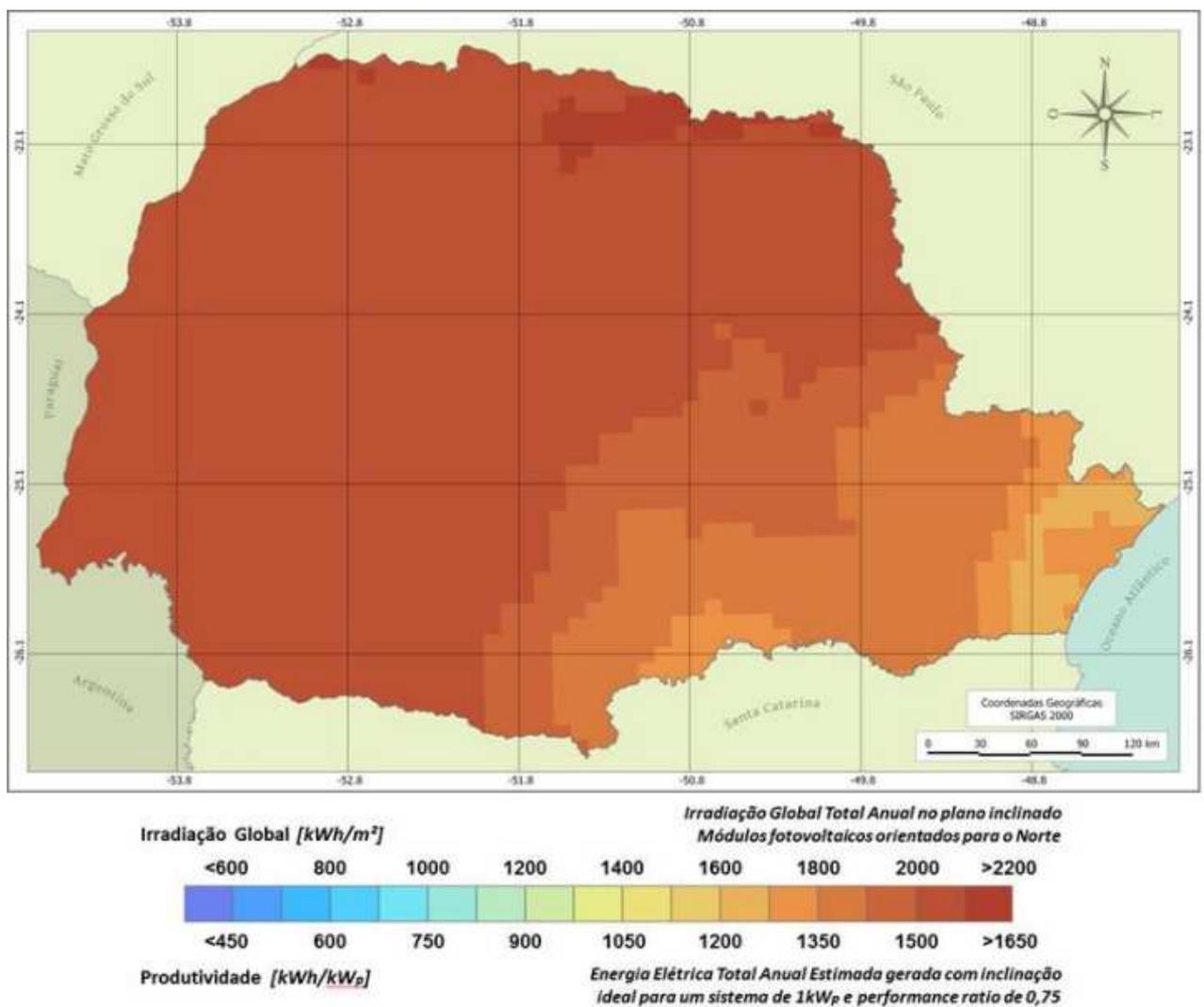


Figura 43 – Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná
Fonte: TIEPOLO et al., 2014

Considerando o Mapa Fotovoltaico para a cidade de Curitiba, conforme apresentado na Figura 43, os valores estimados de EE média diária gerada para um sistema de 1 kWp, variam entre 1350 kWh/kWp (menor valor gerado para um dia médio) e 1425 kWh/kWp (maior valor gerado para um dia médio). Então em média, Curitiba gera aproximadamente 1387,5 kWh/kWp de EE para um sistema de 1kWp.

