

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

FELIPE OSPEDAL BATISTA
PEDRO DE OLIVEIRA MELO
GUILHERME ERDMANN ORTIZ

**COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL FOTOVOLTAICO DA
CIDADE DE MUNIQUE E CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

FELIPE OSPEDAL BATISTA
PEDRO DE OLIVEIRA MELO
GUILHERME ERDMANN ORTIZ

**COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL FOTOVOLTAICO DA
CIDADE DE MUNIQUE E CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso 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.

Orientadora: MSc. Annemarlen Gehrke Castagna.

CURITIBA

2014

FELIPE OSPEDAL BATISTA
PEDRO DE OLIVEIRA MELO
GUILHERME ERDMANN ORTIZ

COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL FOTOVOLTAICO DA CIDADE DE MUNIQUE E 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 ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 25 de Fevereiro de 2014.

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

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

ORIENTAÇÃO

Profª Annemarle Gehrke Castagna, MSc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Profª Annemarle Gehrke Castagna, MSc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

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

AGRADECIMENTO

Gostaríamos de agradecer a família, sem os quais, não teríamos força e motivação para superar nossos problemas e alcançar nossas conquistas.

Aos amigos que nos momentos certos nos apoiaram a continuar de cabeça erguida, mesmo depois de derrotas, nos fazendo perceber que derrotas são aprendizados.

A todos os funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná que, direta ou indiretamente, contribuíram formar a base do conhecimento adquirido no curso.

A professora Mestra Annemarlen que nos apoiou nos momentos de dificuldades e conduziu nosso caminho de forma ética e eficiente.

RESUMO

BATISTA, Felipe Ospedal. MELO, Pedro de Oliveira. ORTIZ, Guilherme Erdmann. Comparação entre o potencial fotovoltaico de Munique e Curitiba. 2014. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica ênfase Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

A humanidade experimenta uma era de intensas mudanças, pela primeira vez o homem observa-se como uma unidade global e não local. O uso de fontes de energia renováveis e descentralizadas mostra-se como uma solução viável e real para minimizar os impactos ambientais causados pelo estilo de vida do homem moderno. A energia fotovoltaica é uma fonte renovável e descentralizada, e apresenta-se como uma das possíveis soluções para este problema. O Brasil apresenta grande potencial de geração desta fonte, porém ainda não explorado. A Alemanha, que possui uma irradiação solar média inferior à do Brasil, é a líder mundial no uso desta fonte energética. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre um município alemão que tenha um perfil próximo ao de Curitiba, visando estabelecer o potencial da capital paranaense. Este trabalho tem como fundamentação livros, artigos, periódicos, entre outras fontes, que ratificam a produção desta pesquisa. Com o estudo foi possível afirmar que, para uma instalação fotovoltaica com especificações técnicas e características construtivas idênticas em Munique e em Curitiba, os fatores ambientais favorecem a região brasileira, apresentando a mesma um potencial de geração maior do que o gerado na cidade alemã. Partindo para uma análise global, foi verificado que apresentando Curitiba a mesma potência de pico instalada que Munique, a primeira torna-se mais atrativa, podendo gerar mais eletricidade o longo do ano. Inserindo-se esta eletricidade gerada em uma demanda projetada para Curitiba em 2030, pode-se ter a geração fotovoltaica como fonte integrante do portfólio de energético da capital paranaense. Dessa maneira, o estudo comparativo mostrou-se importante para a decisão de investimentos no setor de geração fotovoltaica em Curitiba.

Palavras-chave: Potencial fotovoltaico, SFVCR, Geração Distribuída, Fontes Alternativas.

ABSTRACT

BATISTA, Felipe Ospedal. MELO, Pedro de Oliveira. ORTIZ, Guilherme Erdmann. Comparison between the photovoltaic potential of Munich and Curitiba. 2014. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica ênfase Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The Humankind is experiencing an age of intense changes, and for the first time the man is seeing itself as a global unit instead of a local unit. The use of renewable and non-centralized energy resources appears as a feasible solution to minimize the impacts from the modern man lifestyle on the environment. The photovoltaic energy is a renewable and non-centralized energy source, and presents itself as a solution for this problem. Brazil has a huge power generating potential coming from this source, but not explored. Otherwise Germany, who pursuit an average solar irradiation lower than Brazil, is the worldwide leader on electricity generation from this source. This work aims to realize a comparative study between a city in Germany and the Brazilian city of Curitiba, to establish the power generation potential from the Parana's state capital. This work was theoretically based on books, papers, articles, between other sources, to ratify this research production. With the study, it was possible to confirm that, for a photovoltaic installation with identical technical specifications and constructive characteristics in Munich and in Curitiba, the environmental factors counts for the Curitiba's side, showing this a generation potential higher than the one verified in Munich. In a global analysis, it was possible to demonstrate that, for the same installed power capacity in Curitiba and in Munich; the first one can be more attractive and generate more electricity. This way, it is possible also to add the photovoltaic source on the Curitiba's energy portfolio. Taking this in account, this work is important to when a decision is needed regarding investments on the photovoltaic sector in Curitiba.

Keywords: Photovoltaic potential, SFVCR, Distributed Generation, Alternative Sources

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes Renováveis x Fontes Não Renováveis.....	2
Figura 2 - Energia primária 2011 vs. 2012.....	12
Figura 3 - Símbolo de módulo fotovoltaico.....	20
Figura 4 - Movimentos da Terra.....	22
Figura 5 – Incidência da radiação solar em uma superfície.....	23
Figura 6 – Experimento	25
Figura 7 - Cristal de Silício.....	26
Figura 8 - Dopagem Tipo N e Tipo P.....	27
Figura 9 - Configuração Básica de Sistema Fotovoltaico	27
Figura 10 - Efeito Fotovoltaico.....	29
Figura 11 - Célula, módulo e painel fotovoltaico	30
Figura 12 – Sistema fotovoltaico da USFC, instalado 2,02 kWp.....	30
Figura 13 - Módulo solar m-Si.....	32
Figura 14 - Módulo solar p-Si.....	33
Figura 15 - Filmes finos de a-Si.....	34
Figura 16 - Arranjo de telureto de cádmio.....	35
Figura 17 - Módulos fotovoltaicos de CdTe em aplicações arquitetônicas.....	35
Figura 18 - Módulos fotovoltaicos de CIGS em aplicações arquitetônicas.....	36
Figura 19 - Módulo CIGS.....	36
Figura 20 - Tipos de Sistema Fotovoltaico.....	43
Figura 21 - Medição Única do Balanço de Energia.....	44
Figura 22 - Medição Dupla.....	45
Figura 23 - Medição Simultânea	46
Figura 24 - Sistemas de Grande Porte	46
Figura 25: Fluxograma do modelo BRASIL-SR	49
Figura 26: Radiação solar global horizontal média anual.	52
Figura 27 - Radiação Solar por Região no Brasil.....	53
Figura 28: Mapa de radiação sazonal no território brasileiro.	54

Figura 29 - Cenários de crescimento econômico mundial vs. Brasil....	63
Figura 30 - Detalhes do crescimento econômico dos cenários propostos	63
Figura 31 - Irradiação anual média no estado da Bavária	67
Figura 32 - Usina fotovoltaica de Straßkirche	69
Figura 33 - Maior usina fotovoltaica de Munique	71
Figura 34 - Maior usina fotovoltaica instalado em edificação de Munique	72
Figura 35 - Cadeia para produção de PV no Brasil	75
Figura 36 – Número de horas médias de insolação para os meses escolhidos.	84
Figura 37 – horas medias de irradiacao nos meses analisados	84
Figura 38 - Incidência da radiação solar média para cada estação do ano	86
Figura 39 - Irradiação medias nos meses analisados para Munique...	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de energia primária, em 10 ³ TEP	11
Tabela 2 – Empreendimentos cadastrados no P&D Estratégico núm. 13;2011	17
Tabela 3 - Eficiência das principais tecnologias utilizadas em módulos fotovoltaicos	31
Tabela 4 - Desvios observados para as estimativas de irradiação solar	50
Tabela 5 - Projeção da População de Curitiba para 2030	60
Tabela 6 - Crescimento do PIB – Curitiba.....	64
Tabela 7 - Projeção da Demanda Energética de Curitiba para 2030...	65
Tabela 8 - Resumo das Projeções para Curitiba em 2030	65
Tabela 9 - Resumo das instalações de equipamentos fotovoltaicos no estado da Bavária.	68
Tabela 10 - Panorama geral da energia fotovoltaica em Munique.....	71
Tabela 11 – Escolha dos meses representativos para cada estação do ano	82
Tabela 12 - Temperatura média nos meses escolhidos	82
Tabela 13 - Diferença de temperatura média para cada estação do ano	83
Tabela 14 – Quantidade de horas médias de insolação para cada mês escolhido	85
Tabela 15 – Irradiação média de acordo com as estações do ano.....	87
Tabela 16 – Temperatura média da célula fotovoltaica em cada estação do ano	87
Tabela 17 - Perda no rendimento da célula em cada estação do ano.	88
Tabela 18 - Cálculo diferença de energia gerada entre Munique 2012 e Curitiba 2030 por estação.	90
Tabela 19 - Diferença Global na Energia Gerada - Curitiba 2030 x Munique 2012.....	90
Tabela 20 - Comparação Curitiba 2030 - Munique 2012 - Visão Geral	91

Tabela 21 - Participação da geração FV na matriz energética de Curitiba 2030	91
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos das Políticas Adotadas nos Países com Maior capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica.....	57
Quadro 2 - Caracterização dos Cenários Mundiais	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte em 2011	12
Gráfico 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte em 2012.....	13
Gráfico 3 - Efeito da temperatura da célula na curva característica V_{xl}	38
Gráfico 4 - Variação da potência e da temperatura ao longo do tempo	39
Gráfico 5 - Evolução da temperatura	40
Gráfico 6 - Característica V-I para diferentes radiações a temperatura constante de 25°C.....	41
Gráfico 7 - SFI vs. SFCR.....	47
Gráfico 8 - Gráficos de dispersão BRASIL-SR vs. valores medidos em superfície.....	51
Gráfico 9 – Evolução da capacidade FV instalada no mundo 2000 – 2012 (MW).....	56
Gráfico 10 - Caso real de perda de rendimento em função da temperatura da célula.....	78
Gráfico 11 - Curvas I_xV para variados valores de irradiação solar.	79

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

a-Si – silício amorfo;

BEN – Balanço Energético Nacional

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

CA – corrente alternada;

CC – corrente contínua;

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;

CdTe – telureto de cádmio;

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CF – fator de capacidade;

CIGS: Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio.

CIS: Disseleneto de Cobre e Índio.

COPEL: Companhia Paranaense de Energia.

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

c-Si – silício cristalino;

DGS - Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética;

EEG – Erneuerbare Energien Gesetz

EPIA – European Photovoltaic Industry Association;

EV – Escritório Verde;

FAE: Fontes Alternativas de Energia

FDI – Fator de dimensionamento de Inversores;

FIEP - Federação das Indústrias do Estado do Paraná

FRE – Fonte Renovável de Energia

FV – fotovoltaico;

GD – geração distribuída;

Gcs – constante solar;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – International Energy Agency;

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

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;

IUCN - International Union for Conservation of Nature

LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar;

MME: Ministério de Minas e Energia.

m-Si: Silício Monocristalino.

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

PIB – Produto Interno Bruto

PNE – Plano Nacional da Energia

p-Si – silício policristalino;

PR – Performance Ratio;

PV - Photovoltaic

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

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SFVCR – sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica;

SFI – sistema fotovoltaico isolado;

SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment;

Tep – Tonelada Equivalente de Petróleo

TUC – Temperatura de Utilização da Célula

TUST – Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão

TUSD – Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;

UFV: Usina Fotovoltaica.

UNEP - United Nations Environment Programme

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

WWF - World Wildlife Fund

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. TEMA 1	
1.1.1. Delimitação do Tema.....	3
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo Geral.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. JUSTIFICATIVA.....	6
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	6
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	10
2.1. CENÁRIO ENERGÉTICO – BRASIL, PARANÁ E CURITIBA.....	10
2.1.1. Incentivos à geração fotovoltaica no Brasil.....	15
2.1.2. Barreiras à expansão fotovoltaica no Brasil.....	18
2.2. Terminologia.....	19
2.3. Radiação Solar.....	21
2.3.1. Captação e Conversão.....	21
2.4. EFEITO FOTOVOLTAICO.....	24
2.4.1. Semicondutor.....	25
2.5. COMPONENTES BÁSICOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	27
2.5.1. Célula, módulo e painel solar fotovoltaico.....	28
2.5.2. Baterias e Subsistema de Condicionamento de Potência	Erro! Indicador não definido.
2.6. RELAÇÃO DE DESEMPENHO.....	36
2.6.1. Fatores de influência no <i>Performance Ratio</i>	37

2.7. Topologias do Sistema Fotovoltaico	42
2.7.1. Sistemas Fotovoltaicos Isolados.....	43
2.7.2. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede	44
2.8. ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR	48
2.9. LEGISLAÇÃO ALEMÃ	54
3. A CIDADE DE CURITIBA	58
3.1. Análise da conjuntura energética da grande Curitiba 2013.....	58
3.2. Projeção da demanda da grande Curitiba para 2030	59
3.2.1. Crescimento Demográfico	60
3.2.2. Cenários Simulados.....	60
3.2.3. Consumo Energético	64
3.2.4. Resumo das Projeções de Curitiba para 2030	65
4. CIDADE REFERÊNCIA PARA COMPARAÇÃO	66
4.1. O estado da Bavaria e a cidade de munique	66
4.1.5. Energia fotovoltaica na Bavária	67
4.2. A cidade de Munique	69
4.2.1. Energia Fotovoltaica em Munique	70
4.3. justificativa da escolha de munique para comparação.....	72
5. COMPARAÇÃO ENTRE MUNIQUE E CURITIBA	74
5.1. ESTADO DA ARTE ALEMANHÃ VS. BRASIL.....	74
5.2. PREMISSAS DE COMPARAÇÃO	76
5.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE	77
5.3.2. Metodologia para cálculo da diferença da energia gerada em Curitiba e Munique.....	79
5.4. DADOS DE ENTRADA	81
5.4.1. Temperatura Média.....	82
5.4.2. Horas de Insolação	83

5.4.3. Radiação Solar	85
5.5. INFLUENCIA DA TEMPERATURA NA CÉLULA FOTOVOLTAICA	87
5.6. INFLUENCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	88
5.7. INFLUENCIA DA ENERGIA GERADA NA MATRIZ ENERGÉTICA DE CURITIBA 2030	89
6. RESULTADOS.....	92
7. CONCLUSÃO	94

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

O livro “*The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome*” afirmou em 1972 que se as tendências de crescimento de população mundial, industrialização, poluição, produção de alimentos e esgotamento de recursos não mudassem, os limites de crescimento no planeta terra seriam atingidos nos próximos 100 anos (MEADOWS et al., 1972). Isso evidenciou que uma nova maneira de se desenvolver economicamente e socialmente seria necessária a humanidade.

Essa constatação trouxe à tona o conceito de Desenvolvimento Sustentável. Este, segundo o *World Conservation Strategy*, leva em consideração as dimensões social, ecológica, humana e recursos vivos e não vivos no processo de evolução econômica, defende também a preservação ambiental dentro do processo de desenvolvimento (IUCN-UNEP-WWF, 1980).

Para o desenvolvimento sustentável, no que tange a geração de energia, é indispensável a utilização de fontes renováveis e limpas. A Agência Internacional de Energia acredita que deve haver uma revolução mundial no setor de energias limpas para desassociar crescimento econômico com emissões de dióxido de carbono (IEA, 2013). Portanto, ao considerar-se a tecnologia como alargador dos limites do crescimento, “energia renovável” e “novas forças energéticas” estarão entre as principais *energy drivers* deste século (SENAI – FIEP, 2007).

No Brasil, visando atender as exigências de um desenvolvimento mais sustentável, nota-se um aumento na participação de renováveis na matriz elétrica brasileira e um aumento da eficiência energética da economia em 2011 em relação ao ano anterior (EPE, 2012a).

Infelizmente no Balanço Energético Nacional do ano de 2013, com respeito a 2012, a afirmação anterior não pode ser citada novamente. O consumo de energia de fontes não-renováveis aumentou, contundo o

percentual de energia renovável em nossa matriz energética continua muito acima da média mundial, como pode ser observado na Figura 1.

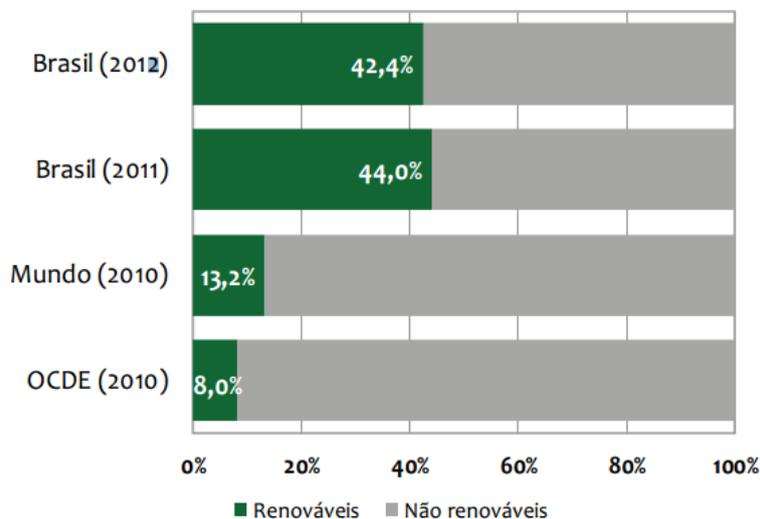


Figura 1 - Fontes Renováveis x Fontes Não Renováveis
Fonte: EPE (2013a).

A vantagem brasileira está, principalmente, no vasto potencial hidrográfico que o país possui. Barragens com grandes volumes de água produzem a maior parte da eletricidade fornecida.

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração hidráulica responde por 70,10% da oferta interna. Somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que 85% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis. (EPE, 2013b, pg.16)

Porém, o potencial hidrográfico não aproveitado torna-se cada vez mais escasso. Mesmo empreendimentos com grande potencial encontram barreiras intransponíveis para tornarem-se realidade. Pode-se afirmar, com certa segurança, que grandes barragens, como a encontrada em ITAIPU, jamais serão construídas novamente no Brasil.

Há, em uma ponta, a diminuição da expansão da geração hidrelétrica (EPE, 2012a). No ano de 2012, comparativo a 2011, houve uma queda na

representatividade da energia hidroelétrica na matriz energética nacional, em virtude do comportamento climático deste ano. Em 2011 as usinas hidroelétricas representaram 81,9% da geração de energia elétrica, já em 2012 este valor caiu para 76,9%. (EPE,2013b) (EPE,2012a)

Na outra ponta está o aumento da demanda nacional de energia elétrica. O Plano Nacional de Energia – PNE 2030, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética, em junho de 2007, aponta um crescimento médio de aproximadamente 4% ao ano no consumo total de energia elétrica no Brasil. Ou seja, demandar-se-á, em 2030, aproximadamente 1.200 TWh. Destes, 817 TWh serão gerados em hidrelétricas. Isso abre espaço para novas formas de geração de eletricidade por fontes ditas limpas (EPE, 2007).

Aliado a isto, sabe-se que a Terra recebe continuamente mais de 174 PW de energia solar (SENAI – FIEP, 2007), e o sistema fotovoltaico é uma forma renovável, limpa e silenciosa de produção de energia elétrica, além de poder ser muito bem aproveitada no Brasil, devido a sua grande extensão territorial (URBANETZ, 2010). Desta maneira, o Brasil aparece como boa opção para utilização de painéis fotovoltaicos que convertam radiação solar em eletricidade.

1.1.1. Delimitação do Tema

A cidade de Curitiba, por sua vez, tem como um dos seus objetivos ser reconhecida como uma cidade sustentável, que respeita a biodiversidade e integra a população com o ambiente com base nos princípios de cidadania (SENAI, 2010).

É amplamente divulgado que a Alemanha, que possui uma irradiação solar média inferior à do Brasil, é a líder mundial no uso desta fonte energética. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre uma cidade alemã que tenha um perfil próximo ao município de Curitiba, visando estabelecer o potencial da capital paranaense.

Entende-se e acredita-se que um estudo que demonstre as vantagens que Curitiba possui sobre uma cidade alemã onde a geração de energia fotovoltaica é amplamente difundida, pode contribuir com os objetivos traçados para o futuro de Curitiba.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Analisando-se a matriz energética brasileira e o planejamento energético nacional, percebe-se uma grande preocupação das autoridades competentes e da sociedade quanto às fontes de energia elétrica, principalmente no que tange a sustentabilidade.

Torna-se inevitável a busca por alternativas utilizadas no mundo para suprir a crescente demanda de energia de forma sustentável. Com base neste cenário, e tendo a utilização da energia fotovoltaica como premissa, seguem-se as seguintes perguntas:

- Quais são as chances de expansão da energia solar fotovoltaica em Curitiba?
- Quais as vantagens e desvantagens que Curitiba possui, se comparada com uma cidade onde existe uma expressiva geração fotovoltaica?
- Comparativamente, quanto Curitiba pode gerar com o mesmo potencial instalado de uma cidade onde exista uma expressiva geração fotovoltaica?
- Quais os benefícios que o usuário pode ganhar ao ter esta fonte de energia sendo gerada em sua residência?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal estabelecer um processo de comparação entre Curitiba e um município alemão de características semelhantes, quanto ao potencial de fornecimento de energia elétrica gerada em SFVCR, ou sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

1.3.2. Objetivos Específicos

Este trabalho de conclusão de curso possui como objetivos específicos o estudo e o desenvolvimento dos seguintes temas:

- Realizar revisão bibliográfica sobre energia fotovoltaica;
- Conhecer e analisar a demanda de energia elétrica atual do município de Curitiba;
- Conhecer e analisar a demanda futura, até 2030, de energia elétrica em Curitiba;
- Buscar uma cidade alemã, que já possua um padrão de geração distribuída estável e com geração fotovoltaica expandida, com características próximas aos padrões de Curitiba, a fim de realizar comparações e prévias de resultados;
- Realizar comparações entre Curitiba e o município escolhido, levando em consideração os fatores ambientais e as diferenças que os mesmos possuem entre as características analisadas;
- Elaborar as conclusões acerca do estudo realizado, avaliando os resultados obtidos, vantagens e desvantagens do cenário proposto;

1.4. JUSTIFICATIVA

Ainda não houve estudos fazendo a comparação do potencial de geração fotovoltaica, através de SFVCR, em Curitiba. Pretende-se demonstrar quantitativa a capacidade da geração de eletricidade a partir de painéis fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, contribuindo com a ideia de geração distribuída.

Segundo Malfra (2002) citada por Lora e Haddad (2006, pg.4) para o CIGRE, geração distribuída é a geração que não é planejada de modo centralizado, nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizadas.

A geração distribuída vem amenizar o uso dos grandes pontos geradores situados a grandes distâncias dos centros de consumo, evitando, desta forma, perdas no transporte de energia e, por consequência, aumentando a eficiência do sistema elétrico. Neste contexto a energia fotovoltaica apresenta-se como uma possível integrante desta solução, como uma forma limpa e silenciosa de energia, não agredindo o ambiente onde é inserida.

Caso fique evidente um potencial expressivo de geração fotovoltaica na região, o presente estudo pode auxiliar o planejamento energético, políticas de incentivo ao uso desta tecnologia e por consequência investimentos no setor. Este pode ser um ponto de partida para maiores aprofundamentos e uma referência para novos estudos nesta área.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico deste trabalho é determinado em cinco etapas principais:

- **1ª etapa:** Pesquisa e fundamentação teórica dos temas abordados nesta pesquisa;
- **2ª etapa:** Análise das características geográficas e estudo da demanda de energia elétrica para Curitiba em 2013 e estabelecer uma projeção para 2030;
- **3ª etapa:** Escolher e estudar uma cidade alemã, com capacidade instalada expressiva de sistemas fotovoltaicos, que possa ser comparada com a projeção de Curitiba em 2030;
- **4ª etapa:** Projeção do potencial fotovoltaico em Curitiba, usando como base o município alemão escolhido como parâmetro de comparação, levando em consideração os conceitos empregados por estas para justificar o investimento e a implementação da geração fotovoltaica;
- **5ª etapa:** Análise dos resultados e conclusão final.

