

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

EIMI VERIDIANE SUZUKI
FERNANDA DUTRA REZENDE

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
PARA AUXILIAR A SUPRIR A DEMANDA CRESCENTE DE
ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2013

EIMI VERIDIANE SUZUKI
FERNANDA DUTRA REZENDE

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
PARA AUXILIAR A SUPRIR A DEMANDA CRESCENTE DE
ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Eficiência Energética, do curso de Especialização em Eficiência Energética, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Jair Urbanetz Junior, Dr. Eng.

CURITIBA
2013

**EIMI VERIDIANE SUZUKI
FERNANDA DUTRA REZENDE**

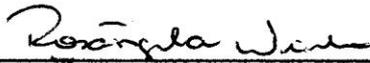
**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA
AUXILIAR A SUPRIR A DEMANDA CRESCENTE DE ENERGIA
ELÉTRICA NO BRASIL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de **Especialista em Eficiência Energética**, do Curso de Especialização em Eficiência Energética do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**.

Curitiba, 30 de setembro de 2013.



Prof. Luiz Amilton Peplow, M. Eng..
Coordenador de Curso de Especialização em Eficiência Energética
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica



Profª Rosângela Winter, M. Eng.
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA



Profª Maria de Fátima R. R. Cabreira, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



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



Profª Márcia Keiko Ono Adriaazola, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



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

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Deus por nos permitir finalizar o presente trabalho.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr. pela disponibilidade, pela preciosa orientação objetiva e com a visão mais profunda que sempre levou a reflexões com horizontes mais abrangentes.

À nossa família, pelas ausências seguidas, seja escrevendo, lendo, estudando, em reuniões e pela torcida que não nos deixou desanimar.

RESUMO

O Ministério de Minas e Energia do Brasil prevê que o consumo de energia elétrica, no ano de 2030, ficará entre 950 a 1.250 TWh/ano. Se for aproveitado 80% do potencial hidráulico brasileiro isso ainda não será suficiente para atender esta demanda. A energia solar fotovoltaica pode ser uma boa opção para complementar a produção de energia elétrica nos próximos anos visando o cenário para 2030, este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade desta opção, pois este tipo de energia é considerada renovável, limpa e o Brasil tem uma ótima média anual de irradiação solar para ser aproveitada para a produção de energia elétrica. Atualmente a produção de energia elétrica a partir da fonte solar no Brasil representa menos de 0,01% do total de energia elétrica produzida. Neste trabalho será calculada a área necessária de painéis fotovoltaicos para atender a projeção do consumo de energia elétrica, estabelecendo-se determinados cenários, entre eles, 10% do crescimento do consumo para 2030. Na sequência, foi avaliada a viabilidade de implementação da área de painéis obtida. Conclui-se que é tecnicamente viável utilizar-se da energia solar fotovoltaica conectada à rede para complementar a produção de energia elétrica nacional no atendimento ao consumo projetado pelo Ministério de Minas e Energia para o ano de 2030.

Palavra-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Previsão de Demanda de Energia Elétrica.

ABSTRACT

According to Brazilian Ministry of Mines and Energy (MME) the energy electric power consumption shall be between 950 and 1250 TWh/year in the year of 2030. Even 80% of the Brazilian hydraulic potential takes place it will not be enough to such demand. Solar photovoltaic energy can be a good choice to increase electricity generation in 2030, the objective of this paper is to verify the feasibility of this option as solar energy is considered renewable, clean and the Brazilian annual solar irradiation average is high. Nowadays the electricity generated using solar energy source in Brazil represents less than 0.01% of the total electricity produced. This paper will calculate the area of photovoltaic panels which is required to attend the predicted electricity consumption by establishing some scenarios, among them, 10% of consumption growth for 2030. In the next step, the feasibility of implementing the calculated panel's area was evaluated. It was concluded that is technically feasible of the use of solar photovoltaic grid-connected to complement the national production of electricity that the MME projected to the year 2030.