Considerando o sistema de 1,05 GWp, estipulado como premissa no item 4.1.1, e o Mapa Fotovoltaico da Figura 43, a EE estimada para Curitiba é de 1,45 TWh/ano.

4.3 RESULTADOS

Ao calcular a geração estimada de EE, com ambas as fontes de dados, foi possível perceber que, mantendo a mesma taxa de desempenho, mas mudando a maneira de calcular a geração de EE, a variação entre as fontes se mantém próximas, neste caso 15,08%, como mostra o Gráfico 8. Para o ATLAS 2006 foi utilizado o Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná (Figura 43), e para o INMET foi utilizado a Equação (2).

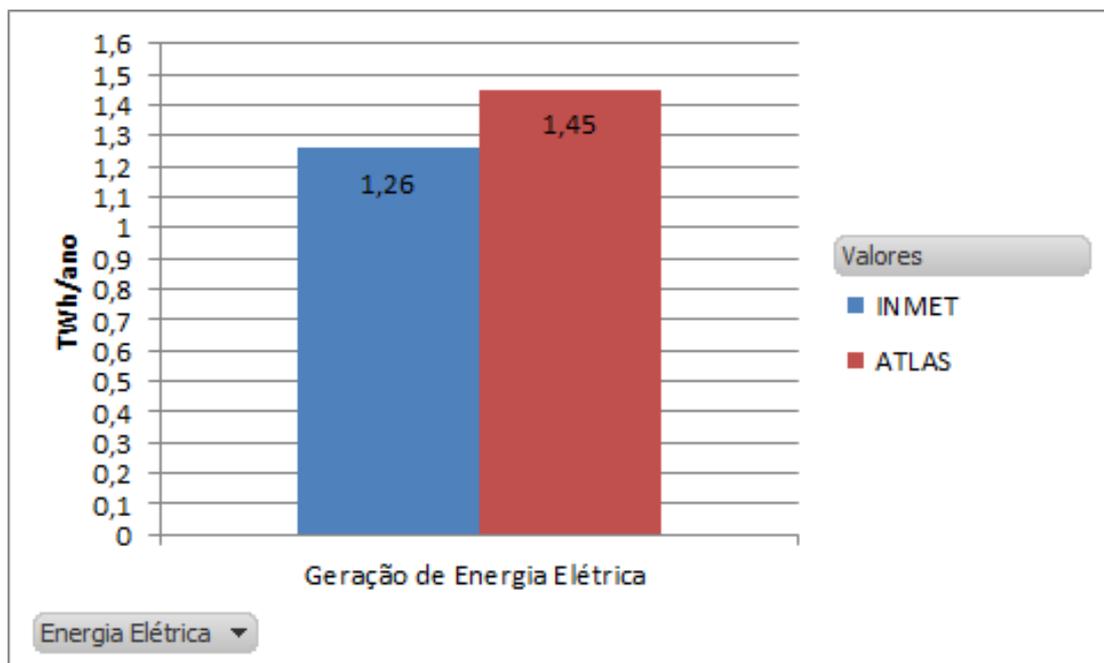


Gráfico 8 – Diferença da Geração estimada de EE anual.

Fonte: Os Autores

4.4 CONSUMO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

4.4.1 Premissas adotadas e cálculos

O crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil, conforme estudo divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética, na Nota Técnica de Agosto de 2014, vem apresentando rápida evolução, implicando em taxas anuais de expansão significativamente superiores ao crescimento da economia e da própria demanda energética.

Segundo caderno estatístico município de Curitiba, disponibilizado no site do IPARDES, o Município de Curitiba, consumiu em 2013 o equivalente a 4,83 TWh/ano.

A partir do valor do consumo de 2013 acima e com o potencial de geração de EE por fonte fotovoltaica já calculado e disponibilizado no Gráfico 8, determina-se o percentual de uma possível participação da fonte fotovoltaica na matriz energética de Curitiba. Primeiramente foi feito o cálculo com a EE gerada em um ano, utilizando os valores de irradiação do INMET.

Considerando o consumo de Curitiba de 4,83 TWh e a estimativa de energia elétrica gerada por fonte fotovoltaica do INMET, com base no Gráfico 8, que é de 1,26 TWh/ano, tem-se, como apresentado no Gráfico 9, que hoje 26,08% do consumo de EE atual de Curitiba, poderia ser suprida por geração fotovoltaica.