Na primeira etapa, a pesquisa abrange pontos como conceito de geração fotovoltaica e geração distribuída, bem como uma análise das leis de incentivo vigentes na Alemanha, que favorecem o uso da energia fotovoltaica. A fundamentação contém tópicos como estrutura, funcionamento e aplicabilidade de painéis fotovoltaicos, no entendimento de que este é o elemento central do estudo.

Após a fundamentação são elaborados estudos sobre as demandas energéticas no estado do Paraná, mais especificamente em Curitiba para 2030, em uma projeção. Usando como referência, mas não limitando-se a, documentos da COPEL, a operadora de energia elétrica do estado do Paraná e o documento elaborado pelo Ministério de Minas de Energia, Matriz Energética Nacional 2030.

É escolhida uma cidade de comparação, que utiliza de forma extensiva a geração no formato SFVCR e que possua características geográficas e populacional semelhantes à da projeção de Curitiba para o ano de 2030.

Na etapa seguinte são feitas previsões e simulações de geração fotovoltaica em Curitiba e região para 2030. O município alemão servirá como base para a elaboração de um estudo comparativo com Curitiba, a fim de

determinar quais as vantagens e desvantagens da geração fotovoltaica em Curitiba.

Por fim, é elaborado um resumo dos resultados obtidos com as comparações e construída uma conclusão sobre o assunto abordado.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho possui sete capítulos distribuídos da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Introdução ao tema abordado, assim como apontamento da razão da realização deste estudo. Nesta mesma etapa do processo foram definidos os objetivos do estudo e descrito quais serão os métodos necessários para a realização de cada etapa.
- **Capítulo 2 – Levantamento bibliográfico:** Este capítulo apresenta um levantamento de todas as referências bibliográficas básica para a realização do estudo.
- **Capítulo 3 – A cidade de Curitiba:** Este capítulo apresenta o levantamento de dados para a cidade de Curitiba para os dias atuais e estabelece as projeções para 2030.
- **Capítulo 4 – Cidade referencia para comparação:** Este capítulo identifica e estuda a cidade referência para comparação com Curitiba em 2030.
- **Capítulo 5 – Comparação entre Munique e Curitiba:** Definida a cidade utilizada para comparação, mostra-se as comparações entre Munique e Curitiba no que tange ao potencial de geração de energia fotovoltaica.
- **Capítulo 6 – Resultados:** Este capítulo mostra a análise dos dados obtidos.
- **Capítulo 7 – Conclusão:** Após a análise dos resultados, este capítulo apresenta uma conclusão acerca do estudo realizado.

- **Referencial Bibliográfico:** Lista das fontes de pesquisa, como: artigos, livros, estudos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, entre outros.

2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1. CENÁRIO ENERGÉTICO – BRASIL, PARANÁ E CURITIBA

Os recursos energéticos utilizados ao redor do mundo podem ser divididos em: renováveis e não renováveis.

Originalmente, as pessoas adicionaram à força de seus músculos a tração animal, o uso da água e do vento para realizar seus trabalhos. A sociedade pré-industrial contava apenas com fontes renováveis, ou seja, aquelas fontes que não podem ser esgotadas, como a hídrica, a eólica, a solar e a de biomassa. A mudança para fontes não-renováveis começou no século XVIII, quando uma sociedade em crescente processo de industrialização passou a queimar combustíveis fósseis para produzir vapor para as máquinas a vapor (inventadas em 1763) e para fundir o ferro. (HINRICHS; KLEINBACH, 2004, p. 7)

A matriz energética brasileira é diversificada e usualmente a energia final que é consumida provem de diversas fontes:

- Derivados de petróleo: para a locomoção em veículos;
- Energia hidráulica: para iluminar através de lâmpadas as cidades;
- Lenha: para o aquecimento de água em processos industriais;
- Entre outras tantas fontes de energia e de consumo.

A

Tabela 1 mostra a produção de energia primária em 2012 no Brasil, divididas em fontes renováveis e não renováveis.

Tabela 1 - Produção de energia primária, em 10³ TEP

FONTES	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Não renovável	111.421	114.761	122.002	128.098	133.201	139.207	138.989
Petróleo	89.214	90.765	94.000	100.918	106.559	108.976	107.017
Gás Natural	17.582	18.025	21.398	20.983	22.771	23.888	25.574
Carvão Vapor	2.200	2.257	2.552	1.913	2.104	2.134	2.517
Carvão Metalúrgico	87	92	101	167	0	0	0
Uranio	2.338	3.622	3.905	4.117	1.767	4.209	3.881
Renovável	100.380	108.947	114.553	112.460	119.973	117.322	118.310
Energia hidráulica	29.997	32.165	31.782	33.625	34.683	36.837	35.719
Lenha	28.496	28.618	29.227	24.609	25.997	25.997	25.735
Produtos da cana de açúcar	35.133	40.458	45.019	44.775	48.852	43.270	45.132
Outras renováveis	6.754	7.705	8.526	9.450	10.440	11.219	11.723
TOTAL	211.802	223.708	236.555	240.558	253.174	256.529	277.299

Fonte: Adaptado de EPE (2013b).

Em 2012, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequena redução devido à menor oferta de energia hidráulica e de etanol. (EPE, 2013b).

A Figura 2 ilustra um resumo das fontes de energias primárias em um comparativo de resultados, obtidos em 2011 e 2012.

em Mtep		
Fonte	2012	2011
RENOVÁVEIS	120,2	119,8
Energia hidráulica e eletricidade	39,2	39,9
Biomassa da cana	43,6	42,8
Lenha e Carvão Vegetal	25,7	26,0
Outras renováveis	11,8	11,1
NÃO RENOVÁVEIS	163,4	152,5
Petróleo	111,2	105,2
Gás natural	32,6	27,7
Carvão mineral	15,3	15,5
Urânio (U ₃ O ₈)	4,3	4,2

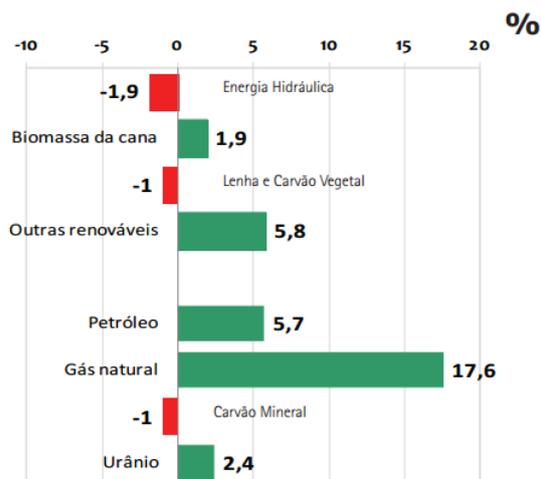


Figura 2 - Energia primária 2011 vs. 2012
Fonte: EPE (2013b).

Considerando somente a oferta e a demanda de energia elétrica, em 2011 a geração hidráulica foi o principal fornecedor de eletricidade no Brasil (EPE, 2012a). O Gráfico 1 ilustra a matriz elétrica brasileira no ano de 2011.

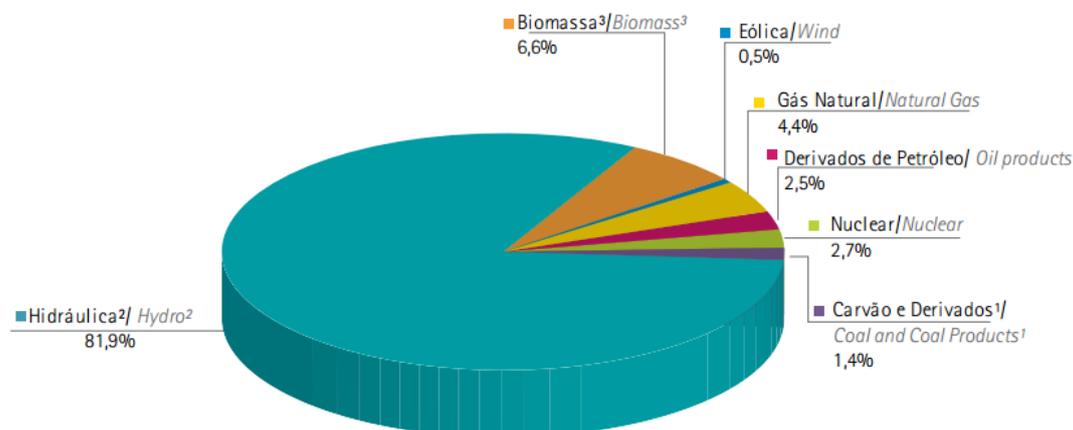


Gráfico 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte em 2011
Fonte: EPE (2012a).

No ano de 2011 a oferta interna de energia elétrica foi predominantemente de fonte hidráulica, esta foi responsável por 81,9% da matriz. Em 2012 a participação da fonte hidráulica caiu drasticamente, e foi

substituída, em parte, por fontes não renováveis, como pode-se observar no Gráfico 2.

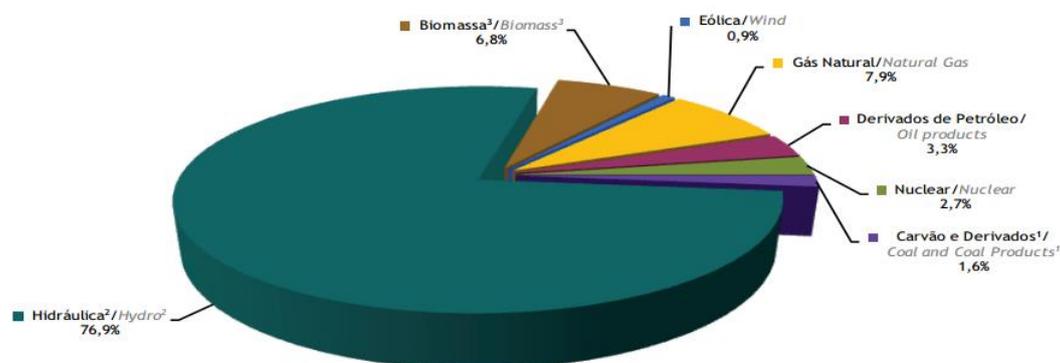


Gráfico 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte em 2012
Fonte: EPE (2013a).

A queda da geração de energia proveniente de fonte hidráulica, renovável, totalizou 5%. Em contrapartida houve um aumento de 3,5% na produção de energia gerada a partir de gás natural e de 0,8 % para derivados de petróleo, fontes não renováveis. Ou seja, a queda na disponibilidade de energias renováveis é suprida por fontes não renováveis.

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

Porém, o impacto ambiental que a construção de uma usina hidroelétrica de grande porte causa, 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, URBANETZ, CANGIOLIERI, 2013).

Segundo Salamoni (2004), mesmo em anos de desenvolvimento econômico pouco expressivo, a população brasileira continua a crescer e várias pessoas sobem de camada social, sendo inseridas na chamada economia de mercado. Isso contribui para um aumento constante no consumo de energia.

Além disso, vive-se um período de redução de possibilidades energéticas originadas do petróleo. Isso e mais a complexa e densa estrutura espacial da vida urbana, culminará na busca de novas fontes de energia que se adaptem a esse cenário. (SALAMONI, 2004)

O aparecimento de problemas como os citados nos dois parágrafos anteriores favoreceu uma necessidade de se buscar a geração de eletricidade através de fontes alternativas, muitas vezes utilizando os conceitos de geração distribuída.

A geração distribuída constitui uma mudança de conceito, segundo Lora e Haddad (2006) este tema destaca-se por diversos motivos, entre eles:

- A redução de perdas técnicas e aumento de eficiência na cadeia de geração, transmissão e distribuição;
- O aparecimento de novas tecnologias que permitem e flexibilizam a geração distribuída ou o seu uso isolado;
- A possibilidade do uso de insumos regionais para a geração de energia;
- As mudanças relativas à regulamentação viabilizando ou, em alguns casos, incentivando a geração distribuída, favorecendo em minutos casos o uso de fontes alternativas;
- O aparecimento de restrições técnicas e ambientais para a expansão de uma distribuidora;
- O aumento das exigências ambientais no controle e diminuição das emissões de poluentes;
- A necessidade da busca pela redução tarifária;
- A necessidade de aumento de eficiência em processos industriais;
- A universalização do sistema elétrico, permitindo que as comunidades isoladas possam ter acesso à energia.

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).

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)

Sendo assim ficam evidenciadas as necessidades do sistema elétrico brasileiro e mundial, e como a tecnologia fotovoltaica se encaixa na solução destes aspectos.

2.1.1. Incentivos à geração fotovoltaica no Brasil

No Brasil, vários documentos, artigos, estudos, normas, e leis de incentivo que favorecem a implantação da geração distribuída fotovoltaica nos grandes centros podem ser notados, ao realizar-se levantamento bibliográfico sobre o tema.

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, ao falar do potencial nacional de energia solar (EPE, 2012b):

A ANEEL vem efetuando ações e estudando propostas para redução das barreiras de acesso aos sistemas de distribuição por parte dos pequenos geradores (EPE, 2012b).

Propiciaram à ANEEL receber contribuições de diversos agentes, incluindo representantes das distribuidoras, geradoras, universidades, fabricantes, consumidores, comercializadores, empresas de

engenharia e demais instituições interessadas no tema. Como resultado desse processo, foi publicada a Resolução Normativa nº 482, de 17/04/2012, estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Ela visa a reduzir as barreiras regulatórias existentes para conexão de geração de pequeno porte disponível na rede de distribuição, a partir de fontes de energia incentivadas, bem como introduzir o sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*), além de estabelecer adequações necessárias nos Procedimentos de Distribuição – PRODIST (EPE, 2012b).

Outro exemplo do incentivo e da expansão da geração distribuída é a resolução normativa número 482, de 17 de abril de 2012:

Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências (ANEEL, 2012).

Nesta resolução ficou estipulado, para a fonte solar com potência injetada nos sistemas de transmissão ou distribuição menor ou igual a 30 MW, o desconto de 80% (oitenta por cento) para os empreendimentos que entrarem em operação comercial até 31/12/2017, aplicável nos 10 (dez) primeiros anos de operação da usina, nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão, TUST, e de distribuição, TUSD, sendo esse desconto reduzido para 50% (cinquenta por cento) após o décimo ano de operação da usina (ANEEL, 2012).

Outra ação recente da ANEEL foi a chamada pública nº 013/2011 referente ao Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos E Comerciais Para Inserção De Projetos De Geração Solar Fotovoltaica Na Matriz Energética Brasileira”.

O principal objetivo deste projeto é a proposição de arranjos técnicos e comerciais para projeto de geração de energia elétrica através de tecnologia fotovoltaica, de forma integrada e sustentável, buscando criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica e tecnológica para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética nacional. (ANEEL, 2011, pg. 5)

Nesta chamada foram selecionados 18 projetos de geração fotovoltaica, totalizando aproximadamente 24,6 MW, que estão previstos de

serem instalados no Brasil até 2015. Estes possibilitarão um aprofundamento no conhecimento sobre as diferentes tecnologias dessa forma de geração. Na Tabela 2 pode-se apreciar os empreendimentos e respectivas potências instaladas.

Tabela 2 – Empreendimentos cadastrados no P&D Estratégico núm. 13;2011

Empresa	Sigla	Capacidade Instalada em MWp
ElektroServiços Eletricidade S/A. e Serviços S.A.	ELEKTRO	0,500
Furnas Elétricas Centrais S/A	FURNAS	3,000
Companhia Energética do Ceara	COELCE	1,500
Companhia Eletricidade Estado da Bahia	COELBA	1,000
Companhia Hidro Elétrica de São Francisco	CHESF	3,000
Companhia Energética de São Paulo	CESP	0,723
Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista	CETEEP	0,600
Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo	ELETROPAULO	1,000
Petróleo Brasileiro S/A	PETROBRAS	1,000
Tractebel Energia S/A	TRACTEBEL	3,000
Eletrosul Centrais Elétricas S/A	ELETROSUL	1,024
CEMIG Distribuição S/A	CEMIG-D	0,500
Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica	CEEE-GT	0,550
Copel Geração e Transmissão S/A	COPEL-GT	3,000
Copel Geração e Transmissão S/A	COPEL-GT	1,000
MPXPECEM Geração de Energia S/A	MPX CPFL-	1,000
Companhia Piratininga de Força e Luz	Piratininga	1,081
Celg Distribuição S.A	CELG-D	1,000
TOTAL		24,578

Fonte: Adaptado de ANEEL (2014).

O Plano Brasil Maior, lançado pelo governo federal em agosto de 2011, ao orientar políticas de desenvolvimento que melhorem as condições competitivas do país, discorre sobre as diretrizes futuras da cadeia de suprimentos de energia, prevendo um foco no desenvolvimento de fontes renováveis, abrangendo, com isso, a eólica e a solar (EPE, 2012b).

Na iniciativa privada pode-se citar o grupo setorial fotovoltaico da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE, que contava, no início de 2012, com aproximadamente 130 empresas dos diversos segmentos da cadeia produtiva.

No estado do Paraná, é relevante citar que foi publicada em dezembro de 2010, e reeditada em dezembro de 2012, a NTC 905100, que vem a ser o manual de acesso a geração distribuída da Copel.

“O objetivo deste manual é fornecer os requisitos para acesso de geradores de energia elétrica no sistema de distribuição da COPEL para conexões em Baixa Tensão – BT (220/127V), Média Tensão - MT (13,8 e 34,5 kV) e Alta Tensão - AT (69 e 138 kV), excluindo as Demais Instalações da Transmissão – DITs pertencentes às transmissoras.” (COPEL, 2010)

Essa norma é importante para orientar e incentivar eventuais investidores que queiram inserir SFVCRs na rede de distribuição da Copel.

Como relatado anteriormente, a energia solar aparece como uma possível solução para os problemas que vem crescendo ao passar dos anos. Principalmente em relação aos recursos utilizados para a obtenção de energia elétrica. Mesmo com todo incentivo citado, esta tecnologia não vem sendo empregada em larga escala no Brasil e em Curitiba.

2.1.2. Barreiras à expansão fotovoltaica no Brasil

Em países onde a geração fotovoltaica passou a integrar uma parcela representativa na injeção de energia na rede, as distribuidoras de energia elétrica tornaram-se esquivas a esta solução.

Segundo a ABINEE os principais motivos são:

- A intermitência da geração solar fotovoltaica, com grandes variações de potência ocorrendo em curto espaço, por exemplo, na passagem de nuvens, é outro aspecto de preocupação por levam a um uso mais intensivo de

componentes, tais como transformadores, reduzindo a vida útil; (ABINNE, 2012)

- Preocupação sobre eventual redução do controle operativo sobre sua rede através da injeção “não firme” (i.e. intermitente) de energia. Em escala nacional, o mesmo tipo de preocupação é verificado pelos operadores de sistemas elétricos com respeito a fontes intermitentes de produção de energia, principalmente aquelas sujeitas a variações bruscas no curto prazo, e que por esta razão demandam maiores reservas girantes ao sistema; (ABINNE, 2012)
- Exigência de celebração de contrato de acordo operativo para se resguardar de responsabilidade para qualquer incidente (ex: choque elétrico) ocorrido na instalação de gerador distribuída, fora, portanto, de seu controle. Para celebrar este acordo a concessionária exige demonstração através de despacho da ANEEL do registro de autoprodutor do acessante. (ABINNE, 2012)

2.2. TERMINOLOGIA

Ao referir-se à energia fotovoltaica deve-se ter como base os termos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para que haja um padrão neste tipo de seguimento.

A norma que trata das terminologias aplicadas no campo de energia fotovoltaica é a NBR 10899 – 2006, nela pode-se encontrar informações sobre o significado e uso de termos relacionados ao tema. A seguir, alguns termos encontrados na norma, relevantes para o entendimento deste trabalho.

- **Ângulo de incidência (θ):** ângulo entre o raio incidente (direção do Sol) e a normal à superfície da célula ou módulo; (ABNT, 2006)
- **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 3, onde o triângulo indica o polo positivo; (ABNT, 2006)



Figura 3 - Símbolo de módulo fotovoltaico.

Fonte: ABNT (2006).

- **Arranjo ou gerador fotovoltaico:** Um ou mais painéis fotovoltaicos interligados eletricamente, de modo a prover uma única saída de corrente elétrica. (ABNT, 2006)
- **Concentrador solar:** Montagem que inclui componentes ópticos, como espelhos ou lentes, para concentrar a radiação solar sobre células solares. (ABNT, 2006)
- **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*). (ABNT, 2006)
- **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). (ABNT, 2006)

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

- **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 “G_{tot}”. (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 “W_p”. (ABNT, 2006)

- **Rastreador solar:** Mecanismo que proporciona o seguimento do movimento aparente do sol. (ABNT, 2006)
- **Sistema fotovoltaico:** Conjunto de elementos composto de arranjo(s) fotovoltaico(s), podendo incluir dispositivos para controle, condicionamento, supervisão, proteção e armazenamento de energia elétrica; fiação; fundação e estrutura de suporte. O termo em inglês BOS (*balance of system*) se refere ao sistema fotovoltaico, não incluindo os módulos fotovoltaicos. (ABNT, 2006)
- **Temperatura da célula:** a temperatura da célula fotovoltaica é obtida somando-se a temperatura ambiente (T_a) com um fator extra, que depende da luminosidade média (E_m) e da temperatura de utilização da célula (TUC), como pode ser observado na equação (2). (ABNT, 2006)

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (2)$$

2.3. RADIAÇÃO SOLAR

Pode-se afirmar de forma simplista que a radiação solar é a energia emitida pelo Sol. Segundo definição da ABNT (2006), radiação solar é a forma de transferência de energia advinda do sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons.

O planeta terra recebe anualmente $1,5 \times 10^8$ kWh de energia solar, este valor corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia elétrica neste período (CEPEL, 2004). Ou seja, 0,01% de toda energia que a terra recebe do Sol, se armazenada e utilizada de forma correta, seria capaz de alimentar todo consumo energético mundial.

2.3.1. Captação e Conversão

O planeta terra possui basicamente dois movimentos: ao redor do Sol, translação e ao redor do seu eixo, rotação. No movimento translação a terra descreve uma trajetória elíptica ao redor do Sol. No movimento de rotação a terra gira em torno do seu eixo central.

A posição angular do Sol, ao meio dia solar em relação ao plano do Equador é chamado de Declinação Solar (CEPEL, 2004). Este ângulo varia de acordo com os dias do ano dentro dos limites de $-23,45^{\circ}$ e $23,45^{\circ}$. Como pode ser observado na Figura 4.

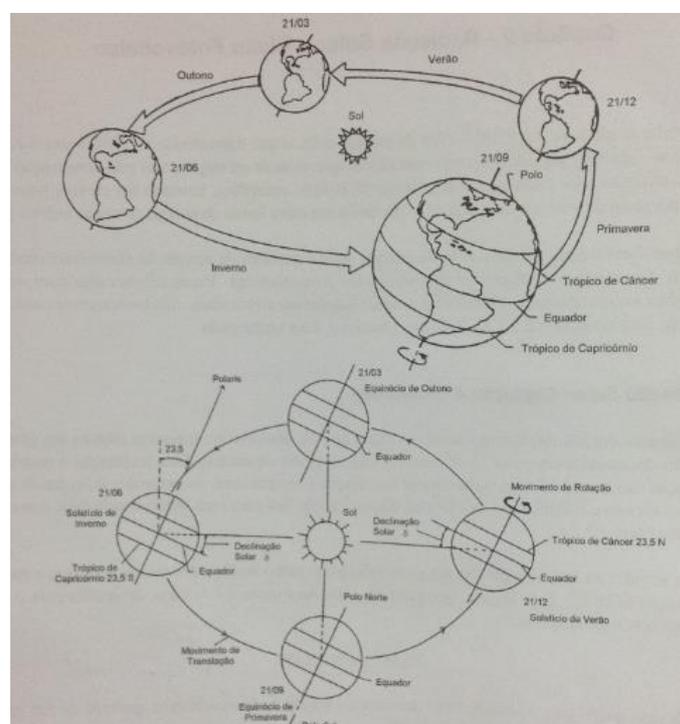


Figura 4 - Movimentos da Terra
Fonte: CEPEL (2004).