Keyword: Solar Photovoltaic Energy, Demand Forecasting Electricity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Irradiância Solar no plano horizontal para dias claros, medidos na cidade de Curitiba.....	15
Figura 2 - Modelo ilustrativo de uma célula fotovoltaica de telureto de cádmio.....	26
Figura 3 - Composição estrutural de uma célula fotovoltaica de disseleneto de cobre e índio	26
Figura 4 - Curva I x V de uma célula fotovoltaica	27
Figura 5 - Curva P x V de uma célula fotovoltaica	27
Figura 6 - Célula, módulo e painel fotovoltaico.....	28
Figura 7- Módulos Fotovoltaicos de (a) silício policristalino, (b) silício monocristalino, (c) silício amorfo, (d) filme fino, (e) disseleneto de cobre-índio.....	29
Figura 8 - Constituição Básico de um sistema fotovoltaico autônomo isolado	30
Figura 9 - Constituição Básica do sistema fotovoltaico conectado à rede	31
Figura 10- Evolução global anual de instalações de sistemas solares fotovoltaicas 2000 - 2012(MWp).....	33
Figura 11 - Evolução global acumulado da capacidade instalada de energia fotovoltaica 2012 (MWp).....	33
Figura 12 - Divisão do mercado europeu de energia fotovoltaica adicionada no ano de 2012 (MWp,%).....	34
Figura 13 Capacidade instalada de energia fotovoltaica 2012 (MW,%).....	34
Figura 14 - Oferta de potência de geração elétrica (%).....	36
Figura 15 - Aproveitamento do potencial hidrelétrico brasileiro, por região (%).....	36
Figura 16 - Painel fotovoltaico e inversor instalados no escritório verde da UTFPR.	37
Figura 17 - Potencial anual médio de energia solar para cada região do Brasil.....	39
Figura 18 - Mapa brasileiro da média anual da radiação solar no plano inclinado.	40
Figura 19 - Distribuição do desempenho global de 334 sistemas fotovoltaicos (1.142 conjuntos de séries anuais) em 14 países em dois períodos diferentes de instalação.....	41
Figura 20- Localização de Curitiba no Estado do Paraná e porcentagem (49,5%) da área equivalente à necessária para o 1º cenário.....	43
Figura 21 - Localização de Curitiba no Estado do Paraná e porcentagem (82,4%) da área equivalente à necessária para o 2º cenário.....	45
Figura 22 - Área de painéis necessária para o 3º cenário	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Capacidade de Geração do Brasil.....	35
Tabela 2 - Relação entre demandas e áreas	46
Tabela 3 - Área inundada e capacidade instalada de algumas usinas brasileiras	47
Tabela 4- Porcentagens de ocupação do solo para catorze locais de Curitiba	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	área útil do painel
a-Si	silício amorfo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
c-Si	silício cristalino
C	carbono
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
CdTe	telureto de cádmio
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CuInSe ₂	disseleneto de cobre e índio
E	energia gerada pelo sistema fotovoltaico
E _{FF}	eficiência da tecnologia do módulo
EPIA	Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica
FV	fotovoltaico
G	irradiância nas condições padrão para ensaio
GaAs	arseneto de gálio
GEE	gás de efeito estufa
H _{TOT}	irradiação diária
I	corrente
I _{Mcélula}	corrente de máxima potência
I _{Scélula}	corrente de curto-circuito
I	irradiância medida
I _{dif}	irradiância difusa
I _{dir}	irradiância solar direta
mc-Si	silício monocristalino
MME	Ministério de Minas e Energia
MtCO ₂	Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
pc-Si	silício policristalino
P	potência
P _{Mcélula}	potência máxima
PMP _{célula}	ponto de máxima potência
PNE	Plano Nacional de Energia
P _{FV}	potência fotovoltaica instalada
PR	<i>performance ratio</i>
Si	silício
SiO ₂	dióxido de silício
SIN	Sistema Interligado Nacional
V	tensão
V _{Mcélula}	tensão de máxima potência
V _{OCcélula}	tensão de circuito aberto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.3	JUSTIFICATIVA	10
1.4	DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.5	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	11
1.6	MÉTODO DE PESQUISA	11
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	FATORES CLIMÁTICOS.....	13
2.1.1	Radiação solar.....	13
2.1.2	Irradiância e irradiação.....	14
2.2	FONTES DE ENERGIA	16
2.2.1	Fontes de energia não renováveis.....	16
2.2.1.1	Nuclear	16
2.2.1.2	Fósseis	17
2.2.2	Fontes de energia renováveis.....	18
2.2.2.1	Hidráulica	18
2.2.2.2	Biomassa	19
2.2.2.3	Eólica.....	20
2.2.2.4	Solar.....	21
2.3	TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS	22
2.3.1	Efeito fotovoltaico.....	22
2.3.2	Célula Fotovoltaica.....	23
2.3.3	Módulo Fotovoltaico.....	27
2.4	CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	29