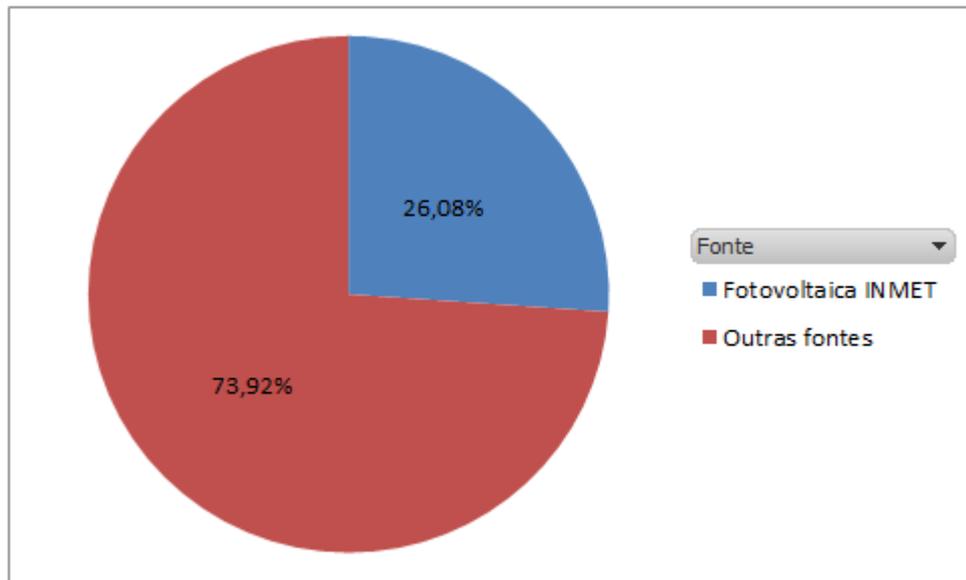


Gráfico 9 – Percentual de Capacidade de Atendimento ao consumo atual de Curitiba por fonte fotovoltaica com os dados do INMET.

Fonte: Os Autores

Levando em consideração que os dados do INMET e do ATLAS 2006 ficaram próximos, também foi determinado o percentual que os dados do ATLAS poderiam contribuir na demanda do consumo da cidade de Curitiba.

Considerando que Curitiba consumiu em 2013 o equivalente a 4,83 TWh/ano e que a geração estimada pelos dados do ATLAS 2006, mostrado no Gráfico 8, é de 1,45 TWh/ano, tem-se que, aproximadamente 30% da geração de EE em Curitiba poderia ser atendida por fonte fotovoltaica, como mostra o Gráfico 10.

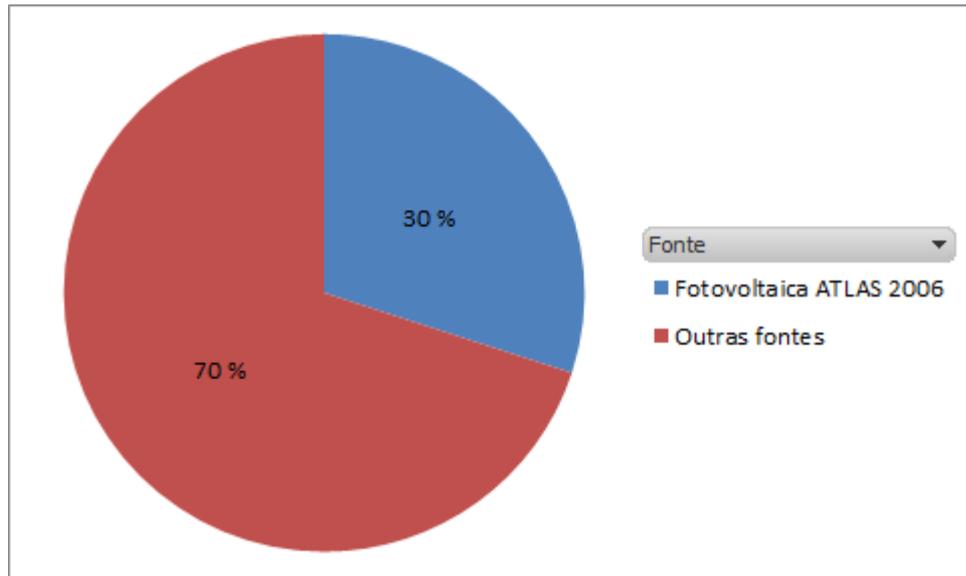


Gráfico 10 – Percentual de Capacidade de Atendimento ao consumo atual de Curitiba por fonte fotovoltaica com os dados do ATLAS 2006.