Estes movimentos e as relações entre eles dão origem a trajetória aparente do Sol na superfície terrestre em um determinado local em um determinado dia do ano. Quando posiciona-se uma superfície de captação se necessita definir posicionamentos e ângulos importantíssimos para o melhor aproveitamento da energia solar.

- Ângulo de Incidência: ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação. (CEPEL, 2004)
- Ângulo Azimutal da Superfície: ângulo entre a projeção da normal a superfície no plano horizontal e a normal Norte-Sul. O deslocamento angular é tomado a partir do Norte de $-180^\circ \leq a_w \leq 180^\circ$. (CEPEL, 2004)
- Ângulo Azimutal do Sol: ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece a mesma convenção acima. (CEPEL, 2004)
- Altura Solar: ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal. (CEPEL, 2004)
- Inclinação: ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal. (CEPEL, 2004)

Na Figura 5 pode-se observar as angulações e coordenadas de orientação relativas a uma superfície de captação.

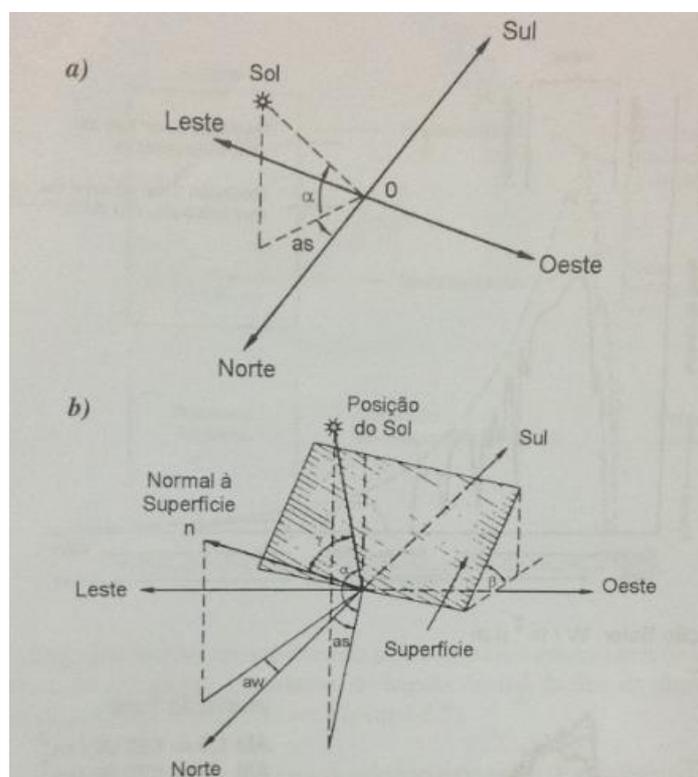


Figura 5 – Incidência da radiação solar em uma superfície
 Fonte: CEPEL (2004).

Segundo CEPEL (2004), conforme a variação de fatores como horário do dia, estações do ano, presença de nuvens, entre outros fatores, a radiação solar apresenta grandes variações, desta forma é conveniente escolher formas de montagem adequadas a cada situação.

Existem três principais formas de montagem para as superfícies de captação de radiação solar.

- Fixa: Uma vez fixada, a superfície de captação, não possui movimentação alguma. (CEPEL, 2004)
- Seguidor de um eixo: O seguidor de um eixo pode movimentar-se, de forma conveniente, para melhor aproveitar exposição ao Sol, em um único eixo, Norte-Sul ou Leste-Oeste. (CEPEL, 2004)
- Seguidor de dois eixos: Este, também conhecido como altazimutal, pode movimentar-se em dois eixos, Norte-Sul e Leste-Oeste, aproveitando ao máximo da radiação solar do local. (CEPEL, 2004)

A forma de montagem a ser escolhida deve levar em consideração fatores econômicos, geográficos e técnicos.

2.4. EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico, é o princípio de funcionamento da energia elétrica gerada a partir da radiação solar. Segundo Hinrichs e Kleinbach (2004), o efeito fotoelétrico foi descoberto em 1887 por Heinrich Hertz e explicado posteriormente, em 1905, pelo maior físico do século XX, Albert Einstein.

Heinrich Hertz, quase que acidentalmente, observou que uma centelha pode passar de uma esfera metálica para outra quando suas superfícies carregadas eram iluminadas pela luz de outra centelha, a luz que incidia sobre

as superfícies facilitava a liberação de partículas, chamadas de elétrons (YOUNG, H. D.; FREEDMAN, 2004).

Einstein explicou este efeito ao pressupor que, neste caso, a luz se comporta mais como uma partícula do que como uma onda. A energia de cada partícula de luz, chamada de fóton, depende apenas da sua frequência e é igual a $h \times f$, onde h é uma constante conhecida como constante de Plank e f é a frequência da luz. Um elétron em um átomo de metal é capaz de “capturar” um fóton e obter a energia necessária para escapar se a energia do fóton exceder a energia de adesão do elétron ao metal. (HINRICHS; KLEINBACH, 2003, p. 311)

Este fenômeno pode ser estudado conforme o artefato mostrado na Figura 6:

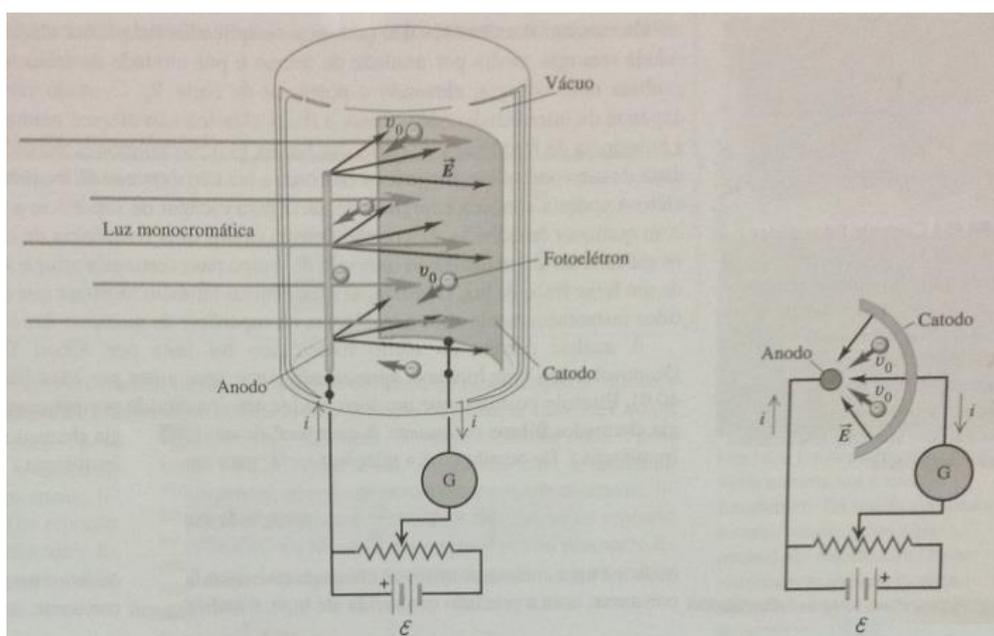


Figura 6 – Experimento
Fonte: YOUNG, H. D.; FREEDMAN (2004).

2.4.1. Semicondutor

Um semicondutor possui uma resistividade elétrica intermediária, porém, o que o torna extraordinariamente importante é a sensibilidade de suas

características elétricas a pequenas variações de impurezas (YOUNG, H. D.; FREEDMAN,2004). O silício é o semicondutor mais utilizado (CEPEL, 2004). Fazendo parte do grupo IV da tabela periódica, este elemento possui quatro elétrons na camada de valência, podendo formar longas estruturas com quatro ligações covalentes, eletricamente estáveis. Como pode ser observado na Figura 7.

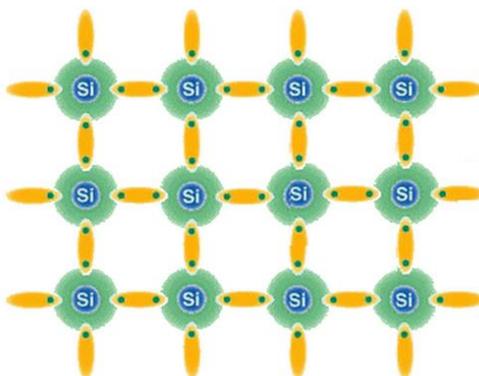


Figura 7 - Cristal de Silício
Fonte: SEMICONDUTORES (2014).

O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, é um mau condutor de eletricidade. Entretanto, materiais pentavalentes tal como o fósforo, compartilham com a estrutura quatro ligações covalentes e sobra um elétron, que fica livre para mover-se através do cristal. Ao silício dopado com sobra de elétrons dá-se o nome de silício tipo N. (TOLMASQUIM, 2003)

A realização de um processo similar, mas acrescentando boro (átomo do Grupo III da tabela periódica) ao invés de fósforo, da origem à existência de lacunas, pois este elemento pode fazer somente três ligações covalentes deixando um espaço livre, uma lacuna. Ao silício dopado com falta de elétrons dá-se o nome de silício tipo P. A Figura 8 mostra uma estrutura de cristal de silício com dopagens de tipo P e tipo N.

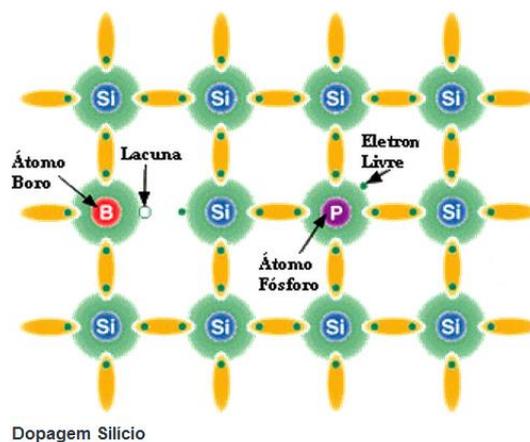


Figura 8 - Dopagem Tipo N e Tipo P
 Fonte: SEMICONDUTORES (2014).

2.5. COMPONENTES BÁSICOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico pode ser simplificado pela composição de três partes básicas: o arranjo dos módulos fotovoltaicos, o subsistema de condicionamento de potência, o qual reverte a saída do arranjo em potência útil, e as baterias, que têm a função de armazenar a energia elétrica gerada. (CEPEL, 2004)

A Figura 9 demonstra didaticamente como é o arranjo de sistemas fotovoltaicos.

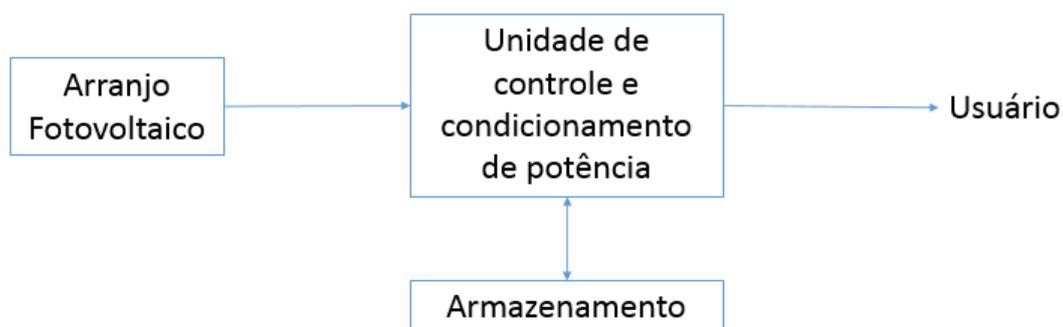


Figura 9 - Configuração Básica de Sistema Fotovoltaico

Fonte: Adaptado de CEPEL (2004)

Os painéis fotovoltaicos são os dispositivos mestres do sistema, este é responsável pela conversão da radiação solar em energia elétrica.

Segundo CEPEL (2004) o subsistema de condicionamento de potência possui os componentes responsáveis pelo processo do controle da energia enviada a carga para consumo ou às baterias para o armazenamento.

2.5.1. Célula, módulo e painel solar fotovoltaico

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 semicondutor. 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)

O efeito fotovoltaico e o funcionamento de uma célula fotovoltaica esta representado didaticamente na Figura 10.

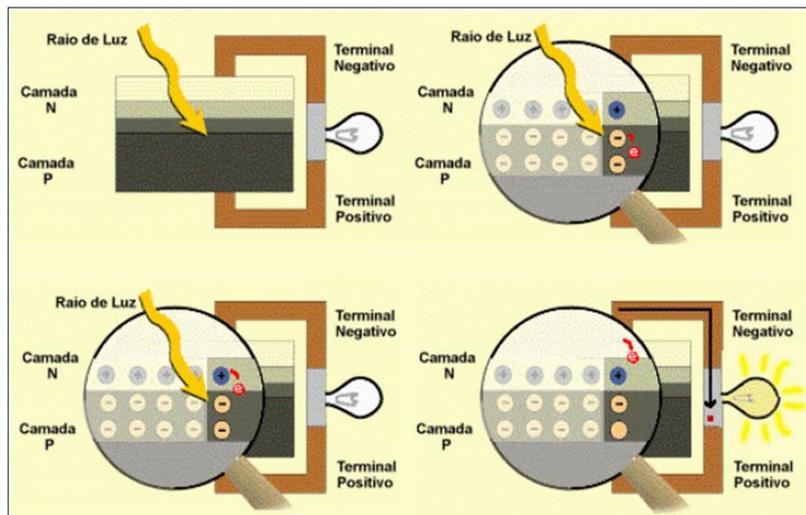


Figura 10 - Efeito Fotovoltaico
Fonte: ELETROSUL, 2014.

A célula é o dispositivo elementar, desenvolvido para realizar a conversão da radiação solar em energia elétrica. O processo de confecção de uma célula fotovoltaica exige alta tecnologia e muita precisão. Devido a isso, nem todos os países produzem essa tecnologia, e os poucos que a produzem buscam aperfeiçoar e baratear o custo dessa tecnologia (GUIMARÃES, GONÇALVES, 2012).

Basicamente, os painéis fotovoltaicos são um conjunto de módulos fotovoltaicos, e os módulos, um conjunto de células fotovoltaicas (ABNT, 2006). Painéis fotovoltaicos são um ou mais módulos interligados eletricamente, formando uma única estrutura (ABNT, 2006). Na Figura 11 pode-se observar as unidades e conjuntos citados.

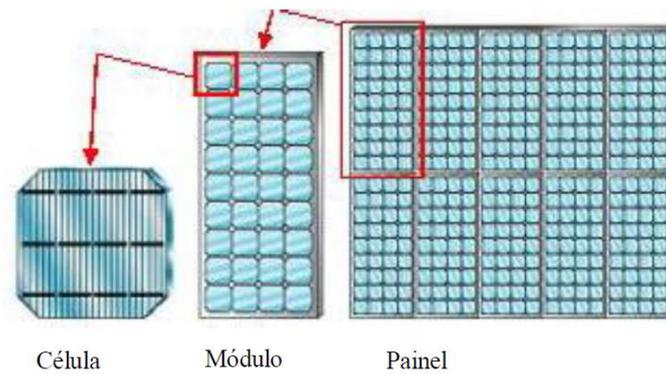


Figura 11 - Célula, módulo e painel fotovoltaico
Fonte: GUIMARÃES, GONÇALVES (2012).

A Figura 12 mostra uma visão geral do painel fotovoltaico instalado na UFSC, sendo esse um dos pioneiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil e integrado a uma edificação urbana, utilizando módulos de silício amorfo (a-Si) (URBANETZ, 2010, p. 42).



Figura 12 – Sistema fotovoltaico da USFC, instalado 2,02 kWp.
Fonte: URBANETZ (2010).

2.5.1.1. Tecnologias Disponíveis

Os módulos solares fotovoltaicos podem ser feitos de diversos materiais. Alguns deles são encontrados com maior facilidade na natureza do que outros. Também vale destacar que alguns elementos manipulados para a fabricação desses módulos são tóxicos (RÜTHER, 2004).

Para a produção das células solares fotovoltaicas, pode-se destacar 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 (CIGS) (RÜTHER, 2004).

A informação mais relevante no que diz respeito ao uso final do módulo FV fabricado com os diferentes materiais é a eficiência de cada um deles. A Tabela 3 mostra a eficiência das principais tecnologias utilizadas em módulos fotovoltaicos.

Tabela 3 - Eficiência das principais tecnologias utilizadas em módulos fotovoltaicos

Tipos de tecnologias	Rendimento Típico	Rendimento Máx. registrado em laboratório
a-Si	6-7%	12,70%
CdTe	7-9%	16%
CIGS	11%	18%
p-Si	11-14%	18,60%
m-Si	12-15%	24%

Fonte: Adaptado de LOURENÇO et. al. (2007).

a) Silício mono cristalino (m-Si) e silício poli cristalino (p-Si)

O processo de fabricação do silício cristalino atinge altas temperaturas, pressões elevadas e é demorado, pois o silício deve se cristalizar formando cristais maiores. Esse processo de fabricação peculiar faz com que o preço do

módulo seja elevado, sendo que os custos já foram reduzidos ao máximo. Apesar disso, o silício cristalino é o material mais utilizado para a conversão de energia solar em elétrica, e o principal motivo para ser o mais fabricado no mundo é devido a sua robustez e confiabilidade (RÜTHER, 2004).

Uma das razões pelas quais o preço do módulo é elevado é a espessura das lâminas cristalinas (300 – 400 μm), que é muito grossa em relação as outras tecnologias (1 μm aproximadamente). Essa tecnologia vem continuamente sendo a mais utilizada, principalmente por ser a mais eficiente. Em países como Japão e Alemanha, onde o território possui dimensões pequenas e na maioria das vezes os módulos FV são instalados no meio urbano, a área ocupada pela instalação é limitada e a eficiência torna-se de suma importância para que a geração FV seja viável (RÜTHER, 2004).

O silício poli cristalino p-Si apresenta uma eficiência e um custo de produção menor em relação ao m-Si. A principal diferença está na perfeição cristalina, que é menor no p-Si em relação ao m-Si, e é proveniente do processo de fabricação (RÜTHER, 2004). A Figura 13 e Figura 14 trazem exemplos de módulos solares de m-Si e p-Si, respectivamente.



Figura 13 - Módulo solar m-Si
Fonte: GUIMARÃES, GONÇALVES (2012).

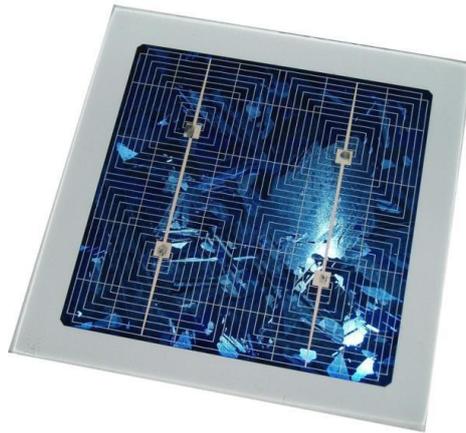


Figura 14 - Módulo solar p-Si
Fonte: GUIMARÃES, GONÇALVES (2012).

b) Silício amorfo hidrogenado

Essa tecnologia começou a ser utilizada em células solares em meados da década de 70, sendo a primeira tecnologia que empregou filmes finos a ser comercialmente viável (RÜTHER, 2004). O a-Si apresenta respostas melhores que o c-Si em relação à luz artificial, por isso foi empregado na confecção de calculadoras, relógios e outros itens que possuem baixo consumo elétrico. O a-Si possui, também, um processo de produção a temperaturas relativamente baixas, sendo mais atrativo que o c-Si financeiramente (RÜTHER, 2004). Na Figura 15 pode-se observar a tecnologia em questão.



Figura 15 - Filmes finos de a-Si.
Fonte: GUIMARÃES, GONÇALVES (2012).

Por possuir uma espessura mais fina e poder ser mais de 50% mais barato, por metro quadrado, que o c-Si, o a-Si, tem sido amplamente utilizado no âmbito arquitetônico, principalmente para revestimento de coberturas. Complementarmente, o a-Si não apresenta diminuição de eficiência quando ocorre aumento na temperatura, ao contrário de outras tecnologias empregadas (RÜTHER, 2004).

c) Telureto de cádmio

O Telureto de cádmio (TeCa) apresenta como vantagens o seu baixo custo de produção, atraente aspecto arquitetônico, espessura da placa (filme fino) e maior eficiência em relação ao a-Si. Já vinha sendo utilizado em calculadoras desde os anos 90 e no ano 2000 começaram a surgir painéis fotovoltaicos deste material (RÜTHER, 2004).

As desvantagens são a sua baixa eficiência se comparado com o c-Si, a raridade das matérias primas na natureza e a toxicidade das mesmas (RÜTHER, 2004). A Figura 16 e Figura 17 mostram exemplos de aplicação da tecnologia CdTe em módulos fotovoltaicos.



Figura 16 - Arranjo de telureto de cádmio.
Fonte: GUIMARÃES, GONÇALVES (2012).



Figura 17 - Módulos fotovoltaicos de CdTe em aplicações arquitetônicas.
Fonte: RÜTHER (2004).

d) Disseleneto de cobre e índio

Esses painéis solares, assim como os s-Si e CdTe, apresentam ótima aparência estética e estão surgindo no mercado com grandes superfícies, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Semelhantemente ao CdTe,

estes materiais apresentam elevada toxicidade e deve-se prestar atenção nos mesmos, uma vez que eles atinjam uma quantidade significativa de produção (RÜTHER, 2004). A Figura 18 e Figura 19 trazem exemplos desse material empregado em módulos FV.



Figura 18 - Módulos fotovoltaicos de CIGS em aplicações arquitetônicas.
Fonte: RÜTHER (2004).

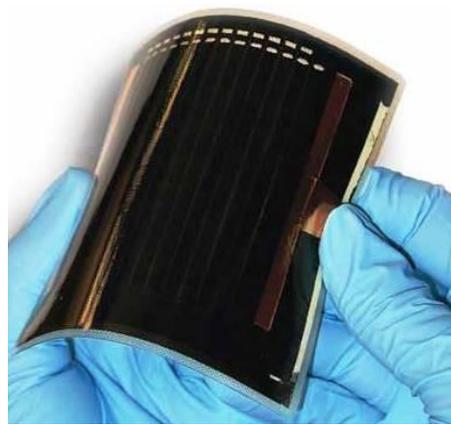


Figura 19 - Módulo CIGS.
Fonte: GUIMARÃES, GONÇALVES (2012).

2.6. RELAÇÃO DE DESEMPENHO

O *Performance Ratio*, ou, em tradução livre para o português, taxa de desempenho, é uma das variáveis mais importantes para a análise da eficiência de um sistema fotovoltaico.

Este índice caracteriza-se pela razão entre a leitura real da produção de energia de um sistema fotovoltaico pela sua produção teórica calculada (produção nominal). O mesmo é independente da orientação do sistema e da incidência de radiação solar, podendo ser usado para comparar sistemas fotovoltaicos espalhados pelo mundo todo. (SMA, 2014)

O PR (*Performance Ratio*) é representado em porcentagem, com seu valor podendo chegar a 80% em instalações fotovoltaicas de alta eficiência. Um PR de 100% não é possível de se atingir em sistemas reais, pois sempre existirão perdas na geração, conversão e transmissão como um todo, inviáveis de serem evitadas. (SMA, 2014)

Se assumido que o sistema fotovoltaico foi instalado de maneira otimizada, o PR é uma importante ferramenta de monitoramento do mesmo. Com leituras periódicas de produção de energia, pode-se perceber uma falta ou anomalia com antecedência, analisando-se o comportamento do PR (SMA, 2014).

O cálculo do PR de um sistema fotovoltaico é dado pela equação (3), sendo esta a relação direta entre a leitura da produção de energia do sistema e o valor calculado para este mesmo sistema.

$$PR = \frac{\text{leitura real da energia produzida em kWh}}{\text{calculado nominal da energia a ser produzida em kWh}} \quad (3)$$

2.6.1. Fatores de influência no *Performance Ratio*

Neste capítulo, serão apresentados os fatores que influenciam no cálculo do PR de um sistema fotovoltaico. Todos possuem influência direta no resultado do índice, e na qualidade do sistema como um todo. Esses fatores podem ser separados em duas classes.