2.4.1	Sistemas fotovoltaicos isolados	29
2.4.2	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.....	30
2.4.2.1	Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica	31
2.5	SITUAÇÃO MUNDIAL E SITUAÇÃO BRASILEIRA ATUAL DA ENERGIA FOTVOLTAICA	32
2.5.1	Relatório da necessidade de energia até 2030 no Brasil.....	35
2.5.2	Experiência do Escritório Verde.....	37
3	CENÁRIOS PARA A GERAÇÃO FOTVOLTAICA	38
3.1	PREMISSAS ADOTADAS PARA OS CÁLCULOS	38
3.2	CÁLCULOS.....	42
3.2.1	1º Cenário.....	42
3.2.2	2º Cenário.....	44
3.2.3	3º Cenário.....	45
3.3	RESUMO DOS RESULTADOS	46
3.4	ANÁLISES.....	47
3.4.1	Comparação com hidrelétricas	47
3.4.2	Uso e ocupação do solo <i>versus</i> área para o sistema fotovoltaico	48
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O Ministério de Minas e Energia do Brasil calcula que para o ano de 2030, haverá no Brasil um consumo de energia elétrica entre 950 a 1.250 TWh/ano. Mesmo chegando a um aproveitamento de 80% do potencial hidráulico brasileiro ainda não será suficiente para atender esta demanda. A energia solar fotovoltaica, implantada gradativamente, pode ser uma boa opção para complementar essa demanda por energia elétrica.

Quase todas as atividades humanas (desde o crescimento populacional até o consumo de materiais e o desenvolvimento das cidades) podem ser representadas quantitativamente por curvas exponenciais crescentes no tempo. Assim também, pode-se representar o consumo de diversos recursos, ou a emissão de rejeitos, por curvas semelhantes. De acordo com as conclusões deste estudo, conhecido como "Relatório do Clube de Roma", se estas tendências não forem revertidas provavelmente ocorrerá em breve um declínio súbito e incontrolável da qualidade de vida da humanidade, causando um colapso em nossa civilização, e o quanto antes forem implantadas medidas corretivas desta rota catastrófica, maiores serão as possibilidades de reverter esta perspectiva (RIBEIRO, 2003).

Esta constatação leva à reflexão sobre a importância da reformulação dos padrões de intervenção humana no meio natural, preocupando-se não apenas em deste extrair o sustento ao sistema econômico, mas também estabelecendo formas de garantir a continuidade deste sustento (RIBEIRO, 2003).

Todas as estruturas desenvolvidas pelo homem (cidades, agricultura, indústrias, etc.) têm o objetivo de, a partir de bens naturais, fornecer satisfação de suas necessidades, que há muito já ultrapassam as biologicamente determinadas. No entanto este processo de conversão de recursos naturais em satisfação de necessidades traz consigo, consequências indesejáveis, como a exaustão de recursos não renováveis, a geração de resíduos e a degradação da qualidade ambiental (RIBEIRO, 2003).

Os principais motivos deste crescimento dos impactos são o crescimento populacional, o aumento do consumo *per capita* de bens e serviços e o aumento da complexidade dos sistemas produtivos. Desta forma, pode-se dizer que, para satisfazer suas necessidades a sociedade demanda bens e serviços, que para serem ofertados provocam impactos ambientais. Surge desta percepção a noção, relativamente nova, embora bastante

evidente, de que a origem última dos impactos ambientais encontra-se no consumo de bens e serviços (RIBEIRO, 2003).

A energia é um insumo fundamental para o atendimento das necessidades humanas básicas, tais como alimentação, abastecimento de água, iluminação, serviços de saúde, comunicação e educação. Com o desenvolvimento das atividades humanas e do sistema econômico mundial, a demanda por energia é crescente e correlacionada ao desenvolvimento humano. Desta forma, ingressando em uma nova etapa energética integrada a um novo sistema capitalista (BORGES, 2007).

O Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 é o primeiro estudo de longo prazo orientado para o exame integrado do uso dos recursos energéticos realizado no âmbito do governo brasileiro. Para os valores previstos de consumo de energia no ano de 2030, o PNE 2030 contempla grandes investimentos em energia hidrelétrica e promove algumas fontes alternativas, mas também prevê um aumento da dependência de combustíveis fósseis de 10% para 14% da matriz de geração elétrica. Como consequência, o PNE 2030 prevê uma triplicação das emissões do setor no período, passando de 30 MtCO₂ e para 90 MtCO₂ em 2030 (HASHIMURA, 2012).

Nesse cenário de aumento da dependência de fontes fósseis e elevação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), torna-se oportuno avaliar o potencial de uma maior penetração das fontes alternativas na capacidade instalada do país, de modo a contribuir com uma expansão menos intensiva em carbono e, conseqüentemente, manter a característica de destaque do setor elétrico brasileiro (HASHIMURA, 2012).

Com altos índices de irradiação em todo o Brasil, o país possui grande potencial de uso da energia solar. Índices estes, claramente superiores aos de países líderes no setor fotovoltaico, como Alemanha e Itália. Porém, a potência instalada acumulada de sistemas de fonte solar no país ainda é pequena, principalmente se comparada à mundial.

Apesar das condições favoráveis, estudos oficiais do governo brasileiro não consideraram o uso da energia solar fotovoltaica nos planos de expansão do setor elétrico. Segundo o PNE 2030, o aproveitamento da energia solar fotovoltaica integrado à rede será marginal no horizonte analisado pelo estudo (2005-2030) (HASHIMURA, 2012).

O presente trabalho propõe-se a contribuir para uma mudança de olhar dos legisladores e planejadores do Setor Elétrico brasileiro, mostrando o grande potencial de

utilização da energia solar fotovoltaica como forma complementar de fornecimento de eletricidade, sendo uma fonte que se demonstra limpa e inesgotável.

1.1 OBJETIVO

estudar se a inserção da fonte solar fotovoltaica na matriz energética brasileira é uma alternativa viável para complementar a demanda crescente por energia elétrica no Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Fazer uma revisão de literatura sobre geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica, os conceitos básicos e fenômenos elementares inerentes à energia solar fotovoltaica foram pesquisados em publicações na literatura.
- b) Propor cenários para a geração fotovoltaica no Brasil a partir dos valores de demanda estimados pelo Ministério de Minas e Energia – Brasil, e um cenário com o consumo atual de energia. Tendo por base os cenários propostos, realizar os cálculos das áreas necessárias para painéis fotovoltaicos e verificar se a área calculada é factível à implantação dos sistemas fotovoltaicos em larga escala.
- c) Comparar entre as áreas calculadas com as áreas construídas e com área do território brasileiro baseada em informações publicadas na publicações na literatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização da energia solar para gerar energia elétrica pode contribuir na solução dos desafios enfrentados pelos atuais sistemas energéticos no que diz respeito à mitigação das mudanças climáticas e na proteção ambiental de uma maneira geral. Pode estimular a inovação tecnológica, a criação de mercados e a criação de empregos, gerando crescimento econômico. Pode ainda aumentar a segurança na oferta de energia por meio da diversificação e reduzir a pobreza por meio de um melhor acesso à energia. Além de evitar danos piores à saúde pública por meio da redução da poluição do ar local.

Além disso, existirá a diminuição dos efeitos colaterais negativos advindos de redução drástica na emissão de GEE. Se o custo social fosse levado em consideração no custo da energia convencional, principalmente no custo da energia termoelétrica, a energia solar

fotovoltaica apresentaria vantagens. Hashimura (2008) conclui que para substituir a energia elétrica gerada pelas térmicas a carvão mineral instaladas por geração solar fotovoltaica, inicialmente haveria custo inicial alto, porém o custo da expansão é significativamente menor.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho foi conduzido com base nos seguintes tópicos:

- Levantamento da energia elétrica necessária para o atendimento projetado pelo Ministério de Minas e Energia (2013);
- Pesquisa dos valores de fluxos de radiação solar na superfície do Brasil;
- Método de cálculo de área dos painéis fotovoltaicos.