Fonte: Os Autores

Considerando os dados do INMET, seria possível atender 26,08% da demanda de Curitiba em 2013, e analisando os dados do ATLAS 2006, esse valor sobe para 30%. Logo, a geração de EE produzida por módulos fotovoltaicos, instalados em condições ideais, em uma área de 8,4 km², atenderia um percentual que varia de 26,08% a 30% da demanda total de Curitiba.

4.5 ÁREA NECESSÁRIA PARA SUPRIR O CONSUMO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA DE CURITIBA POR FONTE FOTOVOLTAICA.

Segundo a Nota Técnica de Estudo de Demanda 2050, o consumo brasileiro de Energia Elétrica vai triplicar, chegando a 1.624 (TWh) em 2050, sendo que no ano de 2013 o consumo de energia elétrica no país foi de 513 TWh/ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – BRASIL, 2014). Neste tópico foi estimada a área necessária para suprir o consumo total de EE na cidade de Curitiba, por fonte fotovoltaica para o ano de 2013 e o ano de 2050. Esta análise foi feita em função dos dados do ATLAS.

4.5.1 Área necessária para suprir a demanda de 2013

Assumindo as premissas já estabelecidas no item 4.4.1, onde foi considerada uma área de 8,4 km² com módulos fotovoltaicos de silício Policristalino, tem-se um potencial de geração de EE suficiente para suprir 30% do consumo de EE de Curitiba. Para suprir 100% do consumo de Curitiba por fonte fotovoltaica, seria então necessária uma área de 28 km² para instalação de um sistema fotovoltaico nas condições ideais de geração, e uma potência de 3,5 GWp para gerar 4,83 TWh/ano.

4.5.2 Área necessária para suprir a demanda de 2050

Para 2050 foi assumido as mesmas premissas, porém o valor da demanda de EE do Brasil, segundo o Ministério de Minas de Energia (2014), triplicará. Assumindo como premissa que o consumo de Curitiba aumentará na mesma proporção, o valor estimado de consumo de EE em 2050 será de 14,49 TWh/ano. Assim, seria necessária uma área de 84 km² disponível para instalação de um sistema fotovoltaico, que equivale a 19,3% de toda a cidade de Curitiba, e que supriria todo o consumo de EE no ano de 2050, ou seja, seriam necessários aproximadamente 10 GWp.

5. CONCLUSÃO

A partir da metodologia proposta, foi possível atingir o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

A pesquisa feita como referencial teórico deu base para todos os outros objetivos a serem alcançados. Deixou claro que a questão de busca por fontes alternativas e renováveis de produção de energia elétrica, que não ocasionam graves problemas ambientais, há muito deixou de ser uma utopia. Já é uma realidade concreta e confiável, visível em muitos países considerados desenvolvidos.

Em meio a crises ambientais e em busca da diminuição do impacto ao meio ambiente, como redução da emissão global de gases do efeito estufa, juntamente com a racionalização de recursos e crescente aumento do custo de energias estabelecidas como uso de petróleo, a necessidade do estudo e da implementação de fontes alternativas de energia se torna cada vez mais requisitada.

Para expandir o uso da energia solar fotovoltaica na matriz energética do Brasil, devem ser adotadas medidas que se enquadrem nas características do sistema elétrico do país, baseando-se inclusive, nos modelos de sucesso adotados em outros países. Hoje em dia, é possível encontrar telhados com módulos fotovoltaicos em várias edificações de diversos tipos em centros urbanos dos principais países da Europa, notadamente Alemanha e Espanha, gerando energia limpa.

No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda não conseguiu superar a barreira econômica, pois a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos continua tendo um custo elevado em comparação à geração hidrelétrica, principal fonte energética na matriz de geração do país. Iniciativas importantes estão sendo tomadas para regulamentar e disseminar o uso da energia solar fotovoltaica no Brasil. Um importante passo na caminhada para a disseminação do uso de sistema fotovoltaicos conectados à rede foi a resolução da ANEEL no 482, publicada em Abril de 2012, que regulamenta a conexão de sistemas de micro e mini geração de energia à rede elétrica.