2.6.1.1. Fatores Ambientais

A temperatura é um dos fatores ambientais que influenciam no PR. A temperaturas mais baixas, um sistema fotovoltaico é especialmente eficiente. As perdas por alta temperatura nas células são fatores existentes em todos os sistemas, estes diminuem consideravelmente a sua performance e eficiência (SMA, 2014).

O principal efeito do aumento da temperatura do módulo é a queda na tensão produzida. Essa queda é de cerca de 0,37% para cada grau centígrado de aumento de temperatura. Conseqüentemente, tem-se uma redução na potência fornecida da ordem de 0,45% para cada grau centígrado de aumento da temperatura (ALVARENGA, 2014). A corrente de curto circuito sofre uma variação muito pequena neste caso, quase desprezível (CARDADOR, 2011).

Na Gráfico 3, é possível observar o comportamento das curvas Tensão x Corrente, com radiação fixa e vários valores distintos de temperatura para um módulo de silício cristalino para 1000W/m².

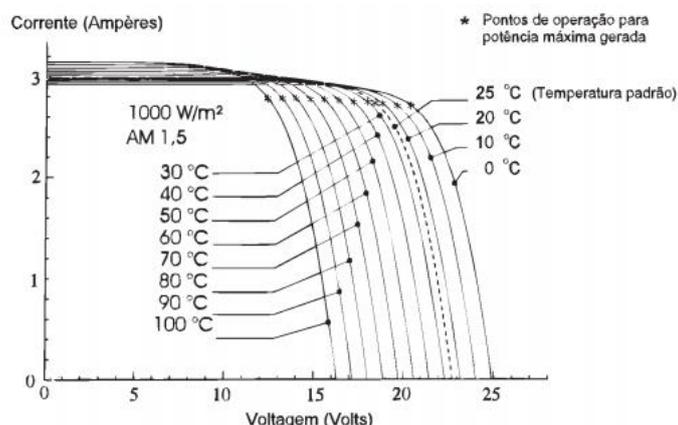


Gráfico 3 - Efeito da temperatura da célula na curva característica V x I
Fonte: CRESESB (2004).

Na Gráfico 4, é possível observar a relação entre potência máxima fornecida pela célula e temperatura da mesma, ao longo do tempo, desde o momento em que o sistema é exposto à radiação e temperatura de operação.

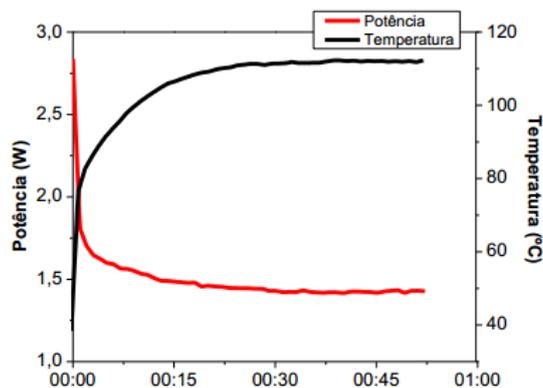


Gráfico 4 - Variação da potência e da temperatura ao longo do tempo
Fonte: Pina (2013).

Para minimizar o efeito das perdas quando a célula atinge altas temperaturas, existem recursos de arrefecimento que podem ser utilizados. Os dois exemplos mais recorrentes são arrefecimento utilizando água como líquido refrigerador e arrefecimento por ventilação (PINA, 2013).

Em um experimento prático, onde as mesmas células fotovoltaicas, quando submetidas durante uma hora a uma radiação constante de 800W/m^2 , nota-se a diferença na temperatura das células quando não há arrefecimento e quando há água ou ventilação como agentes refrigerantes (PINA, 2013). O Gráfico 5 exemplifica este experimento prático.

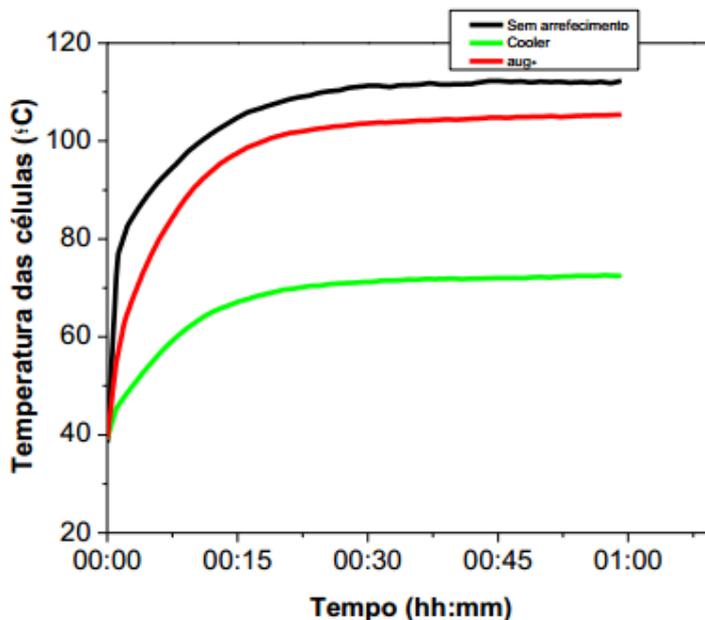


Gráfico 5 - Evolução da temperatura
 Fonte: Pina (2013).

Outro fator que deve ser referenciado é a temperatura nominal de operação da célula, ou temperatura de utilização da célula (TUC). Devido as diferenças entre as condições típicas de funcionamento externo e as condições em que o painel é testado em laboratório, faz-se necessário estabelecer a temperatura esperada de operação da célula, inversamente proporcional à tensão nominal da mesma (quanto maior a temperatura, menor a tensão nominal). Em inglês, o termo é conhecido como *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT). A temperatura de utilização da célula é definida como sendo a temperatura alcançada pelas células de circuito aberto em um módulo sob as seguintes condições de funcionamento (PV EDUCATION, 2014): irradiância na superfície da célula de 800 W/m²; temperatura do ar de 20°C; velocidade do vento de 1 m/s; montagem de circuito aberto (PV EDUCATION, 2014).

Os melhores módulos operam com uma TUC de 33°C, os piores com 58°C e os módulos padrão operam a 48°C. Esta última pode ser uma temperatura padrão de utilização da célula a ser adotada em estudos comparativos (PV EDUCATION, 2014).

A radiação solar influencia consideravelmente na *performance* e na eficiência de um sistema. No período da manhã ou final da tarde, ou no inverno, quando o sol está em uma altura baixa no céu, a incidência de radiação solar não está otimizada, gerando perdas no sistema. A radiação depende essencialmente das condições atmosféricas e do posicionamento geográfico (SMA, 2014).

Na Gráfico 6, é possível observar o comportamento das curvas Tensão x Corrente, para vários valores distintos de radiação. Nota-se que existe uma proporção praticamente linear entre o aumento da radiação e a corrente de curto circuito do sistema. A tensão, por sua vez, sofre variações mínimas quando é alterada a radiação, sendo estas praticamente desprezíveis.

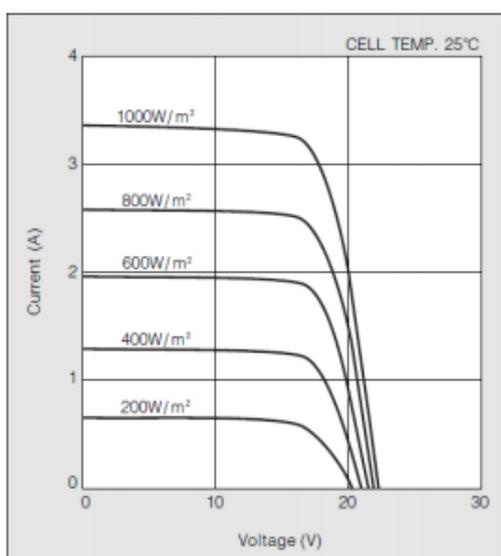


Gráfico 6 - Característica V-I para diferentes radiações a temperatura constante de 25°C
Fonte: Cardador (2011).

Se em algum momento do dia o painel fotovoltaico encontra-se sombreado por edifícios ao redor, ou se existe uma camada de poeira, pólen, neve ou qualquer tipo de impureza sobre a superfície do mesmo, o sistema irá absorver menos radiação. (SMA, 2014).

2.6.1.2. Fatores não-ambientais

Segundo SMA (2014) os fatores não ambientais podem ser divididos em 7 fatores listados abaixo:

- **Período de medição:** deve ser estabelecido um período de medição longo o suficiente, para que possíveis anomalias climáticas sejam absorvidas e não influenciem consideravelmente nos valores finais medidos, nem no cálculo da média global destes mesmos valores (SMA, 2014).
- **Perdas por condução:** a corrente que circula do painel para o inversor pode gerar perdas, dependendo do tipo e do material do cabo utilizados. Desta maneira, o PR pode ser reduzido por perdas na condução (SMA, 2014).
- **Fator de eficiência do inversor:** com inversores de boa qualidade – eficiência do inversor de 90% - pode-se atingir valores mais altos de *Performance Ratio* (SMA, 2014).
- **Tecnologia usada na célula solar:** como visto anteriormente, de acordo com a tecnologia utilizada, a eficiência da célula sofrera uma alteração (SMA, 2014).
- **Degradação da célula:** a degradação temporal da célula diminui sua eficiência. Células mono e policristalinas degradam-se em até 20% em 20 anos (SMA, 2014).
- **Orientação do instrumento de medição:** a orientação do instrumento de medição deve ser a mesma orientação do sistema de geração FV, para que não haja discrepância entre a radiação que cada um recebe (SMA, 2014).

2.7. TOPOLOGIAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Conforme Demonti (2003) os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em dois grandes grupos: os sistemas isolados ou autônomos e os conectados à rede elétrica.

Na sequência, categorizam-se os tipos de sistemas fotovoltaicos existentes, como visto na Figura 20.

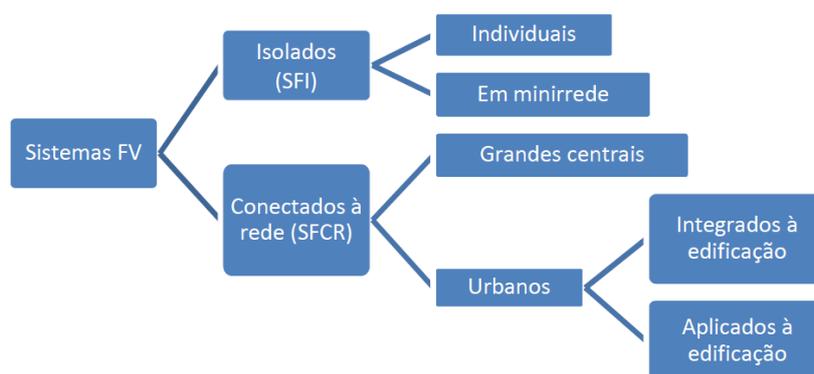


Figura 20 - Tipos de Sistema Fotovoltaico
Fonte: URBANETZ (2010).

2.7.1. Sistemas Fotovoltaicos Isolados

Os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) geram toda sua energia a partir de painéis fotovoltaicos e, geralmente, necessitam de baterias para auxiliar na alimentação da carga. 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).

O SFI está tão intimamente ligado ao tipo de carga alimentada que o arranjo dos equipamentos do sistema muda conforme a carga. Na bibliografia atual pode-se encontrar livros que separam os sistemas híbridos dos sistemas isolados, gerando assim três grupos de sistemas fotovoltaicos.

2.7.2. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Os SFVCRs são basicamente um tipo de arranjo fotovoltaico que representa uma fonte complementar a um sistema elétrico de grande porte.

Os sistemas interligados operam em conjunto com a rede elétrica já existente. Podem suprir uma parte da energia fornecida pela rede ou até mesmo produzir excesso de energia. Este excedente pode reduzir o consumo de combustíveis fósseis e de água utilizados para a produção de energia elétrica. A potência destes sistemas não necessariamente deve ser alta, sendo que, geralmente, são instalados em diversos pontos distantes entre si, caracterizando os chamados sistemas de geração distribuída. (DEMONTI, 2003, pg. 8)

Os SFVCRs podem ser classificados em: sistemas residenciais e sistemas de grande porte. Os sistemas residenciais possuem três principais tipos de arranjo:

- **Medição Única do Balanço de Energia:** Segundo Souza (2013) os sistemas de medição única ou de balanço de energia representados na Figura 21, possuem um único medidor para registro de energia gerada e entregue à concessionária, sendo possível o registro do consumo exclusivamente a partir da rede de distribuição de energia da concessionária local.

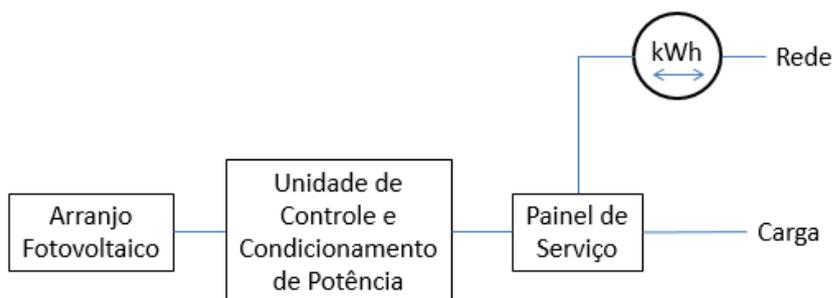


Figura 21 - Medição Única do Balanço de Energia
Fonte: CEPEL (2004).

- Medição Dupla: Conforme Souza (2013) os sistemas de medição dupla, como ilustrado esquematicamente na Figura 22, são aqueles que como o próprio nome indica, possuem recursos de medição que permitem a tarifação tanto do ponto de vista da energia gerada no sistema fotovoltaico, quanto da utilizada pelo consumidor a partir da rede de distribuição da concessionária local.

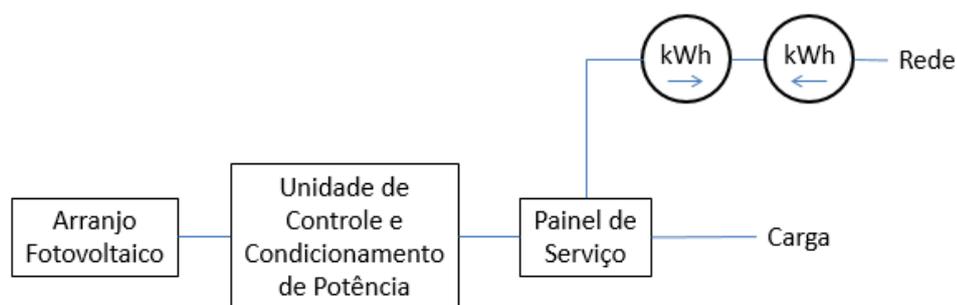


Figura 22 - Medição Dupla
Fonte: CEPEL (2004).

- Medição Simultânea: Quando se deseja ter informações precisas sobre o consumo de energia e a produção do SF, deve-se adotar este tipo de medição. A Figura 23 mostra que a conexão do SF é feita independentemente do painel de serviço local, evitando desta forma qualquer tipo de interferência do circuito de consumo local com a produção e/ou tarifação da energia gerada. (CEPEL, 2004)

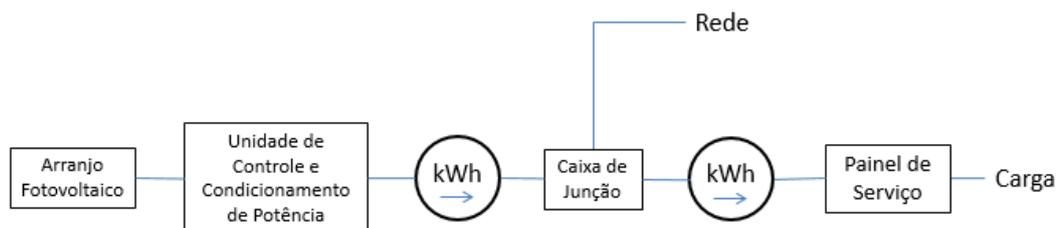


Figura 23 - Medição Simultânea
Fonte: CEPEL (2004).

“Os sistemas de grande porte são empregados por concessionárias que detêm a geração, distribuição e transmissão de energia elétrica, sendo os sistemas fotovoltaicos interligados à rede de distribuição em tensão secundária.” (SOUZA, 2013) A Figura 24 mostra um esquema típico de sistemas de grande porte onde é evidenciada a presença de um transformador elevador para a conexão com a rede.

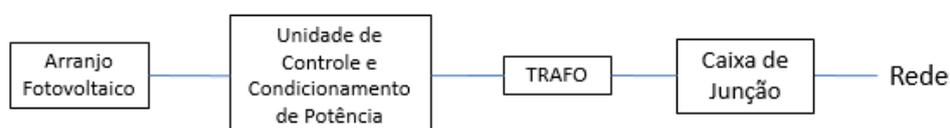


Figura 24 - Sistemas de Grande Porte
Fonte: CEPEL (2004).

Instalações deste tipo vêm tornando-se cada dia mais comuns nos países desenvolvidos, e começam a tornarem-se importantes nos países em desenvolvimento. O Gráfico 7 demonstra essa afirmação. Enquanto a capacidade acumulada de SFI não apresenta crescimento expressivo, o SFVCR encontra-se com crescimento acelerado em sua capacidade total instalada (IEA, 2013).

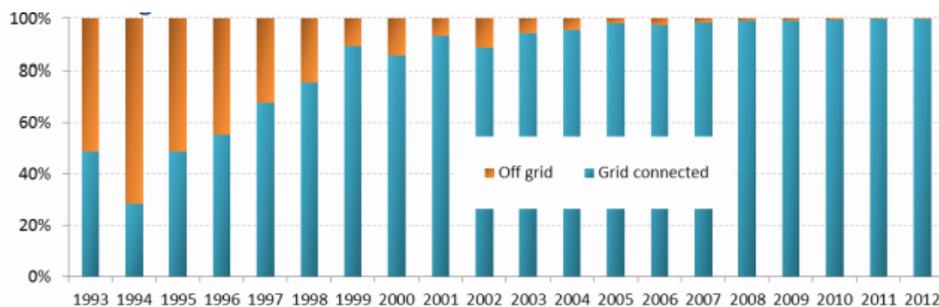


Gráfico 7 - SFI vs. SFCR
Fonte: IEA (2013)

A elevada produtividade (toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada) e a ausência do conjunto de baterias (um elo frágil no SFI devido à baixa vida útil em relação a dos módulos FV e dos inversores). Outra característica desse sistema é que na ausência de energia da rede, o inversor desliga o sistema automaticamente, evitando assim o fenômeno de ilhamento. (Urbanetz, 2010, p.37)

O fenômeno de ilhamento ocorre quando parte da rede elétrica é desconectada proposadamente ou acidentalmente do restante do sistema da concessionária, mas essa continua a ser energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a ela, formando um subsistema isolado (Urbanetz, 2010).

O sistema FV deve ser desconectado da rede imediatamente quando há falta de fornecimento pelo lado da concessionária. Desta maneira, uma eventual manobra na rede que venha a ocorrer quando a mesma apresenta problemas pode ser feita com segurança. Do contrário, mesmo com a rede desconectada pelo lado da concessionária, o SFVCR poderia estar fornecendo energia e isso apresentaria um risco de vida para o operador da concessionária.

No Brasil, um dos primeiros SFVCR entrou em operação em 1997 e localiza-se na Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente, o mesmo possui uma potência instalada de 2,02 kWp e ainda encontra-se em operação (URBANETZ, 2010).

2.8. ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

O ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, elaborado em 2006, sob coordenação do Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE), é referência no Brasil para se obter estimativas médias de radiação solar. O mesmo teve como principais objetivos o levantamento de dados climatológicos e imagens de satélites no período de 1995-2005, podendo, assim, ser utilizado como ponto de referência para auxiliar o desenvolvimento de estudos e incentivo a projetos nacionais de energia FV.

Vários métodos foram desenvolvidos para solucionar numericamente a equação de transferência radioativa de forma precisa. Dentre eles pode-se citar os métodos que utilizam harmônicos esféricos, ordenadas discretas, ordens sucessivas de espalhamento, Monte Carlo e diferenças finitas. Estas técnicas necessitam um tempo computacional elevado para obtenção de estimativas de irradiância solar, principalmente em condições de céu com nuvens de elevada espessura ótica.

Como alternativa a esses métodos, foram desenvolvidos métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor para a obtenção de estimativas de irradiação confiáveis por meio da resolução numérica da equação de transferência radiativa. Entre eles, destacam-se o Método de Dois-Fluxos e a Aproximação de Eddington bastante utilizados nos modelos em uso. (PEREIRA et. al., 2003)

O Método de Dois-Fluxos baseia-se na decomposição do fluxo de radiação em dois sentidos de propagação. Uma análise comparativa dos resultados desta metodologia determinou discrepâncias da ordem de 3% (PEREIRA et. al., 2006). Para descrever matematicamente o método o artigo de Pereira et. al. (2006) pode ser usado como referência.

Conforme Pereira et. al. (2006) a obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície utilizando o modelo BRASIL-SR está dividida em três etapas: tratamento dos dados climatológicos e imagens de satélite, aplicação do Método de Dois-Fluxos e por último cálculo da radiação global.

Para mostrar o quão complexo é a obtenção dos dados de irradiação solar em uma determinada região, a Figura 25 apresenta as etapas que foram necessárias até que, ao final do processo, uma estimativa das componentes de

radiação solar na superfície do território brasileiro fosse obtida. Para tanto, foi utilizado o modelo Brasil-SR (PEREIRA et al., 2006).

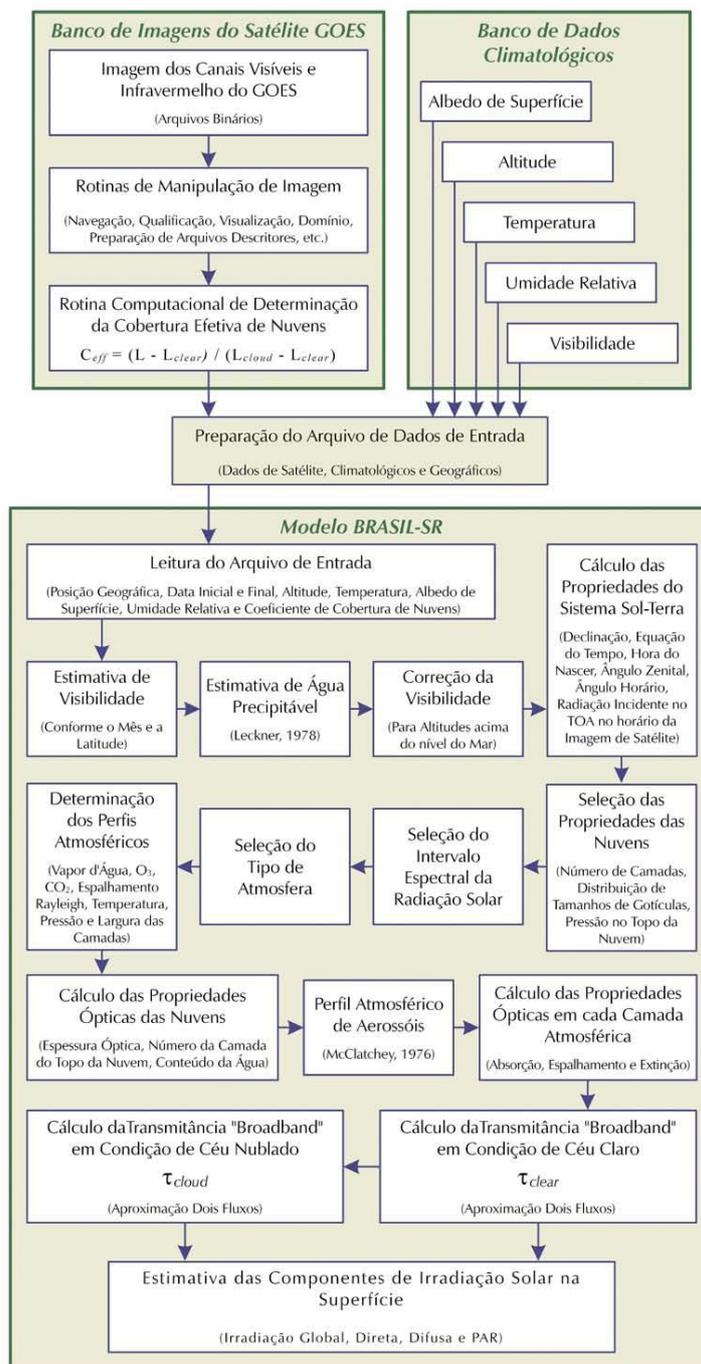


Figura 25: Fluxograma do modelo BRASIL-SR
 Fonte: Pereira et. al (2006).