1.5 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os estudos oficiais do governo brasileiro (PNE 2030) não consideraram o uso da energia solar fotovoltaica nos planos de expansão do setor elétrico. É uma tendência mundial o aumento da participação das fontes renováveis como elemento primário na geração de energia elétrica. Contudo, o custo elevado da implantação de sistemas baseados em fontes renováveis em comparação aos sistemas tradicionais ainda é um fator que dificulta a participação efetiva dessas fontes na matriz energética.

Pressupondo o atendimento da demanda de energia prevista para os próximos anos com sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica surge a questão da área necessária para instalação dos painéis fotovoltaicos e com a avaliação desta necessidade suas consequências para a sua implantação.

1.6 MÉTODO DE PESQUISA

Para o levantamento de informações a respeito dos conceitos básicos e fenômenos elementares inerentes à energia solar fotovoltaica, foram pesquisadas publicações na literatura.

Na determinação dos cenários, foram estabelecidas premissas fundamentadas em dados apresentados pelo MME. Para os cálculos do dimensionamento das áreas dos painéis

fotovoltaicos, tanto a formulação como os valores para as variáveis envolvidas, foram baseados em dados consolidados na literatura existente.

A análise comparativa dos dados obtidos com dados referentes ao uso e ocupação do solo também se basearam em estudos existentes e publicados.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro traz a introdução geral, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, a delimitação do tema, a definição do problema, o método de pesquisa e, por fim, a estrutura do trabalho.

O capítulo dois consiste de uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos a serem utilizados ao longo do trabalho, compreendendo a descrição de diversas fontes de energia, a natureza da radiação solar, os conceitos e fenômenos elementares, inerentes à radiação solar e ao funcionamento das células fotovoltaicas, principais características da célula e dos módulos fotovoltaicos e as diferentes aplicações desses sistemas. Neste mesmo capítulo são apresentados, também, a formulação para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e o resumo da experiência de um sistema implantado no Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Além disto, há uma breve descrição da situação mundial e da brasileira em relação à geração de energia elétrica a partir da fotovoltaica. Essa revisão será feita visando fornecer subsídios para as análises a serem realizadas nos capítulos 3 e 4.

No terceiro capítulo, são propostos três cenários que irão considerar a previsão do MME de que, o consumo de energia elétrica atingirá valores entre 950 TWh e 1.250 TWh e o consumo atual de energia ocorrido em 2012. Inicialmente, são realizados os cálculos de área para instalação dos painéis fotovoltaicos. Em seguida, os resultados obtidos são comparados a dados de estudos referentes ao uso e ocupação do solo, entre eles, áreas construídas no Brasil e áreas alagadas em função da implantação de algumas hidrelétricas brasileiras.

No último capítulo, são explicitadas discussões e considerações sobre os resultados obtidos e sobre a geração elétrica fotovoltaica. São apresentados os principais pontos relacionados à geração fotovoltaica sob a perspectiva de área ocupada pelos painéis fotovoltaicos e também com relação às suas características favoráveis, quanto ao meio ambiente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FATORES CLIMÁTICOS

2.1.1 Radiação solar

A maior parte da vida deste planeta está diretamente ligada à existência do Sol, pois ela depende da luz e da energia solar, a radiação solar. Sendo esta energia obtida de forma gratuita, deve-se tirar o máximo de vantagem desse recurso que não é poluente, com o objetivo de complementar a atual matriz energética.

Frota e Schiffer (2007) definem radiação solar como a energia eletromagnética emitida pelo Sol que chega à Terra após parte dela ser absorvida pela atmosfera, e é caracterizada por ser uma onda curta. A parte dessa radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre e chega à superfície terrestre é absorvida, e parte dessa energia absorvida é "re-irradiada", mas como a temperatura da superfície terrestre é inferior que a do Sol, a energia é emitida em ondas de baixa frequência, chamadas de ondas longas (HEWITT, 2008).

O conjunto de todas as formas de radiação solar, radiação de onda curta, é chamado de espectro solar. Ele é dividido em três parcelas: ultravioleta, luz ou espectro visível e infravermelho. A luz ultravioleta tem comprimento de onda menor que 400 nm, é invisível e representa 2% da energia solar. A luz ou espectro visível é a que permite aos seres humanos ver, tendo comprimento de onda de 400 nm a 700 nm e representa 45% da energia solar. A última parcela é a infravermelha, que representa 53% da energia solar, tem comprimento de onda de 700 nm a 3000 nm, e, assim como a ultravioleta, é invisível. As três parcelas, quando absorvidas, viram calor, mas apenas a luz é energia luminosa (BAUER, 1994).