Ao obter os dados de irradiação do INMET e do ATLAS, foi possível comparar esses dados e apontar as diferenças entre eles. Para essa análise, ambos foram convertidos para o plano do Escritório Verde e assim realizadas comparações mês a

mês, ano a ano e por fim foram comparadas as médias anuais com os dados de irradiação do EV.

Através da comparação mês a mês, foi possível analisar as médias mensais do INMET com os dados do ATLAS, e encontrou-se uma variação considerável chegando a 52,48% de diferença no mês de Junho de 2012. O mesmo mês em 2013 apresentou também a maior diferença entre as bases, chegando a uma diferença de 35,20%. Já em 2014, a maior diferença ficou para o mês de Março, com 34,63%. Analisando as diferenças das médias anuais, em 2014 a média anual foi a que se manteve mais próxima da média anual do ATLAS 2006, com uma diferença de 6,55%, menos da metade da diferença de 2012, ano com os menores valores de irradiação dos três anos analisados.

Quando comparada a média dos 3 anos do INMET com o ATLAS 2006, percebeu-se que o mês de Junho manteve-se como a maior diferença entre as bases, enquanto o mês de Janeiro quase não apresentou diferença, o que indica um verão com irradiações mais constantes ao longo dos anos, e um inverno com mais oscilações nos valores de irradiação. Em relação a comparação com os valores de irradiação obtidos pelo EV, percebe-se que, de maneira geral, os dados medidos no EV se aproximam mais dos dados do INMET, e esta semelhança pode ser traduzida pelo fato desses dois dados serem valores atuais medidos.

Ao analisar a média diária anual das duas bases, nota-se que quanto maior for à amostragem de dados do INMET, existe uma tendência de se aproximar percentualmente com os dados do ATLAS 2006.

Ao calcular a geração estimada de EE por sistema fotovoltaico de Curitiba, com ambas as fontes de dados, foi possível perceber que, mantendo a mesma taxa de desempenho (0,75) e considerando um sistema fotovoltaico de potência igual a 1,05 GWp, os valores de geração alcançados supririam uma faixa de 26% a 30% do consumo total de Curitiba, o que significa que teríamos uma fonte de energia de energia mais limpa contribuindo para o consumo de energia elétrica dos curitibanos, possibilitando a diminuição do uso de outras fontes de energia poluentes.

A título de informação, foi estimada a área em condições ideais para instalação de módulos fotovoltaicos e qual seria a potência necessária para suprir 100% da energia elétrica da cidade de Curitiba, tanto para o ano de 2013, como uma perspectiva para 2050. Para 2013, com uma área de 28 km², seria possível estimar

uma potência de 3,5 GWp, e em 2050 com uma área de 84 km², seria possível estimar uma potência de 10,5 GWp.

Como conclusão final, essa pesquisa apresentou o potencial de expandir a fonte solar na matriz elétrica na cidade de Curitiba, mostrando que a instalação de sistemas fotovoltaicos em edificações podem contribuir para a geração de energia elétrica em Curitiba, de maneira renovável e limpa, revelando ao município a necessidade de investir em projetos de pesquisa e desenvolvimento desta fonte renovável de energia.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marcelo P. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Dissertação de Mestrado em Energia, Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, SP. 2012.

AMÉRICA DO SOL. Energia fotovoltaica. América do Sol, 2011. Disponível em: <<http://www.americadosol.org>>. Acesso em: 16 de Julho de 2014.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=63>. Acesso em: Dezembro de 2013

_____. <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em Dezembro de 2014

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11704: Sistemas Fotovoltaicos - Classificação**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008.

CÂMARA, Carlos F. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Monografia de Especialização em Fontes Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras, MG. 2011.

CASTRO, Rui M. G.; Introdução à Energia Fotovoltaica. Universidade de Lisboa, 2008.

CHRISTOFOLI, Bruno de Andrade. **Superação das barreiras ambientais à expansão das energias alternativas limpas**. São Paulo: Jornal da energia, 2011. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/artigo_ler.php?id_artigo=47>. Acesso em: Dezembro de 2013.

Companhia Paranaense de Energia – **COPEL Geração**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F86108AB3CF1D4E5F032574120060B8F0>>. Acesso em: 16 de Julho de 2014.

Companhia Paranaense de Energia – A Copel. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/acopel/>>. Acesso em 02 de Dezembro de 2014.

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: 05 de julho de 2014.