Mas como nivelar a confiabilidade do método Brasil-SR? Para isso, foi realizada a avaliação dos desvios apresentados pelos valores estimados para o fluxo de radiação solar em relação aos valores medidos na superfície, utilizando de duas etapas primordiais: primeiramente a comparação com modelos e projetos já bem estabelecidos e em segundo lugar os valores estimados foram comparados com os medidos em diversas estações solarimétricas, espalhadas por todo território nacional (PEREIRA et al., 2006).

A primeira comparação foi realizada junto aos modelos de transferência radiativa HELIOSAT, utilizado nos recursos solares da Europa, SUNNY/ALBANY, desenvolvido pelo *State University of New York* e o modelo DLR, desenvolvido no *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*. (PEREIRA et al., 2006). Os resultados da primeira etapa mostraram que o modelo BRASIL-SR apresenta um desempenho muito próximo aos demais modelos, sem que nenhum modelo apresente uma vantagem estatisticamente significativa sobre os demais (MARTINS et al., 2006).

Após segunda etapa da validação do modelo, que é responsável pela comparação com dados medidos na superfície, ao analisar o desempenho pode-se observar que o modelo Brasil-SR apresentou um desempenho similar em todas as regiões geográficas do Brasil (PEREIRA et al., 2006).

A Tabela 4 apresenta os desvios observados e o número de estações envolvidas na tarefa de validação em cada região, para a segunda etapa. Os dados de superfície utilizados na validação foram submetidos a um controle de qualidade com o intuito de permitir uma avaliação mais segura da confiabilidade das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR (MARTINS et al., 2006).

Tabela 4 - Desvios observados para as estimativas de irradiação solar

Região Brasileira	MBE* (Wh/m ²)	Desvio Padrão do MBE	rMBE (%)	rRMSE** (%)	Fator de Correlação	640
Norte	353,48	640,29	0,07	0,15	0,85	11
Nordeste	306,75	631,10	0,06	0,13	0,97	13
Centro-oeste	272,11	669,80	0,05	0,13	0,89	25

Região Brasileira	MBE* (Wh/m ²)	Desvio Padrão do MBE	rMBE (%)	rRMSE** (%)	Fator de Correlação	640
Sudeste	249,10	662,74	0,05	0,14	0,93	38
Sul	259,49	546,71	0,05	0,12	0,97	11

Fonte: MARTINS et. al. (2006)

A partir da análise da Gráfico 8, pode-se verificar que o modelo BRASIL-SR apresentou um desempenho similar com uma ligeira superestimativa do fluxo de radiação em todas as regiões geográficas do país (MARTINS et al., 2006).

O Gráfico 8 foi dividido em 5 gráficos de seções alfanuméricas, cada uma representando uma região do país: a) Norte; b) Nordeste; c) Centroeste; d) Sudeste; e) Sul.

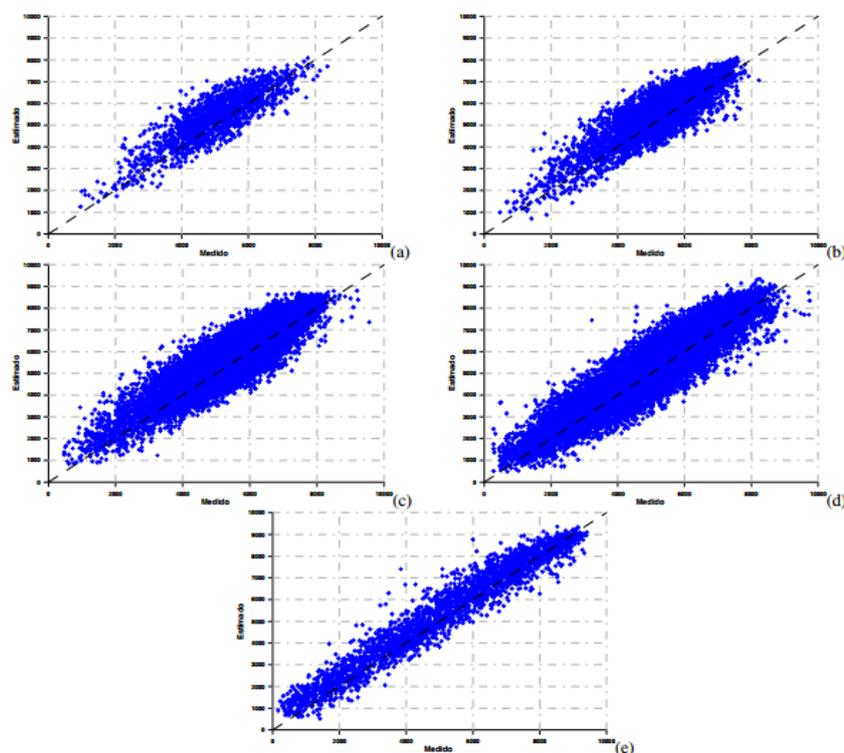


Gráfico 8 - Gráficos de dispersão BRASIL-SR vs. valores medidos em superfície
Fonte: MARTINS et al. (2006).

Apesar das diferentes características climáticas que o Brasil possui, pode-se observar, de maneira geral, um alto nível de irradiação solar, sendo o valor máximo encontrado no norte do estado da Bahia, cerca de 6,5 kWh/m²/dia, onde o clima é semiárido com baixa precipitação durando o ano e já a média mais baixa encontra-se no estado de Santa Catarina, cerca de 4,25 kWh/m²/dia, região com precipitação bem distribuída no decorrer do ano. Os valores de média de irradiação solar calculados são superiores a maioria dos países da União Europeia, como Alemanha, por exemplo (PEREIRA et al., 2006). A Figura 26 traz o mapa do Brasil com uma escala referente à radiação solar global horizontal média anual.

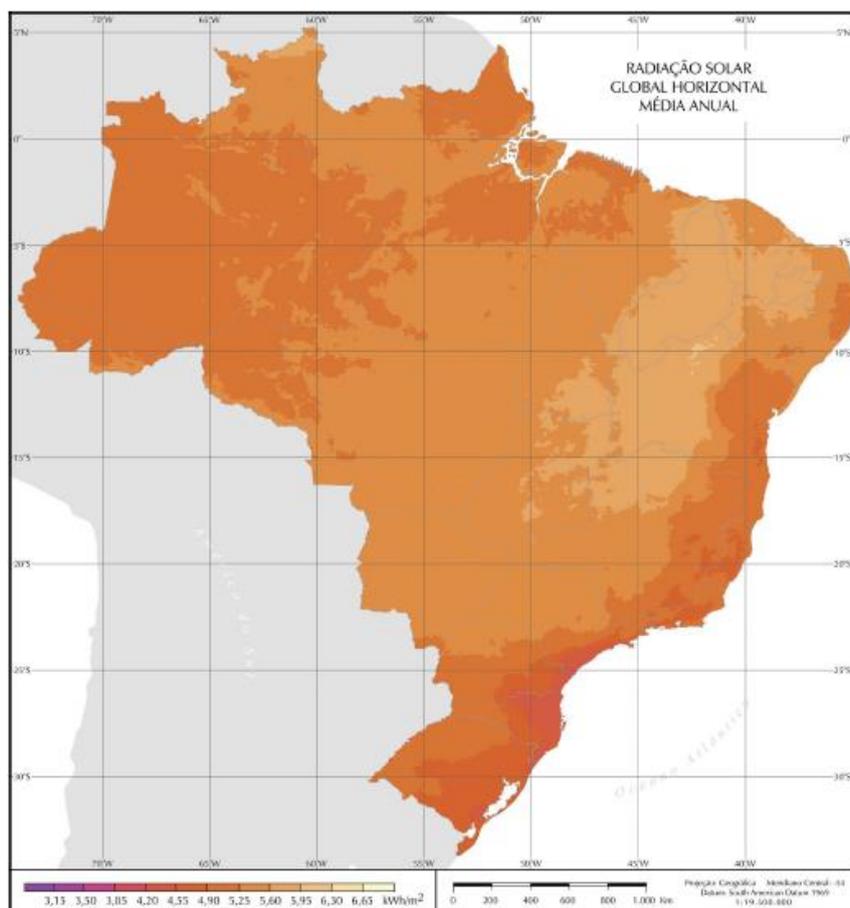


Figura 26: Radiação solar global horizontal média anual.
Fonte: PEREIRA et al. (2006).

A Figura 27 mostra de uma forma simplificada um resumo da radiação solar no território brasileiro, separando-a nas mesmas cinco regiões encontradas no Brasil, mencionadas na Gráfico 8.

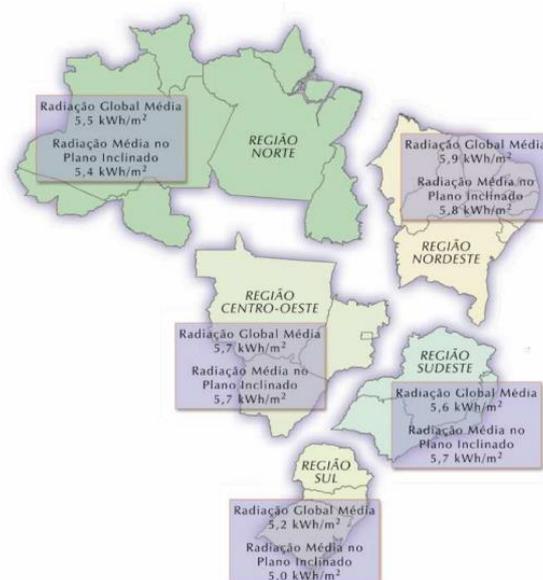


Figura 27 - Radiação Solar por Região no Brasil.
Fonte: Santos (2008).

A irradiação solar sazonal apresenta maior variação inter-sazonal na região Sul do país. As características de clima temperado da região e a sua maior proximidade do eixo polar, faz com que a nebulosidade da região seja elevada. A Figura 28 traz um mapa de radiação solar, no Brasil, para cada estação do ano.

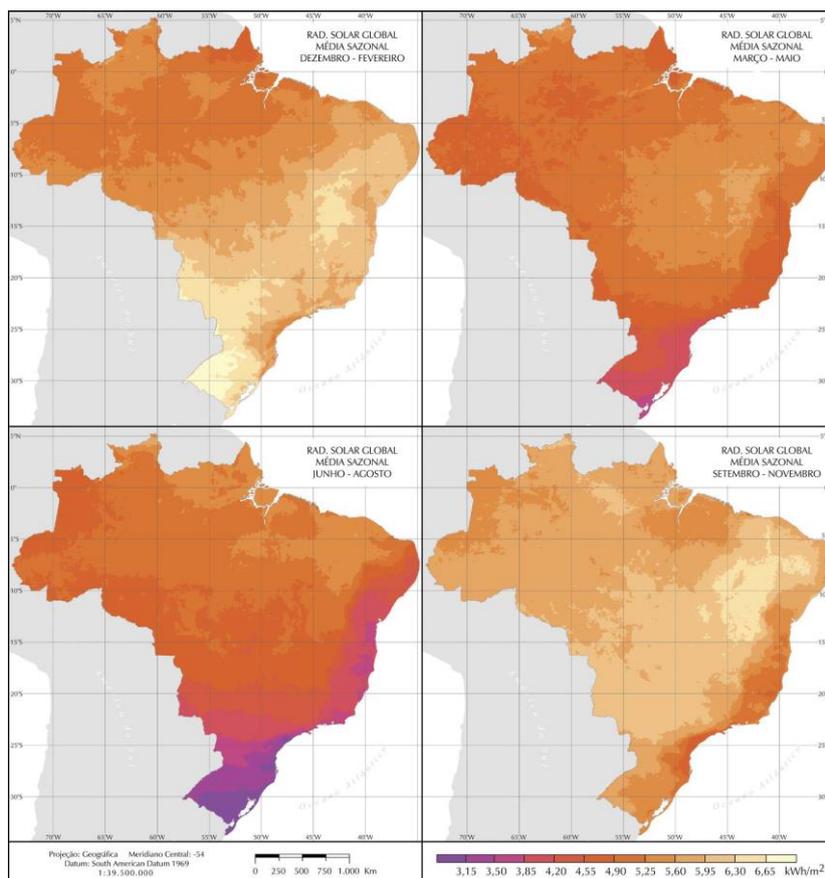


Figura 28: Mapa de radiação sazonal no território brasileiro.
Fonte: Pereira et al. (2006).

2.9. LEGISLAÇÃO ALEMÃ

A crise do petróleo, ocorrida em 1970, provocou os primeiros questionamentos da sociedade alemã em relação à matriz energética de seu país. Após isto e o acidente nuclear ocorrido em Chernobyl, em 1986, colocou 70% da opinião pública alemã contra o uso da energia nuclear no país. Também em 1986, um relatório da Sociedade Alemã de Física foi publicado, avisando sobre uma iminente catástrofe climática, o qual recebeu muita atenção da mídia e dos políticos. Essa era a conjuntura sociopolítica na Alemanha, quando, em 1988, dois grandes programas de incentivo ao uso de fontes renováveis de energia foram lançados (MME, 2009).

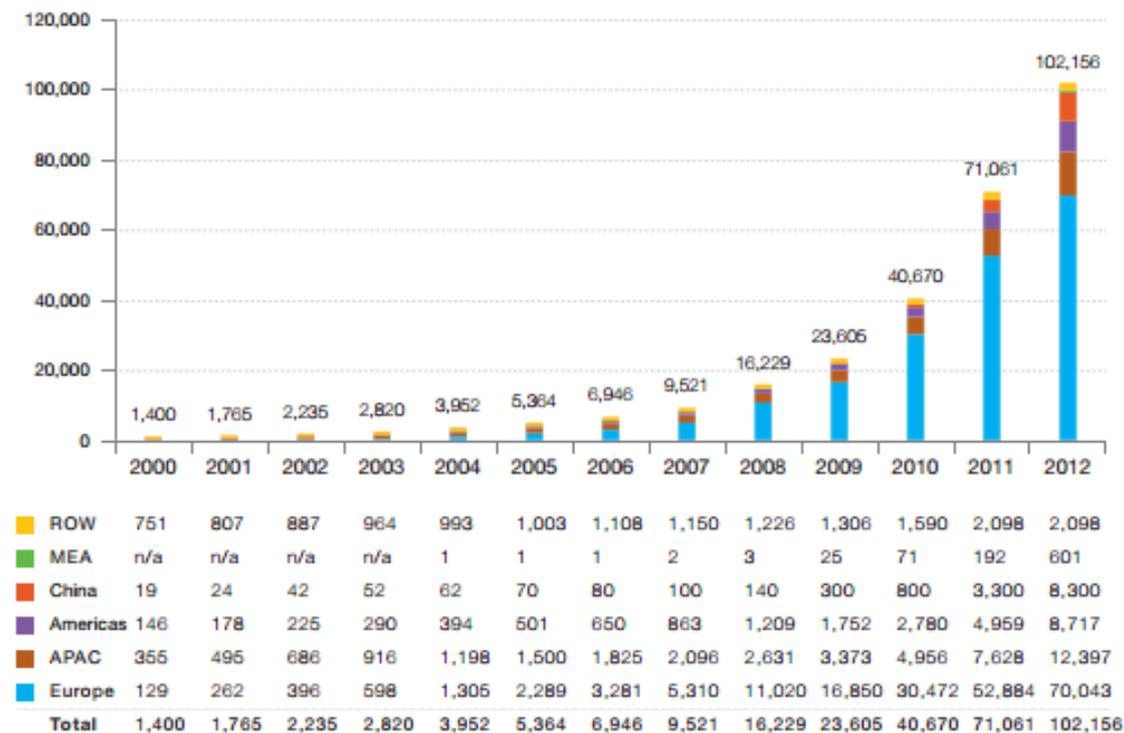
O primeiro, que teve início em 1989, tinha como foco o incentivo ao uso da energia eólica. Foi em 1990, então, que foi lançada e adotada a *Electricity Feed-in Law*, que trata da injeção da energia gerada por FRE na rede elétrica pública (MME, 2009).

A *Feed-in Law*, primeiramente, depois a *Renewable Energy Law*, implantada em 2000 e a emenda *Renewable Energy Sources Act* de 2004 são a chave para o sucesso das fontes renováveis na Alemanha. Basicamente, a operadora da rede compra toda a eletricidade gerada por fontes renováveis, pagando ao gerador uma tarifa *premium* distinta para cada tecnologia. Essa tarifa é paga através de um fundo, que é alimentado financeiramente por meio de um pequeno acréscimo na tarifa de todos os consumidores. O incentivo ao uso de FRE é pago gradativamente, como um prêmio por kWh ao longo de vários anos, e o consumidor tem seus investimentos recuperados num período de 10 a 12 anos (SALAMONI; RUTHER, 2007).

Rovere et al. (2011) define os princípios do desenho de um instrumento de promoção de FRE na Alemanha:

- Estabelecimento de um quadro regulatório claro, definindo para o mercado os objetivos e garantindo a segurança do investimento no longo prazo (ROVERE et. al., 2011);
- Definição de uma tarifa *premium* capaz de estimular o mercado
- Garantia do acesso para a conexão à rede (ROVERE et. al., 2011)
- Definição dos parâmetros técnicos e operacionais para a conexão à rede (ROVERE et. al., 2011).

O sistema *feed-in law* instalado na Alemanha a coloca como país com maior potência instalada de energia FV. O Gráfico 9 mostra a liderança consolidada da Europa, em MW instalados.



ROW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific.

Gráfico 9 – Evolução da capacidade FV instalada no mundo 2000 – 2012 (MW).
Fonte: EPIA (2013).

A mais recente lei alemã que trata da geração e do consumo dos energéticos renováveis é a *EEG – Erneuerbare Energien Gesetz* – ou Legislação para as Fontes Renováveis de Energia (BMU, 2013). A EEG traz um conjunto de informações e de esclarecimentos sobre o funcionamento dos subsídios para quem possui uma fonte de energia renovável em casa, e que gere eletricidade conectado na rede. Além disso, estabelece metas de utilização de FRE para os estados alemães, entre outros pontos importantes para toda a cadeia produtiva envolvida nesta forma de geração (BMU, 2013). Ou seja, a EEG impacta e direciona nos investimentos de uma indústria que vem crescendo consideravelmente na Alemanha.

Outros países com capacidade instalada expressiva de energia solar fotovoltaica adotam políticas de incentivo a utilização desta fonte de geração. O Quadro 1 traz os exemplos de políticas adotadas pelos países com maior capacidade instalada de energia fotovoltaica.

Quadro 1 - Exemplos das Políticas Adotadas nos Países com Maior capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica.

	Estados Unidos	Japão	Alemanhã	Espanha
Instrumento Adotado	Incentivos Fiscais Subsídios aos Investimentos	Incentivos Fiscais Subsídios aos Investimentos	Feed-in-Tariffs Subsídios ao Investimento Empréstimo com baixas taxas de juros	Feed-in-Tariffs Subsídios ao Investimento Empréstimo com baixas taxas de juros
Principal Característica	A junção de incentivos federais e estaduais vem proporcionando a introdução dessa fonte.	Incentivo ao investimento de 50%.	As instalações Fotovoltaicas são conectadas à rede e o gerador (residencial ou comercial) recebe a tarifa premium por toda energia gerada	
Custo (U\$ cent/kWh)	0,48	0,35	0,65	0,42
Indicador de Efetividade da Política	10%	20%	20%	5%

Fonte: Adaptado de Salamoni e Ruther (2007).

3. A CIDADE DE CURITIBA

Este capítulo faz uma análise da conjuntura econômica, populacional e de consumo energético do município de Curitiba, apresentando as características necessárias para a escolha da cidade de comparação.

Curitiba é a capital do Estado do Paraná, um dos três Estados que compõem a Região Sul da República brasileira. É a cidade com maior população do Paraná, com 1.751.907 habitantes, sua área total é de 435.495 Km², gerando assim uma das maiores densidades demográficas do país com 4022,79 hab./Km². (IBGE, 2014).

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).

Por tratar-se de uma cidade modelo não só para o Brasil, mas para o mundo, Curitiba gera a expectativa de continuar na vanguarda em gestão pública voltada ao humano e ao meio-ambiente. E um dos dilemas do século XXI é a relação entre o bem estar da população, que possui uma correlação com o consumo de energia, e as questões ambientais (PERFIL DE CURITIBA, 2014).

3.1. ANÁLISE DA CONJUNTURA ENERGÉTICA DA GRANDE CURITIBA 2013

A Copel foi criada em outubro de 1954, atuante com tecnologia de ponta nas áreas de geração, transmissão, distribuição de energia e telecomunicações (A COPEL, 2014).

Antes ainda da existência da Copel, os serviços elétricos a cargo do Governo Estadual estavam confiados ao DAEE, instituído em outubro de 1948. Sua criação assinalou o início de grande movimentação na área, pois foi praticamente contemporânea à elaboração do primeiro Plano Hidrelétrico do Estado: ao mesmo tempo em que dava início às obras de sua primeira etapa, o DAEE passou a instalar motores e conjuntos a diesel com capacidade entre 70 e 154 kVA em muitas localidades, em caráter de emergência, para atender o crescimento que todo o interior já experimentava.

Como as obras maiores eram de construção mais demorada e exigiam muito capital, a solução possível foi esta. E nesse sentido a ação do DAEE teve o mérito do esforço pioneiro, garantindo o fornecimento de eletricidade a várias dezenas de cidades - além de proporcionar assistência a prefeituras que mantinham serviços próprios de eletricidade.

Em 1953, uma Lei Estadual criou a taxa de eletrificação, proporcionando novos recursos financeiros para a execução do Plano. No ano seguinte foi criada a Copel, que deveria assumir gradativamente a responsabilidade pelos serviços até então a cargo do DAEE, prefeituras e concessionárias particulares. (HISTÓRIA DA ENERGIA NO PARANÁ, 2014).

A COPEL 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 do Paraná (A COPEL, 2014).

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

3.2. PROJEÇÃO DA DEMANDA DA GRANDE CURITIBA PARA 2030

Neste sub-capítulo, serão realizadas as projeções de demanda para Curitiba no ano de 2030, aplicando-se a análise de diferentes cenários de

crescimento. Para a realização desta projeção. Tomou-se como base estudos nacionais, estimando, na sequência, o crescimento para Curitiba.

3.2.1. Crescimento Demográfico

Conforme mencionado anteriormente Curitiba possui 1.751.907 habitantes (base 2010). Estima-se que a taxa de crescimento do Paraná deve gradativamente, passar de 0,64% ao ano entre os anos 2010/2020 para 0,41% ao ano entre 2020/2030 (JUSBRASIL, 2014).

A Tabela 5 mostra a progressão do crescimento populacional de Curitiba, assumindo o mesmo crescimento populacional estimado para o Paraná.

Tabela 5 - Projeção da População de Curitiba para 2030

Ano	2011	2012	2013	2014	2015
Hab.	1.763.119	1.774.403	1.785.759	1.797.188	1.808.690
Ano	2016	2017	2018	2019	2020
Hab.	1.820.266	1.831.916	1.843.640	1.855.439	1.867.314
Ano	2021	2022	2023	2024	2025
Hab.	1874970	1882657	1890376	1898127	1905909
Ano	2026	2027	2028	2029	2030
Hab.	1913723	1921570	1929448	1937359	1945302

Fonte: Autoria própria, baseada em JUSBRASIL (2013).

Sendo assim, a população do município deve alcançar, no ano de 2030, 1.945.302 habitantes.

3.2.2. Cenários Simulados

Para estabelecer o crescimento do PIB utiliza-se o documento Matriz Energética Brasileira 2030, redigido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE – órgão vinculado ao Governo Federal, que tem como foco a elaboração de uma estratégia da expansão da oferta de energia no Brasil nos próximos anos, para atender à crescente demanda do país.