A parcela de radiação solar que atravessa a atmosfera sem sofrer mudança na sua distribuição espectral é chamada de radiação solar direta. Esta parcela chega à superfície terrestre em feixes aproximadamente paralelos. Quando há a mudança na distribuição espectral da radiação pela atmosfera terrestre ela é chamada de radiação solar difusa, ou seja, a direção da onda é mudada pelos processos de reflexão e refração quando a radiação solar atravessa a atmosfera. A soma da radiação solar direta com a radiação solar difusa é chamada de radiação solar global ou total, pois ela representa a totalidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra (VICTORIA, 2008).

Todos os corpos possuem a propriedade de refletir a radiação solar incidente, propriedade esta que é chamada de albedo. Corpos brancos possuem um valor alto de albedo e, como nesse caso a maior parte da energia já foi refletida, a absorção de calor é pequena (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A partir de sua interação com a luz, os materiais podem ser classificados como materiais opacos, materiais translúcidos e materiais transparentes.

Os materiais opacos são aqueles que absorvem parte da luz incidente e refletem o restante, dependendo de características tais como cor e textura do revestimento externo. As paredes escuras e opacas absorvem mais de 90% da luz, sendo que as claras e brilhantes absorvem cerca de 15% e refletem aproximadamente 85% da luz (HOPKINSON *et al.*, 1975; CASTRO *et al.*, 2003).

Vanderlei e Caram (2007) explicam que um material translúcido é muito semelhante ao material transparente. A diferença é que, quando a luz passa por um material translúcido, muda de direção no interior do material, saindo do outro lado de uma maneira difusa.

Segundo Corato (2001), quando a luz do sol entra em contato com os materiais transparentes (vidro e policarbonatos), pode ser refletida, absorvida e se converter em calor, sendo também transmitida para o interior. A proporção no qual ocorre a reflexão, absorção e transmissão da luz é dada em função das características do elemento transparente.

Segundo Bauer (1994), a quantidade refletida depende de dois fatores: a refletividade do vidro e o ângulo com que a luz incide no vidro. Outra parte da energia é absorvida pelo vidro e liberada para o interior e o exterior sob forma de calor (radiação de onda longa). A última parte da energia solar (luz visível) atravessa o vidro.

2.1.2 Irradiância e irradiação

Já tendo definido radiação solar, outras definições importantes quando se trata de energia solar é a irradiância e a irradiação. A primeira é uma grandeza física, definida como a potência da energia radiante ou fluxo de energia que atravessa uma determinada área em uma unidade de tempo, sendo medida em W/m^2 (ROSA, 2003). Segundo Landsberg e Sands (2011), a irradiância solar direta (I_{dir}) é o feixe de energia radiante medido num plano perpendicular ao feixe e a irradiância difusa (I_{dif}) é o medido em um plano horizontal. No entanto se a superfície de medição não for normal à irradiância medida (I), a área da superfície de intersecção com o feixe é maior, fazendo com que o valor da irradiância seja

menor. Sendo θ o ângulo entre o feixe de energia radiante do solar e a superfície de intersecção então tem-se a equação (1).

$$I(\theta) = I_{dir} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

A radiação solar total incidente em uma determinada superfície horizontal é dada pela equação (2).

$$I = I_{dif} + I_{dir} \cdot \cos \theta_z \quad (2)$$

Onde θ_z é o ângulo entre o feixe direto do Sol com a normal à superfície da terra.

Em dias claros, sem nuvens, a irradiância varia suavemente com a hora do dia. A Figura 1 mostra a irradiância solar em 3 diferentes épocas do ano, em dias com o céu aberto, para a cidade de Curitiba, em um local de latitude $25^\circ 26'$ Sul. Conforme Landsberg e Sands (2011), sendo verão em janeiro no hemisfério sul, pode-se notar que para esta época do ano os valores de irradiância solar são maiores, atingindo o seu auge. Isto ocorre pois no verão os ângulos solares são mais elevados, em relação à horizontal, e a redução da irradiância devido ao cosseno é menor. Os picos de irradiância ocorrem diariamente por volta das 12 horas, pois neste horário os ângulos do sol são maiores e isto causa uma redução no comprimento do percurso do feixe direto na atmosfera.