DEMONTI, R. **Processamento da Energia Elétrica Proveniente de Módulos Fotovoltaicos**. Tese na área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico, Universidade Federal de Santa Catarina. SC. 2003.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA -. **Análise de Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Ministério de Minas e Energia - MME. Brasília - DF. 2012.

____ **Demanda de Energia 2050**. Nota Técnica. Rio de Janeiro, 2014

EPIA - EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION - **EPIA. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018**. Disponível em: <http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_-_Medium_Res.pdf>. Acesso em: Julho de 2014.

ESCRITÓRIO VERDE. Disponível em: <<http://www.escriptorioverdeonline.com.br>> Acesso em: 02 de Dezembro de 2014.

FIEP -FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/observatorios/energia/FreeComponent21893content229090.shtml>>. Acesso em: Dezembro de 2013.

FUSANO, R. H. **Análise dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR** Curitiba: UTFPR - DIBIB, 2013.

Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR Disponível em:<<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=890>>. Acessado em Julho de 2014.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acessado Julho de 2014.

Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social - IPARDES

Disponível em:

<<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=80000&btOk=ok>>. Acessado Dezembro de 2014.

KAMBOR, S. **Pseudo square monocrystalline solar cell**. Wikimedia Commons, 2007. Disponível em:

<www.commons.wikimedia.org/wiki/File:125x125-pseudosquare-monocrystalline-solar.cell.jpg>. Acesso em: 12 de Outubro de 2014.

MARTINS Fernando R.; PEREIRA Enio B.; GUARNIERI Ricardo A.; YAMASHITA Cristina S.; SILVA Sheila A. B.; CHAGAS Rafael C.; CORRÁ Hugo J.; SOUZA Helton P.; ABREU Samuel L., **MAPEAMENTO DOS RECURSOS DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL**. Disponível em: < <http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-1580/2006/11.16.15.57/doc/Martins.Mapeamento.pdf> > Acessado em: Julho de 2014.

MARTINS Fernando R.; PEREIRA Enio B.; ECHER Mariza Pereira de Souza, **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário - o Projeto Swera** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172004000200010> Acessado em: Julho de 2014.

MATTOS, J. M. D. B. **Desenvolvimento de uma Estrutura de Estágio Único de Baixo Custo e Alto Rendimento para Injetar Potência de um Módulo Fotovoltaico na Rede de Baixa Tensão**.

Curitiba: UTFPR - DIBIB, 2009.

Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/see/galerias/arquivos/Publicacoes/Boletim_mensalDMSE/Boletim_de_Monitoramento_do_Sistema_Eltrico_-_Maio-2014.pdf>.

Acesso em: 16 de Julho de 2014.

NEWMAC. Disponível em:

<http://www.newmac.com.br/fatores_para_conversao_de_unidades.pdf>.

Acesso em: Agosto de 2013.

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

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014**. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em: 16 de Julho de 2014.

Portal da Prefeitura de Curitiba. Disponível em
<<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174>>.

Acesso em 02 de Dezembro de 2014.

ROCHA, A. V. **Energia Solar Fotovoltaica Unidade III – Módulos Fotovoltaicos**. Disponível em:

< http://docente.ifrn.edu.br/alexandrorocha/energias-renovaveis/energia-solar-fotovoltaica/energia-solar-unidade-3_1-modulos-fotovoltaicos> Acesso em: 15 de Janeiro de 2015

ROSSI, Francine A.; KRÜGER, Eduardo L. **Análise da Influência da Ocupação Urbana Na Variação de Temperatura em Localidades de Curitiba**. In: VI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica - Diversidades Climatológicas, 2004, Aracaju. Diversidade Climáticas, 2004.

RPC – Rede Paranaense de Comunicação – **Reportagem Curitiba tem temperatura mais alta de janeiro desde 2007 diz SIMEPAR**. Disponível em
<<http://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2014/01/curitiba-tem-temperatura-mais-alta-de-janeiro-desde-2007-diz-simepar.htm>> Acesso em: 20 de novembro de 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

RÜTHER, Ricardo; MONTENEGRO, Alexandre; ZOMER, Clarissa D.; RANCO, Danilo A.; SANTOS, Isis P.; URBANETZ JUNIOR, Jair; NASCIMENTO, Lucas R. do; PEREIRA JUNIOR, Luiz C.; PFISCHER, Paulo H.; BRAUN, Priscila; VIANA, Trajano de S.; GIRARDI, Fernando C. **Desempenho Energético de Três Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados a Edificações Urbanas e Conectados à Rede Elétrica**. 2007.