Os cenários simulados tratam de trajetórias possíveis, fatores condicionantes, tanto externos quanto internos, que podem contribuir para que haja uma alteração na previsão que o estudo determina. A fim de minimizar as divergências entre o que este estudo prevê e a realidade, faz-se necessária uma revisão periódica tanto do Plano Nacional de Energia quanto da Matriz Energética Nacional, bem como em suas premissas e hipóteses. Este processo é realizado da mesma maneira em países desenvolvidos.

Portanto, serão realizadas projeções de demanda de energia levando-se em conta o fator econômico de crescimento. O PIB foi escolhido como base para esta projeção, por existir um forte vínculo entre o consumo de energia elétrica e o PIB de uma determinada região.

A Matriz Energética Nacional 2030 estabelece, como premissa para as análises constantes nos documentos, quatro diferentes cenários de crescimento do Produto Interno Bruto. Para o estabelecimento destes cenários, foi utilizada a “técnica dos cenários”.

Tal técnica combina fatos propostos sobre o futuro, como demografia, geografia, arranjos socio-políticos, análise institucional, recursos à disposição e infra-estrutura com outras alternativas plausíveis, as quais são consideradas as forças diretoras do cenários. Alternativas plausíveis são alguns elementos difíceis de precisar, quando do estabelecimento de um cenário como este, como, por exemplo, os culturais, as interpretações subjetivas da realidade, mudanças regulatórias, revoluções, entre outros (MME, 2007).

Finalmente, na atual conjuntura política e econômica do país, os cenários que serão expostos a seguir são não somente prováveis, como também interessantes de serem analisados. O Quadro 2 expõe e caracteriza os cenários mundiais, onde fatores com incerteza crítica são levados em

consideração. Tais cenários são as bases para o estabelecimento dos cenários nacionais (MME, 2007).

Quadro 2 - Caracterização dos Cenários Mundiais

Incerteza Crítica	Denominação dos Cenários		
	Mundo Uno	Arquipélago	Ilha
Padrão de Globalização	Conectividade máxima: multilateralismo	Conectividade parcial: blocos econômicos	Conectividade interrompida: protecionismo
Estrutura de poder político e econômico	Equilíbrio de forças e compartilhamento do poder político	Hegemonia dos blocos liderados aos Estados Unidos e da União Europeia	Maior participação dos blocos dos países asiáticos
	Políticas macroeconômicas coordenadas	Recuperação do equilíbrio macroeconômico da economia americana por meio de ajuste interno	Ruptura do equilíbrio pelo esgarçamento das relações comerciais sino-americanas, seguida de reequilíbrio econômico.
Solução de Conflitos	Soluções negociadas	Conflitos localizados	Divergências acentuadas

Fonte: MME, (2007) pág. 63

A composição das hipóteses de evolução econômica e produtiva é o resultado da análise dos cenários, e, dessa maneira, pode ser estabelecida uma taxa de crescimento do PIB, global e por setor, da economia brasileira (MME, 2007).

A Figura 29 exhibe os possíveis cenários de crescimento econômico para o mundo em comparação com os quatro cenários de crescimento propostos para o Brasil.

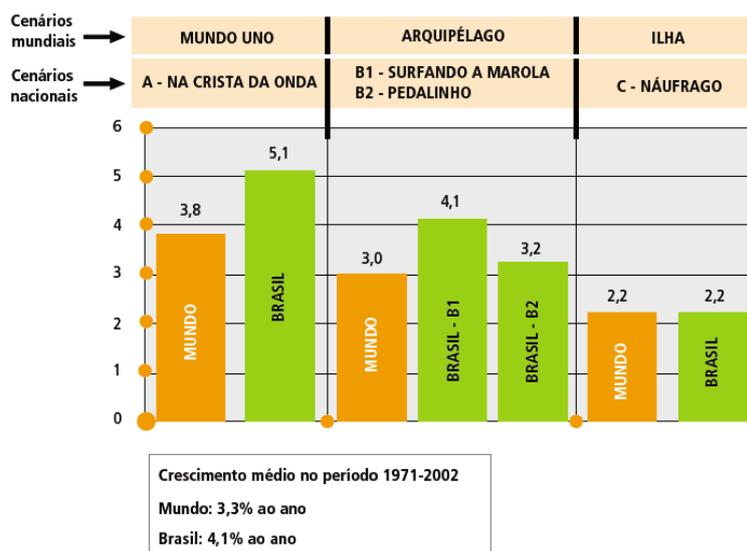


Figura 29 - Cenários de crescimento econômico mundial vs. Brasil
Fonte: MME, (2007).

A Figura 30 mostra os detalhes do crescimento econômico por setor dos cenários estabelecidos para o Brasil até 2030.

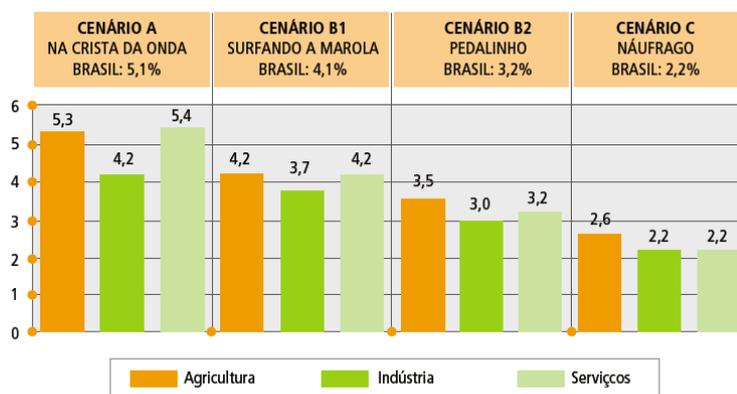


Figura 30 - Detalhes do crescimento econômico dos cenários propostos
Fonte: MME, (2007).

Nota-se 4 diferentes cenários, sendo o “A” o cenário onde o país mais crescerá economicamente, e o C onde ele menos crescerá economicamente. Os cenários B1 e B2 apresentam uma taxa de crescimento do PIB de 4,1 e

3,2% ao ano, respectivamente. Por recomendação da Agencia Internacional de Energia e do Departamento de Energia dos Estados Unidos, é prudente prever o cenário mundial “Arquipélago” como mais provável para crescimento econômico mundial, respectivamente os cenários B1 e B2 de crescimento econômico nacional (MME, 2007).

Para as projeções de Curitiba serão utilizados os mesmos percentuais de crescimento do PIB. A Tabela 6 mostra o PIB na Grande Curitiba para 2030 conforme os quatro cenários.

Tabela 6 - Crescimento do PIB – Curitiba

Cenário	% A.A	PIB (1000 R\$)	
		2012	2030
A	5,1		149.450.123
B1	4,1	58.082.416	124.625.965
B2	3,2		105.671.755
C	2,2		87.823.693

Fonte: Autoria própria.

3.2.3. Consumo Energético

Como a geração solar fotovoltaica, foco deste trabalho, é uma fonte para geração de eletricidade, esta análise será focada apenas ao consumo final de eletricidade. A Tabela 7 mostra o consumo final de energia elétrica em 2030 para os quatro cenários propostos.

Tabela 7 - Projeção da Demanda Energética de Curitiba para 2030

Cenário	% A.A	Demanda (MWh)	
		2012	2030
A	5,1		11.499.777
B1	4,3	4.697.216	10.022.085
B2	3,9		9.352.342
C	3,5		8.725.028

Fonte: Autoria própria.

3.2.4. Resumo das Projeções de Curitiba para 2030

Na Tabela 8 encontra-se o resumo dos dados das projeções para Curitiba em 2030.

Tabela 8 - Resumo das Projeções para Curitiba em 2030

Cenário	A	B1	B2	C
População (hab.)	1.945.302	1.945.302	1.945.302	1.945.302
Área (km ²)	435,495	435,495	435,495	435,495
PIB (1000 R\$)	149.450.123	124.625.965	105.671.755	87.823.693
Demanda de Energia Elétrica (MWh)	11.499.777	10.022.085	9.352.342	8.725.028
Radiação Média (Anual)	1.357,8	1.357,8	1.357,8	1.357,8

Fonte: Autoria própria

4. CIDADE REFERÊNCIA PARA COMPARAÇÃO

Sempre que entra em pauta o tema geração fotovoltaica, pensa-se na Alemanha como uma referência para os outros países do mundo. Deste mesmo país, nesta etapa do trabalho, será escolhida uma cidade, principalmente, por possuir uma expressiva potência fotovoltaica instalada. Tal área será identificada e estudada neste capítulo, para efeitos de comparação com Curitiba 2030.

Apresenta-se uma descrição breve da atual conjuntura econômica e da matriz energética da região escolhida, bem como dos dados relacionados à incidência de irradiação média, potência fotovoltaica instalada, energia fotovoltaica gerada, número de equipamentos fotovoltaicos instalados, participação da geração fotovoltaica na matriz energética da região, temperatura média ao longo do ano e em cada período isoladamente entre outros dados relevantes para a realização do estudo comparativo.

4.1. O ESTADO DA BAVÁRIA E A CIDADE DE MUNIQUE

O estado da Bavária detém o posto de mais antigo e com maior área de toda a Alemanha. Com mais de mil anos de história e tradição, a região destaca-se por possuir uma economia robusta e moderna, com indústrias multinacionais e de médio porte, além de universidades bem conceituadas e pesquisas voltadas para tecnologia de ponta (BAYERISCHE STAATSREGIERUNG, 2014).

A economia da Bavária é bastante diversificada, destacando-se como uma das regiões mais dinâmicas da Europa. Em 2012, seu PIB alcançou a cifra de, aproximadamente, 465,5 bilhões de Euros, ou 36.701 euros por habitante. Sua população de 12.519.571 habitantes, e densidade demográfica de 180 habitantes por quilometro quadrado fazem deste um estado populoso (BAYERISCHE STAATSREGIERUNG, 2014).

O estado possui um clima temperado, com estações do ano bem definidas. No verão, temperaturas médias variam entre 20 e 30 graus Celsius e, no inverno, as mesmas ficam entre 3 e -1 grau Celsius durante o dia, podendo diminuir mais durante a noite.(ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, 2014).

4.1.5. Energia fotovoltaica na Bavária

A Bavária, por estar localizada no sul da Alemanha, é um dos estados que tem as maiores médias de incidência de irradiação solar. A Figura 31 mostra a média de irradiação solar na Bavária, em quilowatt-hora por metro quadrado, durante o ano.

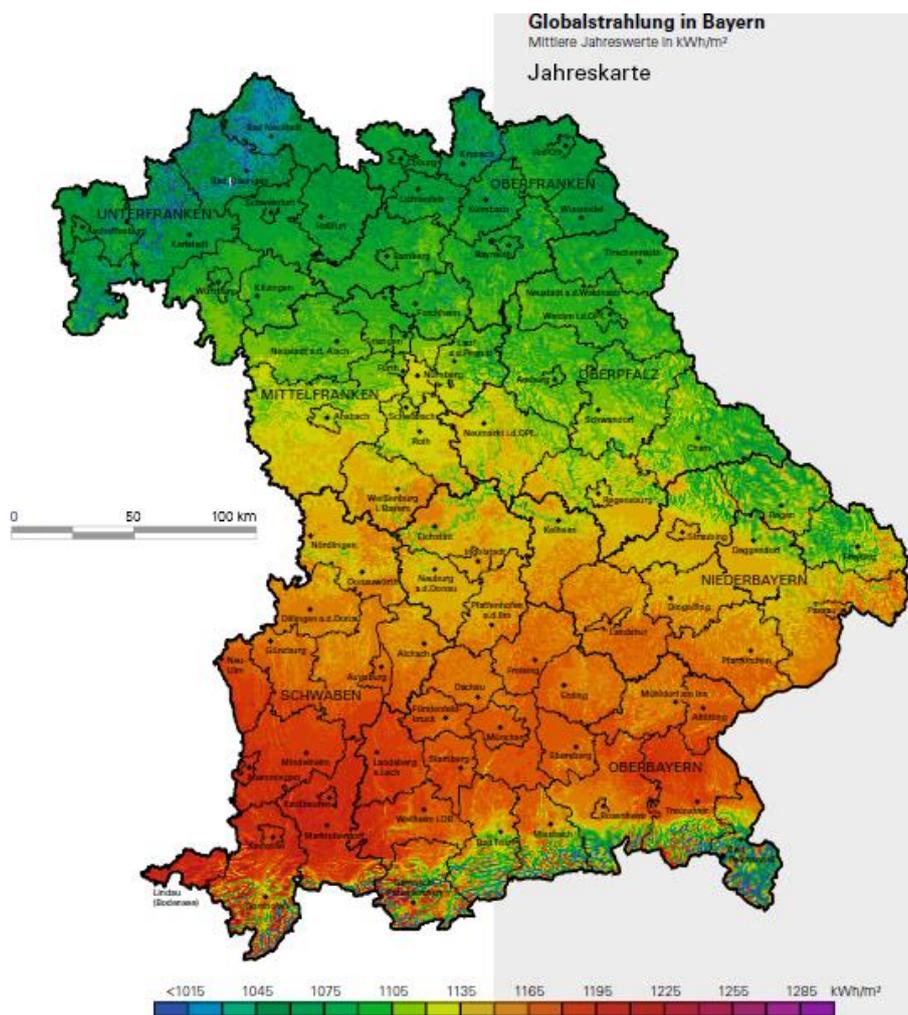


Figura 31 - Irradiação anual média no estado da Bavária
Fonte: BMU, (2013).

A seguir, é apresentada a Tabela 9, que passa uma visão geral sobre a geração fotovoltaica na Bavária, de acordo com a potência de geração dos módulos instalados.

Tabela 9 - Resumo das instalações de equipamentos fotovoltaicos no estado da Bavária.

	Até 10 kW	>10kW até 100kW	>100kW até 1MW	>1MW	Total
Número de equipamentos	189.931	2.229.533	6.385	673	426.522
Potência Instalada [MW]	1.093	5.085	1.406	1.740	9.324
Eletricidade Gerada [milhões kWh](Anual)	924	4.573	1.160	1.556	8.212
Eletricidade gerada por habitante [kWh](Anual)	74	365	93	124	656

Fonte: adaptado de ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, (2014).

Alguns pontos notados são que equipamentos de tamanho médio (10 – 100kW), fornecem mais da metade da eletricidade gerada. Esses equipamentos são, quase que exclusivamente, instalados nos telhados de casas maiores ou em edifícios de comércio local. Já as estruturas com mais de 100kW de potência instalada necessitam, em sua maioria, de uma área livre para serem alocados, ou de uma faixa de telhado extensa, como por exemplo um barracão ou galpão. Vale citar, ainda, que um equipamento com potência instalada de 20kW, considerando-se uma construção e rendimento otimizados, produzirá, em média, 20.000 kWh de energia por ano (ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, 2014).

A maior usina fotovoltaica da Bavária está localizada na cidade de Straßkirchen – distrito de Gänsdorf -, no nordeste do estado. Esta usina, que também é a segunda maior da Alemanha, entrou em operação em novembro de 2009, e produziu 64.060.069 kWh em 2012. Sua potência instalada é de

54.340 kWp (ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, 2014). Na Figura 32 é mostrada uma foto aérea desta usina.

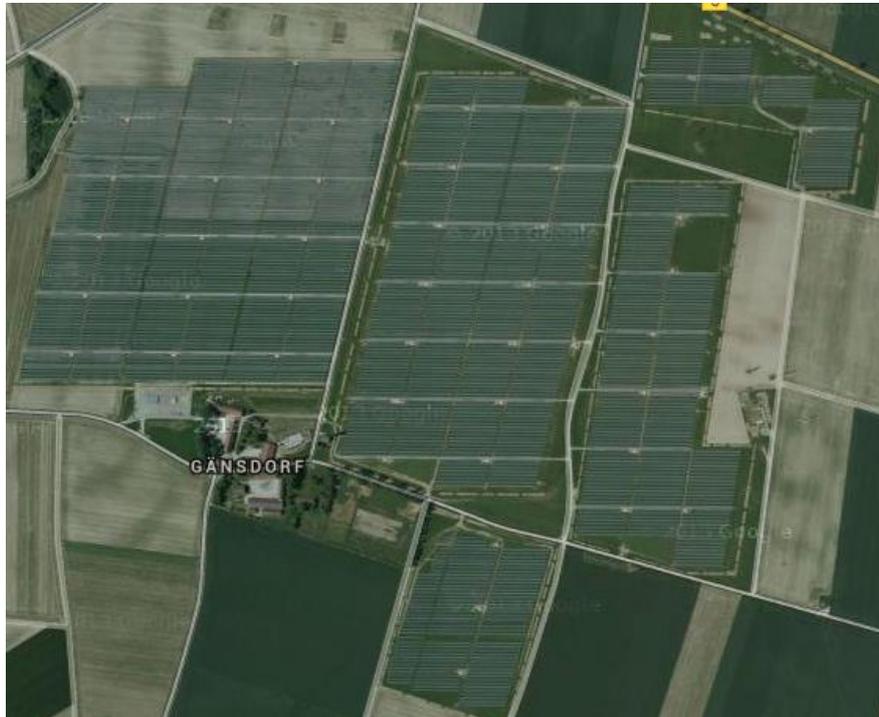


Figura 32 - Usina fotovoltaica de Straßkirche
Fonte: GOOGLE MAPS, (2014).

4.2. A CIDADE DE MUNIQUE

Capital e maior cidade da Bavária, Munique é a terceira maior cidade da Alemanha (atrás de Berlin e Hamburgo), e uma das grandes metrópoles da Europa. Mencionada pela primeira vez em registros históricos em 1158, a cidade atrai pessoas do mundo todo, seja pela prática do turismo, ou por uma viagem a trabalho (MUENCHEN.DE, 2014).

Sua economia é bastante diversificada, contando com Indústrias Multinacionais e de médio porte. Possui a menor taxa de desemprego entre as 4 cidades alemãs com mais de um milhão de habitantes e sua população é a

que possui o maior poder de compra da Alemanha, dentre todas as cidades com mais de 500.000 (quinhentos mil) habitantes (MUENCHEN.DE, 2014).

Seu clima é considerado temperado, sendo julho o mês mais quente e janeiro o mais frio. A sua altitude considerável e proximidade com os Alpes afetam o clima da cidade em geral, causando mais chuvas e neves do que em outras cidades alemãs, e afetando a temperatura em alguns casos (MUENCHEN.DE, 2014).

4.2.1. Energia Fotovoltaica em Munique

O antigo cenário de domínio da energia nuclear vem sofrendo constantes alterações, como prevê a “*Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)*” ou, em tradução livre, “Regulamentação para o uso de energias renováveis”. Através dessa lei, o governo Alemão estabelece e cria incentivos para que até 2020, 35% de toda a eletricidade gerada na Alemanha seja proveniente de fontes renováveis (BMU, 2013). Isso dá força a fontes renováveis como a fotovoltaica, que tende a crescer mais nos próximos anos. (ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, 2014).

A Tabela 10 mostra um panorama geral da energia fotovoltaica em Munique, com dados que serão relevantes para uma posterior comparação com Curitiba 2030.

Tabela 10 - Panorama geral da energia fotovoltaica em Munique.

Munique	
Total de equipamentos fotovoltaicos	3063
Potencia fotovoltaica instalada [MWp]	40
Produção de eletricidade em 2012 [MWh]	34424
Média anual de horas com produção máxima	851
Habitantes	1.388.308
Área [km ²]	310,7
Potência instalada [kWp] por habitante	0,03
Potência instalada [kWp] por hectare	1,3
Produção de eletricidade em 2012 [kWh] por habitante	25
Produção de eletricidade em 2012 [kWh] por hectare	1108

Fonte: Adaptado de ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, (2014).

A maior usina fotovoltaica instalada na Região de Munique gerou, em 2012, 2.031.371 kWh. A usina está localizada na região de Unterföhring, e tem uma potência instalada de 1.766,4 kWp (ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, 2014). A Figura 33 é uma foto aérea da usina, que está destacada, ao lado de outras duas.



Figura 33 - Maior usina fotovoltaica de Munique
 Fonte: Google Maps, 2013.

Outro destaque é a maior usina instalada em uma edificação, da região de Munique, que gerou, em 2012, 211.400 kWh. A usina, que entrou em operação em dezembro de 2010, possui potência instalada de 1.261,1 kWp (ENERGIE-ATLAS BAYERN 2.0, 2014). A Figura 34 é uma foto aérea da usina.



Figura 34 - Maior usina fotovoltaica instalado em edificação de Munique
Fonte: Google Maps, 2013.

Os dados apresentados nesta parte do trabalho são provenientes do site <http://www.energieatlas.bayern.de/>, que autodescreve-se como portal para as políticas estaduais de economia de energia, eficiência e uso de fontes renováveis. O mesmo foi desenvolvido e é administrado pelo Ministério do Meio Ambiente da Bavária.

4.3. JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DE MUNIQUE PARA COMPARAÇÃO

Munique foi escolhida para ser comparada com Curitiba por ser uma grande metrópole, economicamente desenvolvida, densamente povoada e com

cenário expressivo de geração distribuída fotovoltaica, sendo que a maior fonte desta geração é proveniente de equipamentos instalados nas edificações, nos telhados ou nas lajes das residências.

A área e a população são semelhantes às de Curitiba, e conseqüentemente a densidade populacional. Possui menores médias anuais de radiação solar por m² e menores temperaturas médias ao longo do ano. Essas duas variáveis – radiação e temperatura - serão analisadas a fundo no próximo capítulo, para que seja demonstrada a consequência desta diferença, quando comparadas as duas regiões.

5. COMPARAÇÃO ENTRE MUNIQUE E CURITIBA

Este capítulo estabelece as comparações feitas entre as cidades escolhidas: Curitiba e Munique.

5.1. ESTADO DA ARTE ALEMANHÃ VS. BRASIL

Existe uma tendência mundial por atender a crescente demanda de energia elétrica de forma não poluente. O Brasil é um dos poucos países de dimensões continentais que contam com uma matriz energética extremamente renovável, como visto na Figura 1.

No caso da energia fotovoltaica o mercado brasileiro é extremamente promissor. Além do fato do país possuir, por conta da sua localização geográfica, uma fonte inesgotável do principal insumo – o sol –, também dispõem da matéria prima essencial para produção do silício utilizado na fabricação das células fotovoltaicas. (ABINEE, 2012)

Neste sentido, o Brasil pode reunir condições competitivas – e há interesses efetivos – para abrigar investimentos na cadeia de purificação do silício de forma a atender a ambas as cadeias, solar fotovoltaica e de componentes eletrônicos. Assim seria possível explorar um espaço de desenvolvimento de mercado ainda mais vasto do que se revelam as expectativas para o setor de energia solar ao incluirmos os mercados de componentes e material eletrônico – seguimento, aliás, no qual a balança comercial brasileira tem sido há anos crescentemente deficitária. (ABINEE, 2012, p.13)

O fluxograma da Figura 35 mostra como é formada a cadeia de pesquisas e domínio de processos para o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos.