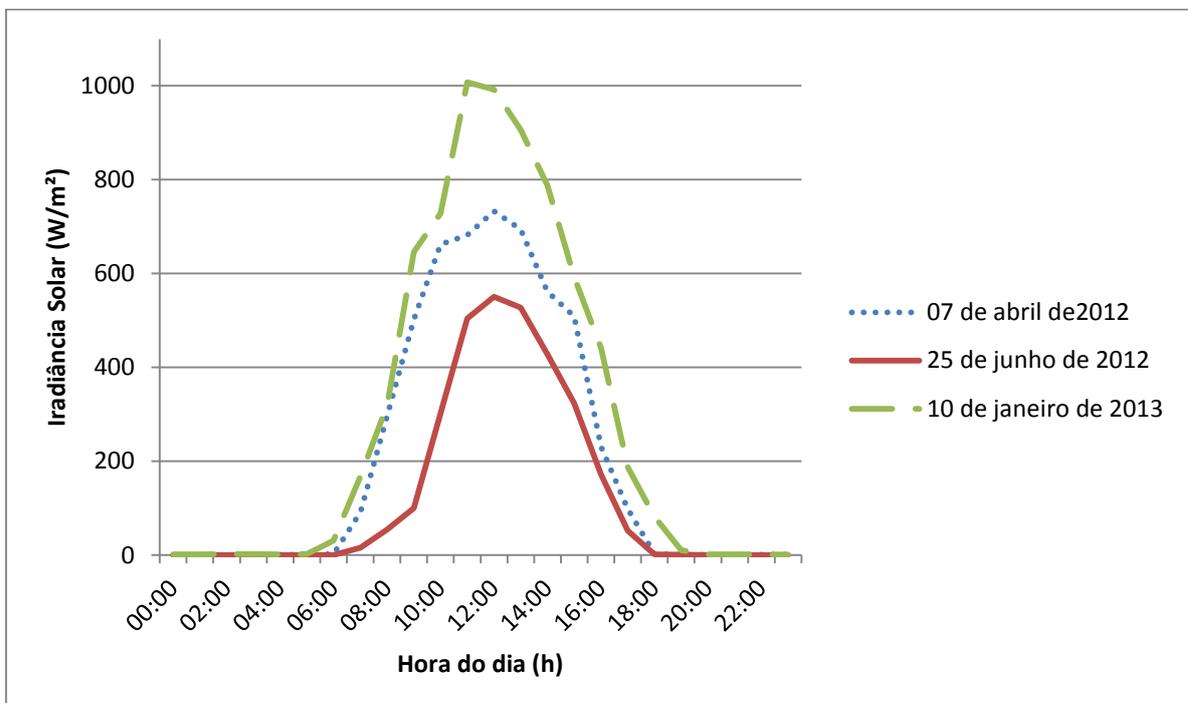


FIGURA 1 - Irradiância Solar no plano horizontal para dias claros, medidos na cidade de Curitiba

Segundo Rosa (2003), integrando a irradiância ao longo de um intervalo de tempo, obtém-se a irradiação, que pode ser definida como a quantidade de energia radiante que atravessa uma superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta, medida em Wh/m².

2.2 FONTES DE ENERGIA

Fontes de energia são as maneiras em que a energia é encontrada na natureza. Estas fontes devem ser processadas antes de serem distribuídas para os consumidores finais.

As fontes de energia podem ser classificadas de duas maneiras: fontes primárias ou fontes secundárias, e fontes renováveis ou fontes não renováveis. As fontes primárias são provenientes diretamente da natureza, como por exemplo, o Sol, o vento, os combustíveis fósseis e o urânio. Em alguns casos elas precisam sofrer uma transformação, convertendo-se assim em uma fonte de energia secundária, como a gasolina e a eletricidade (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

2.2.1 Fontes de energia não renováveis

As fontes de energia não renováveis são aquelas que, segundo Jannuzzi e Swisher (1997), tem uma reposição na natureza extremamente lenta e esta reposição ocorre sob condições muito específicas. Como exemplo, pode-se citar os combustíveis fósseis e os nucleares.