Sistema Meteorológico do Paraná – **SIMEPAR**. Disponível em:
<<http://www.simepar.br/>>. Acesso em Julho de 2014.

Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais - **SONDA**. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/Atlas_solar.html>. Acesso em Agosto de 2014.

TIEPOLO, Gerson M.; URBANETZ JUNIOR, Jair; CANCEGLIERI JUNIOR, Osiris. **Inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica do Estado do Paraná: Análise do potencial produtivo**. Revista SODEBRAS, Vol 8, Nº 87. 2013

TIEPOLO, G. M.; CANCEGLIERI JR, O.; URBANETZ JR, J.; VIANA, T. PEREIRA, E. B. **Comparação entre o potencial de geração fotovoltaica no Estado do Paraná com Alemanha, Itália e Espanha**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, 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. 2014.

URBANETZ, J; CASAGRANDE, E. F. **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR**. VIII CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Curitiba, 2012.

URBANETZ JUNIOR, 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**. 2010. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, BU, Florianópolis- SC, 2010.

VALLÊRA, A. M. et al. **Meio século de história fotovoltaica**. Solar, 2006. Disponível em: <www.solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>. Acesso em: 08 de Julho de 2014.

ANEXO A – Tabela de conversão de valores de Energia



Energia e Trabalho												Observações	
↑ →	J	Kj	atm.t	cal	kcal	kgf.m	btu	lbf.ft	kw-h	cv-h	hph		
J	1	10 ³	98,7x10 ⁻⁴	238,8x10 ³	23,9x10 ³	10,2x10 ⁻²	94,8x10 ⁻³	737,5x10 ⁻³	2,78x10 ⁻⁷	3,78x10 ⁻⁷	3,7x10 ⁻⁷	Joule	Pascal
Kj	10 ³	1	98,7x10 ⁻²	238,85	23,9x10 ²	101,97	94,8x10 ⁻²	737,5	2,78x10 ⁻⁴	3,78x10 ⁻⁴	3,7x10 ⁻⁴	quilojoule	Atmosfera física ou normal
atm.t	101,325	101,3x10 ⁻¹	1	24,2	24,2x10 ³	10,33	96x10 ⁻³	74,73	28x10 ⁻⁴	38,3x10 ⁻⁴	38x10 ⁻⁴		bar
cal	4,1868	4,19x10 ⁻¹	4,13x10 ⁻²	1	10 ³	426,9x10 ⁻¹	39,7x10 ⁻⁴	3,09	1,16x10 ⁻⁴	1,6x10 ⁻⁴	1,56x10 ⁻⁴	caloria	Bária
kcal	4,1868x10 ³	4,1868	41,32	10 ³	1	426,9	3,97	3,09x10 ³	1,16x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,56x10 ⁻³	quilocaloria	
kgf.m	9,80665	9,8x10 ⁻¹	96,8x10 ⁻⁴	2,34	2,3x10 ³	1	93x10 ⁻⁴	7,2	2,7x10 ⁻⁴	3,7x10 ⁻⁴	3,65x10 ⁻⁴		Atmosfera técnica=1 Kgf/cm ²
btu	1055	1055x10 ⁻³	10,413	252	0,252	107,59	1	778,165	2,93x10 ⁻⁴	4x10 ⁻⁴	3,9x10 ⁻⁴	Unidade Térmica Britânica	
lbf.ft	1,356	1,36x10 ⁻¹	1,3x10 ⁻²	0,324	3,2x10 ⁻¹	138,3x10 ⁻³	12,9x10 ⁻⁴	1	3,8x10 ⁻⁷	5x10 ⁻⁷	5x10 ⁻⁷		libra por polegada ao quadrado
kw-h	3,6x10 ⁶	3,6x10 ³	35529	859845	859,85	367098	3412	2,655x10 ⁶	1	1,36	1,34		Torriceili = mm Hg
cv-h	2,648x10 ⁶	2,648x10 ³	26132	632415	632,4	2,7x10 ³	2510	1,953x10 ⁶	0,7355	1	0,9868		polegada de mercúrio
hph	2,683x10 ⁶	2,683x10 ³	26480	640847	640,85	2,736x10 ³	2543	1,979x10 ⁶	0,7453	1,013	1		centímetro de mercúrio