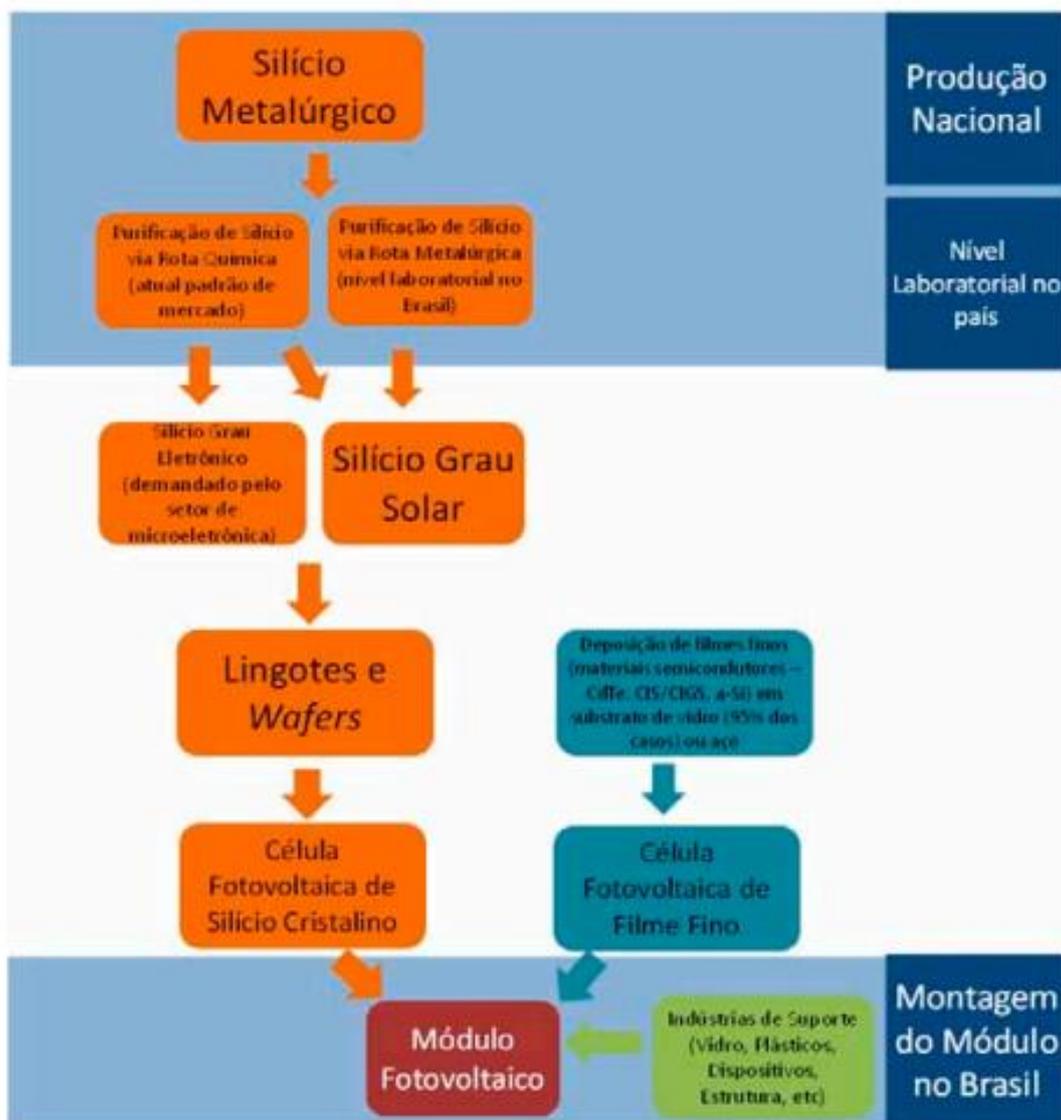


Figura 35 - Cadeia para produção de PV no Brasil
Fonte: ABINEE (2012).

Enquanto o Brasil luta por investimentos para atender a purificação do silício, países como a Alemanha contam com uma vasta gama de indústrias específicas no setor fotovoltaico. Segundo BSW-Solar (2013) a Alemanha conta com 5000 empresas no setor fotovoltaico, destas 200 produzem células, módulos ou outros componentes.

Estas empresas ajudam a disseminar a tecnologia fotovoltaica e por consequência baratear seu custo, fazendo da Alemanha a maior produtora de energia fotovoltaica do mundo.

5.2. PREMISSAS DE COMPARAÇÃO

Existem diversos fatores que influenciam na geração de energia elétrica a partir da tecnologia fotovoltaica. Como visto em capítulos anteriores, pode-se analisar o desempenho de um sistema fotovoltaico dividindo estes fatores em dois tipos: fatores ambientais e fatores não ambientais (SMA, 2014).

Como premissa de comparação, neste trabalho, estabelece-se que as análises tem como foco o sistema global, e não características individuais do sistema. Por tanto, os fatores não ambientais, que refletem grande parte nas características individuais de cada sistema, como eficiência da célula, eficiência do inversor, perdas por condução, material utilizado, rendimento e construção do inversor, entre outros, neste estudo são considerados constantes, iguais para ambas as cidades analisadas.

Em relação ao material empregado na célula FV, será pressuposto que a mesma será feita de silício cristalino, pois, segundo Rüter (2004) é o mais eficiente e mais empregado no mercado atual.

Os fatores ambientais estabelecem-se como principal foco das comparações. Estes são compostos por quatro variáveis: temperatura do módulo fotovoltaico, irradiação solar, contaminação do painel fotovoltaico e equipamento de medição instalado no sol ou na sombra (SMA, 2014).

Destes existem dois fatores que possuem características individuais para cada painel instalado: contaminação do painel fotovoltaico e equipamento de medição instalado no sol ou na sombra (SMA, 2014).

Segundo Zakei e Barhdadi (2010), fatores como a intensidade da radiação solar incidente e temperatura ambiente influenciam diretamente no desempenho de uma célula fotovoltaica.

“É sabido que a performance de um Sistema fotovoltaico é fortemente dependente das condições climáticas de onde o sistema está instalado. Os mais importantes parâmetros que influenciam na performance são a Radiação Solar incidente na superfície do módulo fotovoltaico e a temperatura ambiente que afeta na perda destes módulos.” (ZAKEI e BARHDADI, 2010).

Portanto os fatores ambientais que possuem variáveis globais são temperatura do módulo fotovoltaico e irradiação solar, e são esses os critérios que serão explorados para estabelecer as comparações entre as cidades escolhidas.

5.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para estabelecer a metodologia de análise do trabalho inicia-se com a observação da influência da temperatura na geração de energia nos painéis fotovoltaicos, conforme a equação (2) os dados de entrada necessários para obtenção da temperatura de funcionamento da célula FV são:

- Temperatura de utilização da célula FV (TUC): A temperatura de utilização da célula é usualmente 48°C para painéis de silício cristalino (ZAKEI e BARHDADI, 2010) (PV EDUCATION, 2014), e para efeito de comparação este valor é estabelecido e considerado como uma constante.
- Temperatura Ambiente: A temperatura ambiente é considerada como a temperatura média para cada local e período de análise.
- Luminosidade (W/m^2): a luminosidade pode ser encontrada a partir da radiação solar. A radiação solar média possui como unidade (Wh/m^2). Para a obtenção da luminosidade média divide-se este valor pelo tempo de insolação, ou pelo tempo em que o sistema ficou ativo, gerando energia.

Alimentando a equação (2) com os dados mencionados acima é possível estabelecer a temperatura média de operação da célula FV, e desta maneira determinar a perda no rendimento por efeito térmico.

Segundo Carneiro (2009), a variação instantânea da potência máxima fornecida é de - 0,5% para cada grau Centígrado aumentado na temperatura

da célula. Estabelece-se, assim, a perda por efeito térmico, como pode ser observado no Gráfico 10.

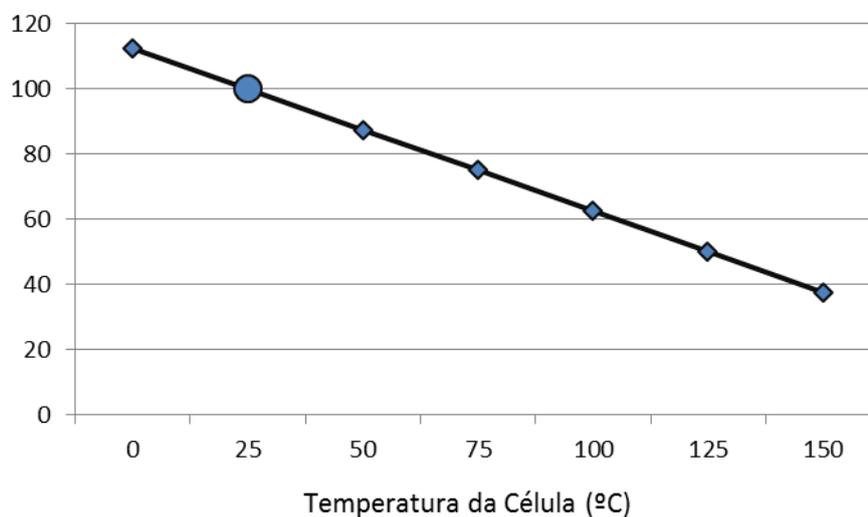


Gráfico 10 - Caso real de perda de rendimento em função da temperatura da célula.
Fonte: Autoria própria.

A influência da radiação solar na potência gerada pelas células FV é mais facilmente percebida e formulada do que a influência da temperatura. Para variação na radiação solar existe uma variação linear, de forma diretamente proporcional, na corrente fornecida pelo painel FV (CECRESB, 2004). O Gráfico 11 exemplifica a relação entre o aumento da radiação solar e o aumento da corrente no módulo.

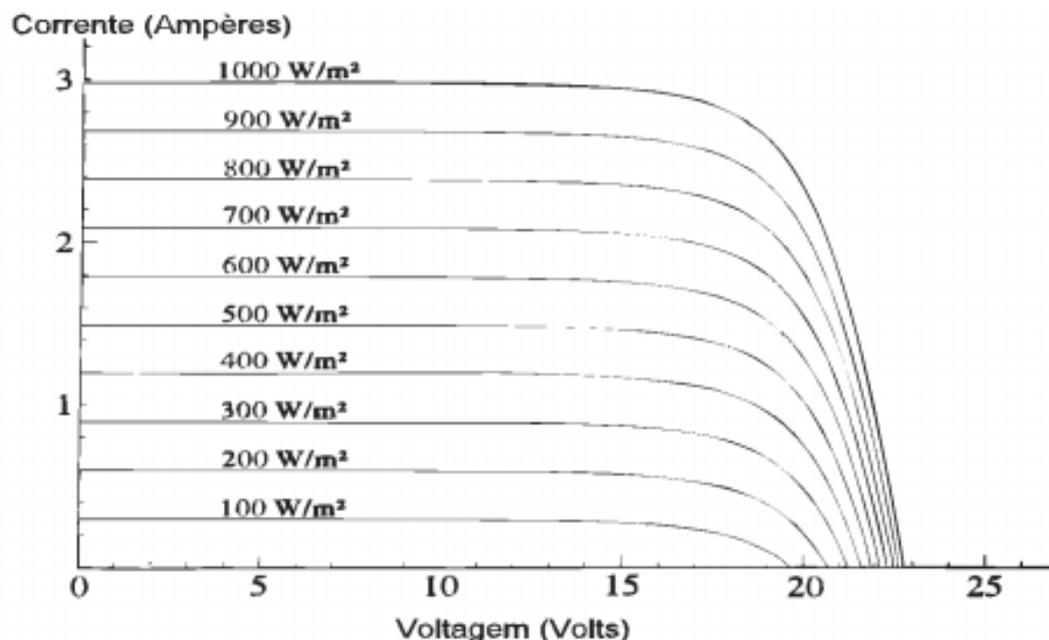


Gráfico 11 - Curvas IxV para variados valores de irradiância solar.
Fonte: CEPEL (2004).

5.3.2. Metodologia para cálculo da diferença da energia gerada em Curitiba e Munique

Para definição da metodologia deste capítulo, pressupõem-se mais uma vez que a temperatura e a irradiação global são os fatores que influenciam no resultado objetivado, sendo os outros fatores não-ambientais considerados idênticos, tanto nos sistemas FV de Munique quanto nos de Curitiba.

De acordo com Carneiro (2009), sabe-se que a energia ideal produzida em um dia por um sistema FV, é dada pela equação (4).

$$E_{ideal}^{dia} = \Delta t \cdot P_{max}(G, T) \quad (4)$$

Onde Δt corresponde ao intervalo de tempo considerado e $P_{max}(G, T)$ representa a potência máxima do módulo em função da radiação solar incidente e da temperatura do módulo, no intervalo de tempo considerado. Agora, explicitando-se a equação (5) de P_{max} , tem-se:

$$P_{max} = \eta AG \quad (5)$$

A variação instantânea do rendimento em função da temperatura, neste caso, é dado pela Equação (6).

$$\frac{d\eta}{dT} = -0,5\% / ^\circ C \quad (6)$$

É representado pelas seguintes equações (7) e (8), respectivamente:

$$\eta(T) = \eta^r (1 - 0,005 \cdot (T - 25^\circ C)) \quad (7)$$

$$K_T = (1 - 0,005 \cdot (T_{cel} - 25)) \quad (8)$$

Onde T é a temperatura da célula e η^r representa o rendimento do módulo nas condições padrão de teste. Considerando-se K_T como o fator de correção da temperatura, observa-se, então, a equação (9).

$$P_{max} = \eta^r K_T \cdot A \cdot G \quad (9)$$

Desta maneira, desconsidera-se o impacto da variação da temperatura no rendimento global do sistema n , pois este agora está sendo representado pela variável K_T .

Isolando-se η^r na equação (5), substituindo o mesmo na equação (9), e, em seguida, substituindo-se esta na equação (4), obtém-se a equação (10).

$$E_{ideal}^{dia} = K_T \cdot \left(\frac{\Delta t \cdot G}{G^r} \right) \cdot P_{max}^r \quad (10)$$

Considera-se, ainda, que $(\Delta t \cdot G)$ representa a energia da radiação global incidente E (Wh/m²/dia). Portanto a equação (11) pode ser reescrita da seguinte forma.

$$E_{ideal}^{dia} = K_T \cdot \left(\frac{E}{Gr}\right) P_{max}^r \quad (11)$$

Pode-se escrever, portanto, que a diferença de energia gerada em Curitiba e em Munique, é dada pela equação (12).

$$\Delta E_{ideal}^{dia} = E_{idealcur}^{dia} - E_{idealmun}^{dia} = K_{Tcur} \cdot \frac{E_{cur}}{Gr} P_{max}^r - K_{Tmun} \cdot \frac{E_{mun}}{Gr} P_{max}^r \quad (12)$$

Simplificando, obtém-se a equação (13).

$$\Delta E = (K_{Tcur} E_{cur} - K_{Tmun} E_{mun}) \cdot \frac{P_{max}^r}{Gr} \quad (13)$$

Finalmente, para efetuar o cálculo da energia total real gerada durante o ano, usa-se a equação (14).

$$E_{ano}^{real} = PR \cdot \left[\sum_{i=1}^{12} K_{T,i} \cdot x \left(n_i \cdot \frac{E}{Gr} \right) \right] \cdot P_{max}^r \quad (14)$$

Neste caso, considera-se a influência da temperatura e da irradiância um fator externo ao PR, pois os mesmos já estão inseridos no somatório da equação. A mesma faz o somatório de mês a mês, multiplicando o coeficiente K_T , pelo número de dias de cada mês – n_i - assim como a irradiância global média diária E .

5.4. DADOS DE ENTRADA

Neste item referenciam-se todos dados de entrada para a alimentação das fórmulas necessárias neste trabalho. Conforme Zakei e Barhdadi (2010), não é uma tarefa trivial a obtenção dos dados climáticos para uma análise

100% real de uma instalação fotovoltaica, portanto é muito difícil detalhar a performance destes sistemas.

Como existe uma variação muito grande nos dados de entrada para cada estação do ano, foram escolhidos os dados de 4 meses para representar, respectivamente, a variação que ocorre para cada estação do ano. A Tabela 11 demonstra os meses escolhidos pela estação do ano.

Tabela 11 – Escolha dos meses representativos para cada estação do ano

Estação do Ano	Mês	
	Curitiba	Munique
Verão	Janeiro	Julho
Outono	Abril	Outubro
Inverno	Julho	Janeiro
Primavera	Outubro	Abril

Fonte: Autoria própria baseada nas estações do ano em cada cidade e meses.

Curitiba localiza-se no hemisfério sul do planeta, com o verão em Janeiro e inverno em Julho. Ao contrário, Munique está localizada no hemisfério norte, onde as estações do ano são sempre inversas às estações do hemisfério Sul.

5.4.1. Temperatura Média

A temperatura média no local analisado influencia na temperatura de operação da célula FV. Para Curitiba e Munique os valores encontrados para os meses previamente escolhidos estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 - Temperatura média nos meses escolhidos

	Janeiro (°C)	Abril (°C)	Julho (°C)	Novembro (°C)
Munique	-1,00	7,00	17,00	8,00
Curitiba	24,50	17,50	12,90	16,50

Fonte: Adaptado de Weatherbase e Muenchen.de(2014).

Observa-se claramente que a temperatura média em Munique é sensivelmente menor que em Curitiba. Comparando-se a temperatura média mensal, conforme as estações do ano que as representam, chega-se a uma diferença de aproximadamente 10° Celsius. A Tabela 13 mostra a diferença de temperatura pelas estações do ano.

Tabela 13 - Diferença de temperatura média para cada estação do ano

	Verão (°C)	Outono (°C)	Inverno (°C)	Primavera (°C)
Munique	17,00	8,00	-1,00	7,00
Curitiba	24,50	17,50	12,90	16,50
Dif. de Temp.	7,50	9,50	13,90	9,50

Fonte: Baseado em Weatherbase e Muenchen.de(2014)

5.4.2. Horas de Radiação

O número de horas de radiação é uma variável intermediária, necessária para a obtenção dos valores de luminosidade média. Ele é também um fator importantíssimo de análise por apresentar o tempo em que as células fotovoltaicas permanecem produzindo energia elétrica.

A Figura 36 apresenta o número de horas de radiação para os meses escolhidos para o estudo em Curitiba.

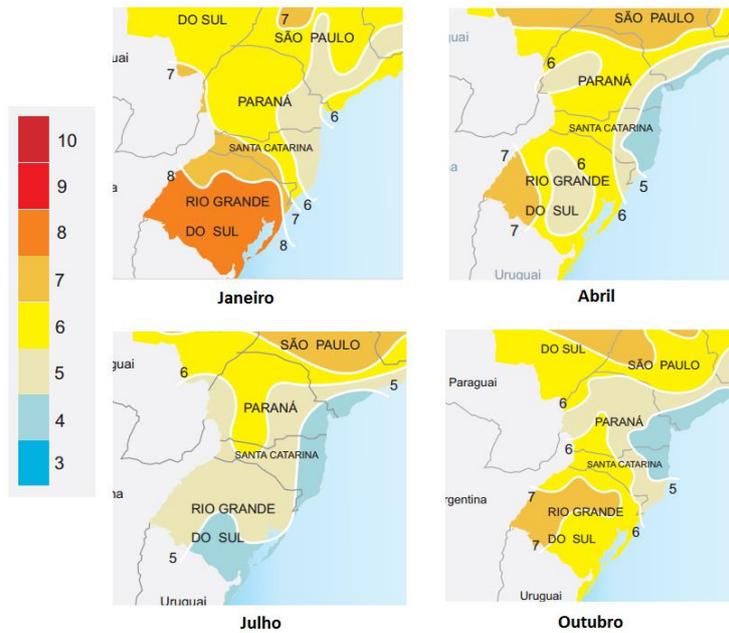


Figura 36 – Número de horas médias de radiação para os meses escolhidos.
 Fonte: Adaptado de CRECESB (2000).

Da mesma maneira, a Figura 37 apresenta o número de horas de insolação para os meses anteriormente escolhidos para a cidade de Munique.

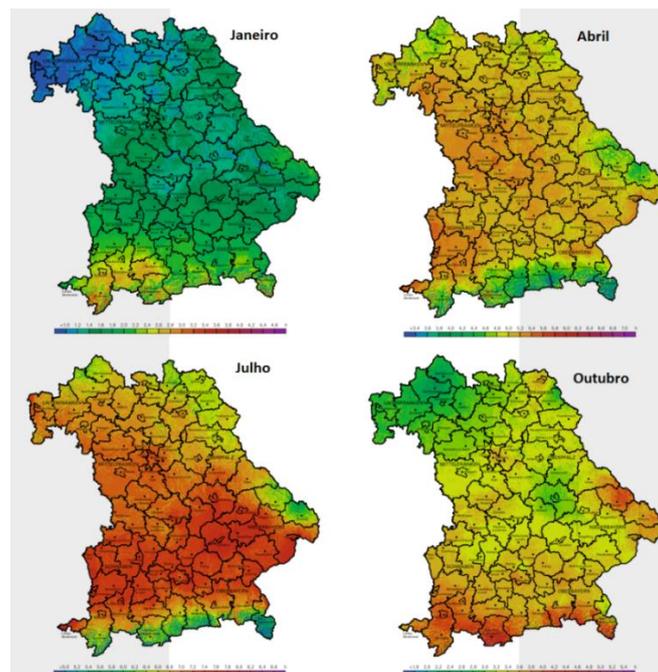


Figura 37 – horas medias de radiação nos meses analisados
 Fonte: Adaptado de Bayerishes Solar-Atlas (2014).

Estes valores foram transcritos para uma tabela de forma que facilite a percepção das diferenças entre Curitiba e Munique. A Tabela 14 demonstra a quantidade de horas de radiação que Curitiba e Munique possuem conforme a estação do ano e a diferença entre elas.

Tabela 14 – Quantidade de horas médias de radiação para cada mês escolhido

	Verão (h)	Outono (h)	Inverno (h)	Primavera (h)
Munique	7,00	3,50	2,00	5,00
Curitiba	5,00	5,00	4,00	4,00
Dif. de Horas	-2,00	1,50	2,00	-1,00

Fonte: Baseado em Bayerishes Solar-Atlas e CRECESB (2000).

Para Curitiba, a variação do número de horas de radiação é muito menor que em Munique. Do verão para o inverno em Curitiba percebe-se uma hora de diferença apenas, já para Munique este valor é muito maior, chegando a cinco horas de variação.

5.4.3. Radiação Solar

A radiação solar é de fato o fator mais relevante quando analisa-se a energia fotovoltaica gerada, uma vez que estas variam de forma diretamente proporcional. A Figura 38 apresenta a radiação solar média para a região de Curitiba.

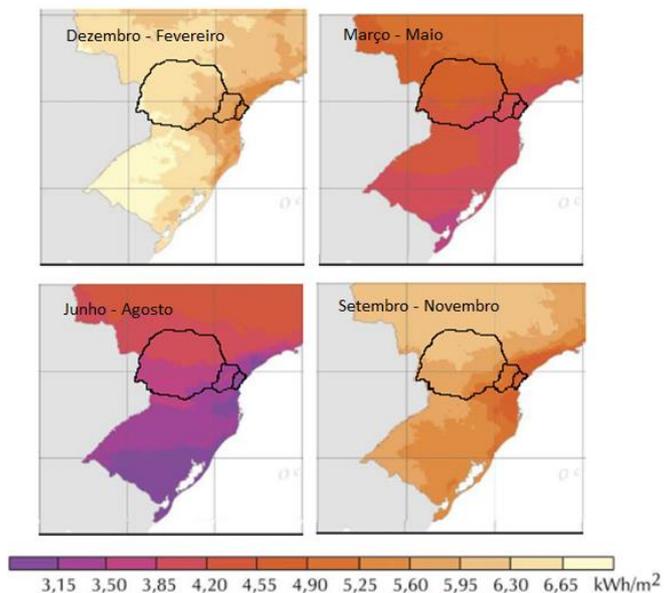


Figura 38 - Incidência da radiação solar média para cada estação do ano
 Fonte: adaptado de Pereira et al. (2006).

Da mesma maneira a **Figura 39** mostra a radiação solar para a região de Munique.

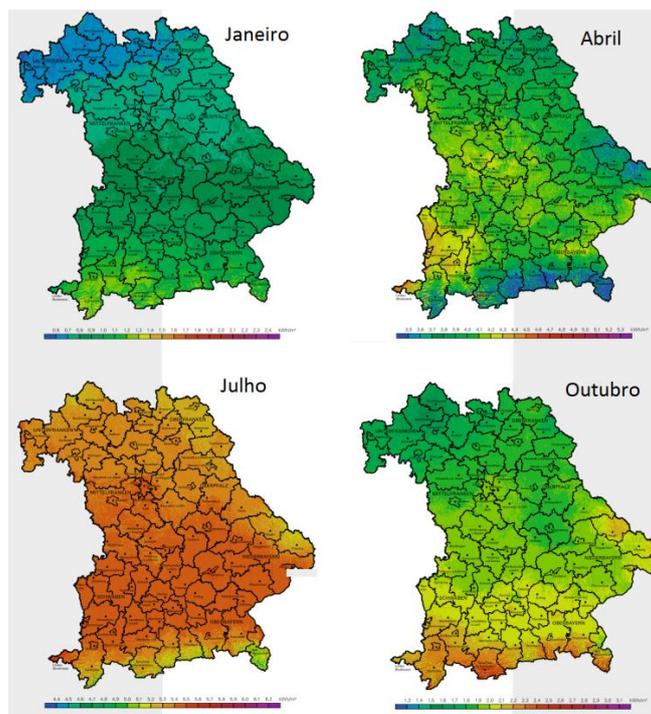


Figura 39 - Irradiação médias nos meses analisados para Munique
 Fonte: adaptado de Bayerishes Solar-Atlas (2014).

Como Curitiba está mais próxima da linha do Equador que Munique, esta apresenta uma variação na radiação média muitíssimo menor. A Tabela 15 apresenta os dados obtidos para Curitiba e Munique conforme as estações do ano.

Tabela 15 – Irradiação média de acordo com as estações do ano

	Verão (W.h/m ²)	Outono (W.h/m ²)	Inverno (W.h/m ²)	Primavera (W.h/m ²)
Munique	5500,00	2000,00	1000,00	3900,00
Curitiba	5600,00	3850,00	3500,00	4900,00

Fonte: Baseado em Bayerishes Solar-Atlas e Pereira .at.

5.5. INFLUENCIA DA TEMPERATURA NA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A influência da temperatura no rendimento de uma célula fotovoltaica pode ser visualizada a partir do Gráfico 10. Conforme ABNT (2006) o rendimento de um painel fotovoltaico é aferido a 25°C, portanto para cada grau Celsius acima do valor aferido pela norma existe uma perda de 0,5% no rendimento e para cada grau Celsius abaixo obtém-se um ganho de 0,5% no rendimento do painel.

Alimenta-se a equação (2) com os dados de entrada mencionados anteriormente e obtém-se os valores demonstrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Temperatura média da célula fotovoltaica em cada estação do ano

	Verão (°C)	Outono (°C)	Inverno (°C)	Primavera (°C)
Munique	65,98	56,71	47,63	55,98
Curitiba	73,90	66,46	61,99	66,03

Fonte: Baseado na ABNT (2006)

Atenta-se para o fato da equação (2) ter sido alimentada com luminosidade média e temperatura média, refletindo desta maneira a temperatura média das células fotovoltaicas para cada cidade.

Com a temperatura média de funcionamento da célula definida pode-se calcular os ganhos e perdas no rendimento. A Tabela 17 mostra a diferença no rendimento afetado pela temperatura de operação da célula para cada estação do ano em Curitiba e em Munique.

Tabela 17 - Perda no rendimento da célula em cada estação do ano.

	Verão (%)	Outono (%)	Inverno (%)	Primavera (%)
Munique	20,49	15,86	11,31	15,49
Curitiba	24,45	20,73	18,50	20,52

Fonte: Bbaseado em Bayerishes Solar-Atlas e Pereira. at

Um exemplo de aplicação desta tabela pode ser citado. Supondo que um sistema fotovoltaico instalado em Munique tenha um rendimento global de 20%, no verão, este mesmo sistema, perderia aproximadamente 10% de seu rendimento, ficando com 18% de rendimento global. Este mesmo sistema, se instalado em Curitiba, teria, na mesma estação, uma perda de aproximadamente 20% em seu rendimento, totalizando um rendimento global final de 16%.

Sabendo-se que Curitiba possui temperaturas médias para cada estação do ano maior que as temperaturas médias em Munique, é coerente que as perdas no rendimento por efeito térmico sejam maiores em Curitiba.

5.6. INFLUENCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A radiação solar é o fator mais importante para considerar-se no estudo. Conforme citado anteriormente, a potência fornecida pelos sistemas fotovoltaicos é diretamente proporcional à radiação solar. Desta maneira utilizou-se a Tabela 15 que divide a radiação solar segundo as estações do ano.

A principal constatação é a variação da radiação solar nas duas cidades. Durante o verão esta variável é praticamente igual para ambas as cidades, porém no inverno a radiação solar decresceu para aproximadamente 18% em Munique e para Curitiba este valor ficou em 60% do valor máximo valor médio, encontrado sempre no verão.

Como a variação na radiação solar é diretamente proporcional à potência máxima fornecida pode-se afirmar que no inverno Curitiba perde 40% da geração fotovoltaica máxima em relação ao verão, enquanto Munique tem este valor reduzido em 82%.

Conforme Cabral (2009) a região mais ensolarada da Alemanha recebe um índice de radiação solar 40% menor que o índice da região menos ensolarada do Brasil, em médias anuais. Em médias anuais pode-se afirmar que Curitiba possui uma larga vantagem sobre Munique no que tange a radiação solar.

5.7. INFLUENCIA DA ENERGIA GERADA NA MATRIZ ENERGÉTICA DE CURITIBA 2030

Considerando-se a metodologia proposta no capítulo 5.3.2, pode-se estimar a diferença na energia gerada entre a cidade de Curitiba e de Munique. Primeiramente, calcula-se, através da equação (14), o valor de PR, que será o mesmo para Curitiba e Munique, visto que os fatores não-ambientais apenas serão considerados, e os ambientais entram como outras variáveis.

Em seguida, calcula-se os valores de KT para cada estação do ano, através da equação (8). De posse desses dados, bem como dos dados da Tabela 15 e da Tabela 10, calcula-se a Tabela 18.

Tabela 18 - Cálculo diferença de energia gerada entre Munique 2012 e Curitiba 2030 por estação.

Variável		Verão		Outono		Inverno		Primavera	
		Curitiba	Munique	Curitiba	Munique	Curitiba	Munique	Curitiba	Munique
Temperatura média diária da célula	(°C)	73,90	65,98	66,46	56,71	61,99	47,63	66,03	55,98
KT	-	0,756	0,795	0,793	0,841	0,815	0,887	0,795	0,845
Radiação Global (E)	(Wh/m ²)	5600	5500	3850	2000	3500	1000	4900	3900
Diferença na energia gerada	(MWh)	-519,00		4996,81		7174,93		2185,43	
Energia Ideal Gerada	(MWh)	15442,4	15961,4	11139,2	6142,4	10412,0	3237,1	14215,8	12030,4

Fonte: Baseado em CRECESB, Bayerishes Solar-Atlas e Pereira.

A Tabela 19 - Diferença Global na Energia Gerada - Curitiba 2030 x Munique 2012 traz os dados globais de geração de eletricidade através de fontes FV, somando-se os dados das estações do ano, em Curitiba e em Munique.

Tabela 19 - Diferença Global na Energia Gerada - Curitiba 2030 x Munique 2012

Cidade	Curitiba	Munique
Diferença na energia gerada (MWh)	13838,17	
Energia Ideal gerada no ano (MWh)	51209,47	37371,29
<i>Performance Ratio</i>	0,921	
Energia Real Gerada no ano (MWh)	47170,82	34424,00
Diferença percentual da geração Global Real (%)	37,0	

Fonte: Autoria própria

Outra comparação que pode ser efetuada é relativa a Tabela 20, inserindo os dados de Curitiba 2030, para que se tenha um panorama geral da comparação entre as duas cidades.

Tabela 20 - Comparação Curitiba 2030 - Munique 2012 - Visão Geral

	Munique 2012	Curitiba 2030
Total de equipamentos fotovoltaicos	3063	desconhecido
Potencia fotovoltaica instalada [MWp]	40	40
Produção de eletricidade em 2012 [MWh]	34424	47170,8
Media anual de horas com produção máxima	851	desconhecido
Habitantes	1338308	1.945.302
Área [km ²]	310,7	435,495
Potencia instalada [kWp] por habitante	0,03	0,021
Potencia instalada [kWp] por hectar	1,3	0,918
Produção de eletricidade [kWh] por habitante	25	24,249
Produção de eletricidade [kWh] por hectar	1108	1083,15

Fonte: Aatoria Própria

A Tabela 21 apresenta qual porcentagem na matriz de Curitiba 2030 a geração FV poderia obter, considerando-se os resultados encontrados neste trabalho.

Tabela 21 - Participação da geração FV na matriz energética de Curitiba 2030

CTBA - Cenários	A	B1	B2	C
Demanda	11.499.777	10.022.085	9.352.342	8.725.028
Estimativa Produção FV Curitiba 2030	47170,8	47170,8	47170,8	47170,8
Porcentagem da demande energetica	0,410189012	0,470668745	0,50437443	0,540638055

Fonte: Aatoria Própria

6. RESULTADOS

Este trabalho levou em consideração duas variáveis para estabelecer as comparações do capítulo 5: temperatura e radiação solar. Quanto a esta última, Curitiba possui vantagens sobre Munique, tanto na radiação solar média como no número de horas de insolação.

Quando observam-se, porém, as perdas por efeito térmico no rendimento das células fotovoltaicas, Munique possui vantagem, por possuir temperaturas médias inferiores às encontradas em Curitiba. Entretanto, a perda por efeito térmico pode ser facilmente contornada com a instalação de sistemas de arrefecimento para as células fotovoltaicas, como visto no capítulo 2. Ao contrário da radiação solar, que não pode ser manipulada.

O Brasil possui poucas políticas voltadas à utilização de energia fotovoltaica, e as que existem são pouco expressivas frente a outros energéticos, principalmente na divulgação e incentivo ao seu uso e na instalação e desenvolvimento de indústrias do setor. Quando observa-se a Alemanha, encontram-se inúmeros projetos nacionais, cascadeados para níveis estaduais, que fomentam a indústria e a geração de energia fotovoltaica, principalmente pela indisponibilidade de geração elétrica a partir de outras fontes renováveis, limpas e silenciosas.

Voltando aos resultados obtidos, se comparada a Munique, Curitiba poderia produzir 44785,72 MWh de eletricidade, abastecendo de forma limpa e sustentável aproximadamente 0,45% da demanda total da cidade em 2030. Essa geração estimada leva em conta que Curitiba possuiria o mesmo potencial instalado que a cidade de Munique possui hoje.

A partir dos dados encontrados nesta primeira comparação, pode-se manipular os mesmos, sempre estabelecendo uma variável como sendo a mesma para ambas as cidades. O que ficará evidente é o maior potencial de geração da cidade de Curitiba, devido a sua localização geográfica, principalmente, que lhe fornece uma quantidade maior de irradiação solar média durante o ano.

Desta maneira mostra-se que Curitiba possui larga vantagem sobre Munique em capacidade de gerar energia fotovoltaica.

É interessante ressaltar que o caráter dos resultados encontrados não condizem necessariamente a realidade de Curitiba e do Brasil daqui há 15 anos. Foi pressuposto e supracitado que as condições não ambientais, que afetam a eficiência da conversão fotovoltaica em eletricidade, foram igualadas entre Curitiba e Munique. Reflexo numérico disso é o *Performance Ratio* igual para as duas cidades, apresentado na Tabela 19. Espera-se, porém, que pesquisa e tecnologia de ponta alavanquem esse cenário, fazendo com que a energia FV se torne cada vez mais viável e atrativa, e que tenha-se um PR cada vez maior, o que viria a favorecer mais ainda o cenário de geração aqui exposto.

7. CONCLUSÃO

A partir da proposta inicial do trabalho, foi possível atingir o objetivo geral do mesmo, bem como os objetivos específicos.

Por meio das pesquisas e do levantamento bibliográfico realizado, ficou evidente que existe uma vasta gama de materiais, de tecnologias de células, de modos de interligação com a rede e de padrões construtivos, sendo que todas essas variáveis impactam no resultado final da energia fotovoltaica gerada. Os fatores que influenciam na eficiência da energia gerada podem ser divididos, em análise macro, em fatores ambientais e não ambientais.

Ao projetar-se o consumo energético de Curitiba para o ano de 2030, algumas premissas foram adotadas, com um claro embasamento teórico, e 4 cenários diferentes foram estabelecidos. Para cada cenário, uma respectiva demanda foi calculada, tendo como base o crescimento econômico e populacional.

Quando iniciou-se a análise da cidade de Munique, foram coletados dados específicos de geração fotovoltaica distribuída, mostrando todo o potencial que existe na cidade, devido, principalmente aos incentivos governamentais que lá existem.

Mesmo não sendo geograficamente favorecida para a produção de eletricidade por tal fonte, Munique desponta como referência mundial para outras cidades que pretendem se destacar no que tange a geração fotovoltaica.

De posse do embasamento teórico, das projeções de demanda de eletricidade para Curitiba em 2030 e dos números atuais de produção de eletricidade por meio de instalações FV em Munique, foi possível executar um estudo comparativo, levando em consideração a padronização de aspectos construtivos, de materiais e de influências não-ambientais nas instalações. Essa premissa de comparação, ao ser adotada para que uma análise mais consistente pudesse ser feita – pois não há como prever com exatidão a diferença entre a qualidade de um inversor na Alemanha e no Brasil no ano de 2030, por exemplo – direcionou o trabalho para a comparação com base em duas variáveis: a irradiação solar média e a temperatura média.

Ficou observado, então, que a temperatura média, por ser mais alta em Curitiba, ocasiona uma perda no rendimento global da geração fotovoltaica considerável.

A respeito da irradiação horizontal média diária, ficou comprovado que a mesma, por ser maior em Curitiba, influencia diretamente na potência máxima gerada por um sistema fotovoltaico. Neste aspecto está a principal vantagem da instalação de células, painéis e módulos fotovoltaicos em Curitiba, quando comparada com Munique, visto que a irradiação solar é o principal fator ambiental que influencia na energia fotovoltaica gerada.

Conclui-se, portanto, que mesmo sendo Curitiba uma das capitais brasileiras com menores índices de irradiação média, ela ainda é atrativa quando comparada a uma cidade que tem expressiva potência fotovoltaica instalada dentro de suas fronteiras.

Foi verificado também que o sucesso da expansão fotovoltaica em Curitiba e no Brasil depende não somente de estudos como este, mas também de incentivos governamentais à utilização de fontes alternativas às convencionais, incentivos à pesquisas em universidades e escolas técnicas, fomento a empresários do ramo, subsídios para o barateamento do custo dessas tecnologias, além da conscientização da população quanto a importância da diversificação da matriz energética nacional.

Sem uma diretriz governamental clara voltada para a geração distribuída, fontes energéticas como a fotovoltaica tem uma grande caminhada tecnológica para percorrer, até que se torne competitiva no mercado nacional, frente as outras fontes renováveis. Daí dá-se a importância da criação de leis de incentivo, subsídios e outras medidas que contribuam para um cenário promissor desta fonte dentro do território nacional.

REFERENCIAS

A COPEL. Disponível em:

<<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F01C009432D735E57032573FA00687CC4>>.

Acessado em 14. Jan. 2014.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Chamada Nº 013/2011 - Projeto Estratégico: Arranjos Técnicos E Comerciais Para Inserção Da Geração Solar Fotovoltaica Na Matriz Energética Brasileira.** ANEEL. Brasília - DF. 2011.

Agência Nacional de Energia Elétrica - **Projetos Cadastrados no P&D Estratégico n. 13/2011.** Disponível em:

< http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/P&D_Est_013-2011-r2.pdf >

Acessado em: 8 Jan. 2014.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 390.** ANEEL. Brasília - DF. 2009.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 482.** ANEEL. Brasília - DF. 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 83.** ANEEL. Brasília - DF. 2004.

ALVARENGA, C. A. Eng., **O módulo fotovoltaico para gerador solar de eletricidade.** Disponível em: < <http://www.solenerg.com.br/files/Modulo-Fotovoltaico-Solenerg.pdf>>. Acessado em 07.Fev.2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira.** São Paulo: ABINEE, 2012.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10899: Energia solar fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.

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

BAYERISCHE STAATSREGIERUNG. Disponível em:

< <http://www.bayern.de/>>. Acessado em 25.Jan.2014.

BENEDITO, R. S.; ZILLES, R. **A expansão da oferta de energia elétrica nos centros urbanos brasileiros por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Revista Brasileira de Energia, Vol. 16, nº 1, 1º Sem. 2010, pp. 7- 19.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. **Erneubare Energien in Zahlen – nationale und international entwicklung**. BMU, Jul. 2013, 112 p.

CARDADOR, M. A. **Seguidor de Potência Máxima para Sistema Fotovoltaico com Conversor Matricial**. 2011. 86p. Dissertação (Mestrado em engenharia eletrotécnica e de computadores) – Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

CARNEIRO, Joaquim. **Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos: Sistemas ligados a rede e sistemas autônomos**.2009. Projeto Interdisciplinar II. – Universidade do Minho, Braga, 2009.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA (BRASIL). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2004 206 p.

Companhia Paranaense de Energia. **COPEL Geração**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F86108AB3CF1D4E5F032574120060B8F0>>. Acessado em 7 Set. 2013

Companhia Paranaense de Energia. **NTC 905100 MANUAL DE ACESSO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL** Curitiba-PR, Dez 2010.

CRESESB. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. 111p. 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acessado em 6.Fev.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: 09 set. 2013.

DEMONTI, R; **PROCESSAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. 2003. 150 p. Tese de Doutorado - Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico – UFSC, Florianópolis, 2003.

ELETROSUL – **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: < <http://www.eletrosul.gov.br/home/conteudo.php?cd=1151>> Acessado em: Fev. 2014.

Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira** Rio de Janeiro: EPE, 2012b. http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Resultados Preliminares**. Rio de Janeiro: EPE, 2012a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acessado em: 8 Mar. 2013.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2013a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acessado em: 8 Mar. 2013.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Final**. Rio de Janeiro: EPE, 2013b. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acessado em: 8 Mar. 2013.

Empresa de Pesquisa Energética. **INFORME À IMPRENSA Plano Nacional de Energia – PNE 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 26 Jun. 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20070626_2.pdf>. Acessado em: 8 Mar. 2013.

Energie-Atlas Bayern 2.0. Disponível em:
< <http://www.energieatlas.bayern.de/>>. Acessado em 25.Jan.2014.

FUSANO, R. H.; **ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR**. 2013. 94 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso superior de Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica - UTFPR, Curitiba, 2013.

German Solar Industry Association. **Statistic data on the German**. BSW-Solar, 2013. Disponível em:
<http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2013_2_BSW-Solar_fact_sheet_solar_power.pdf>Acessado em: Fev. 2014.

GUIMARÃES, R. A.; GONÇALVES, R. C.; **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: análise do panorama mundial e brasileiro.** 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso superior de Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica - UTFPR, Curitiba, 2012.

HINRICHS, Roger; KLEINBACH, Merlin H. **Energia e meio ambiente.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, c2004. xiv, 543 p. ISBN

HISTÓRIA DA ENERGIA NO PARANÁ. Disponível em:

<<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F938F473DCEED50010325740C004A947F>>.

Acesso em 14.Jan.2014.

Influencia da temperatura. Disponível em:

<<http://eee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Temperature.htm>> Acessado em: Fev. 2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:

<<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>> Acessado em: 15 Jan. 2014

International Energy Agency. **Topic: Clean energy technologies.** IEA, 2013.

Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/cleanenergytechnologies/>>.

Acessado em: 13 Mar 2013.

IPARDES, Caderno estatístico de Curitiba. Disponível em:

<<http://www.ipardes.gov.br/>>. Acesso em 14.Jan.2014.

IUCN-UNEP-WWF. **World Conservation Strategy,** 1980. Disponível em:

<<http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/WCS-004.pdf>>. Acessado em 13 Mar 2013.

JUSBRASIL, **População do Paraná deve chegar a 11,9 milhões em 2030, diz IBGE.** Disponível em : <<http://gov-pr.jusbrasil.com.br/noticias/277415/populacao-do-parana-deve-chegar-a-11-9-milhoes-em-2030-diz-ibge>>. Acesso em 14.Jan.2014.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil (Coord.). **Geração distribuída: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais.** Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2006. xv, 240 p. ISBN

LOURENÇO, P. et al. Painéis Fotovoltaicos. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra - Portugal. 2007.

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 Luna de. **Mapeamento dos Recursos de Energia Solar no Brasil.** UFSC, 2006

MEADOWS, Donella H.; MEADOWS, Dennis I.; Randers, Jorgen; BEHRENS, Willian W. **The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind.** New York: Universe Books, 1972. Disponível em: <<http://web.ics.purdue.edu/~wggray/Teaching/His300/Illustrations/Limits-to-Growth.pdf>>. Acessado em: 13 Mar 2013.

MEHTA, S. greentechsolar. **Greentechmedia**, 2011. Disponível em: <<http://www.greentechmedia.com/articles/read/pv-news-annual-data-collection-results-cell-and-module-production-explode-p/>>. Acesso em: 7 Set 2013.

Ministério de Minas e Energia. **Estudo e Propostas de Utilização de Geração Fotovoltaica Conectada á Rede, em Particular em Edificações Urbanas. Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos.** Brasília - DF. 2009.

Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília – DF. Nov. 2007

Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira - Preliminar**. Ministério de Minas e Energia. Brasília - DF. 2011.

MONTENEGRO, A. de A. **AVALIAÇÃO DO RETORNO DO INVESTIMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES URBANAS NO BRASIL**. 2013. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2013.

Munchen.de – das offizielle Stadtportal. Disponível em:
< <http://www.muenchen.de/>>. Acessado em 26.Jan.2014.

PARIDADE DE REDE. Ouro Preto, Ago. 2007. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª. ed. INPE - São José dos Campos, 2006.

PERFIL DE CURITIBA. Disponível em:
<<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174>>.
Acesso em 15.Jan.2014

PINA, J. A. M. de **OPTIMIZAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**. 2013. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2013

PV EDUCATION. Disponível em: < <http://pveducation.org/>>. Acessado em 07.Fev.2014.

ROVERE, E. L. La; VALLE, C. do; PEREIRA, A. **PROJETO “A CARTA DO SOL”:** subsídios para o planejamento da promoção da energia solar fotovoltaica no Brasil. 2011, 58p. Relatório Técnico. Rio de Janeiro-RJ, Ago. 2011.

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.

SALAMONI, I. T.; **METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM ÁREAS URBANAS APLICADA A FLORIANÓPOLIS E BELO HORIZONTE.** 2004. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2004.

SALAMONI, I. T., RÜTHER, R.; **O POTENCIAL BRASILEIRO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA: ANÁLISE DE**

SEMICONDUCTORES – Disponível em: < <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/34/37/> > Acessado em: 08/01/2014.

SANTOS, L. D.; **PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE NO ESTÁDIO DO MARACANÃ .UFRJ .** 2008. 99 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso superior de Engenharia Elétrica - UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

SENAI - FIEP. **Cenários Energéticos Globais 2020.** Curitiba: SENAI – FIEP, 2007, 2ª Ed. Disponível em: <[http://www.fiepr.org.br/observatorios/uploadAddress/Cenarios_Energeticos_Globais\[38511\].pdf](http://www.fiepr.org.br/observatorios/uploadAddress/Cenarios_Energeticos_Globais[38511].pdf)>. Acessado em 13 Mar 2013.

SENAI, Departamento Regional do Paraná. **Curitiba cidade inovadora 2030**. Curitiba: SENAI/PR, 2010.

SOUZA E. D; **ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO DE PAINÉIS EM USINAS FOTOVOLTAICAS ATRAVÉS DE REDES DE SENSORES SEM FIO**. 2013. 93 p. Tese de Mestrado - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica – UFMG, Belo Horizonte, 2013.

TIEPOLO, G. M.; URBANETZ JUNIOR, J.; CANGIOLIERI JUNIOR, O. **INSERÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO PARANÁ: ANÁLISE DO POTENCIAL PRODUTIVO** Revista SODEBRAS, Vol. 8, N° 87, MARÇO/ 2013, pp. 30-37.

TOLMASQUIM M. T., **Fontes renováveis de energia no Brasil**. CENERGIA, COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

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, Florianopolis-SC, 2010.

VARELA Hamilton; HUGUENIN Fritz; MALTA Marcos; TORRESI Roberto M. **Materiais Para Cátodos De Baterias Secundárias De Lítio**. **Quim. Nova**. São Paulo – SP, Vol. 25, No. 2, pg. 287-299, 2002.

ZAKEI Ashraf. S., BARHDADI, Abdelfettah. **Performances assessment of the first grid-connected photovoltaic micro power in Africa: The PVGIS approach**. M.J. Condensed Matter. Trieste, IT, vol. 12, Jul. 2010 Disponível em: < http://www.fsr.ac.ma/MJCM/sup_pdf/pdf_vol12/vol12-art03.pdf>. Acessado em 08.Fev.2014.

Weatherbase – Browse 34773 cities worldwide. Disponível em:

<<http://www.weatherbase.com>> Acessado em: Jan/2014.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.; Sears e Zemansky: Física IV; 10^a edição;
São Paulo: Addison Wesley; São Paulo, 2004.