2.2.1.1 Nuclear

A energia nuclear, segundo Murray (2004), começou a ser usada como fonte de energia, com aplicações pacíficas, em 1955 para alimentar um submarino nuclear. Em 1957 o reator foi adaptado e criou-se a primeira usina nuclear comercial na Pensilvânia, nos EUA. Esta usina possuía uma potência de saída de 60 MW.

A Eletrobras (2013) define energia nuclear como a transformação de massa em energia que ocorre através de reações nucleares em alguns elementos químicos, de forma natural ou induzida por meio de técnicas específicas. A produção de energia pode se dar por dois métodos: fissão nuclear, onde ocorre a divisão do núcleo atômico em duas ou mais

partículas, e a fusão nuclear, na qual há a união de dois ou mais núcleos, formando um novo elemento, sendo o primeiro método o mais utilizado.

A energia nuclear não produz gases tóxicos nem gases que contribuem para o efeito estufa e a matéria prima possui um baixo custo (ELETROBRAS, 2013). Apesar dos benefícios com a energia nuclear, acidentes podem ocorrer como em Three-Mile Island, nos EUA, em 1979, Chernobyl, União Soviética, em 1986 e Fukushima, no Japão, em 2011. O vazamento de radiatividade contaminará de forma letal e por um longo período de tempo toda a região, com efeitos incalculavelmente trágicos (MONTALVÃO, 2012).

2.2.1.2 Fósseis

Os combustíveis fósseis são substâncias de origem mineral, formados pelos compostos de carbono. São originados pela decomposição de resíduos orgânicos há milhares de anos. Existem três grandes tipos de combustíveis fósseis: o carvão mineral, petróleo e o gás natural.

- O carvão mineral é uma rocha orgânica e historicamente foi o primeiro combustível fóssil a ser usado para a produção de energia elétrica nas centrais térmicas. A idade do carvão está diretamente relacionada com a quantidade de carbono, que por sua vez está diretamente relacionada com a qualidade do carvão, ou seja, quanto mais velha a rocha maior a qualidade dela. O maior problema da utilização deste combustível fóssil é a poluição gerada por ele. Sua queima libera cinzas, dióxido de carbono, dióxidos de enxofre e óxidos de enxofre, em maiores quantidades do que os produzidos na combustão dos outros combustíveis fósseis (DIONYSIO; MEIRELLES, 2011).
- O petróleo é um líquido, de cor escura e cheiro forte, constituído basicamente por hidrocarbonetos. O refinamento do petróleo bruto se dá pela sua separação em diversos componentes, e permite obter vários tipos de combustíveis e matérias-primas, entre eles está a gasolina, o gás liquefeito de petróleo (GLP), o querosene, a parafina, o asfalto e o óleo diesel (DIONYSIO; MEIRELLES, 2011). Dos impactos ambientais causados pelo petróleo, os mais frequentes e evidentes são os vazamentos de óleo, e quando ocorrem na água, a recuperação é sempre muito longa e difícil.

- O gás natural é uma mistura gasosa de hidrocarbonetos, composta em sua maioria de gás metano. O gás natural é encontrado no subsolo, juntamente com o petróleo, e pode ser classificado como não-associado quando é encontrado juntamente com uma pequena quantidade de petróleo e associado quando está em pequena quantidade em uma reserva petrolífera. Este gás é considerado, dentre os combustíveis fósseis, o menos danoso ao meio ambiente por apresentar uma combustão mais limpa, pois emite uma quantidade menor de poluentes e fuligem (DIONYSIO; MEIRELLES, 2011).

2.2.2 Fontes de energia renováveis

As fontes de energia renováveis foram definidas por Jannuzzi e Swisher (1997), como aquelas que, em curto prazo, a utilização não causa mudanças significativas na sua reposição e nos potenciais de uso. Podemos citar a energia hidráulica, de biomassa, eólica e solar como pertencente a este grupo.

2.2.2.1 Hidráulica

A Itaipu Binacional (2013) define energia hidráulica como a proveniente do aproveitamento da energia cinética gravitacional da água contida numa represa elevada. A represa é feita pela construção de uma barragem em um rio, formando um lago artificial que tem duas principais funções: elevar o nível de água para o aumento da energia potencial e acumular água.

A ANEEL (2005) explica que uma usina hidráulica é formada por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que trabalham em conjunto e de maneira integrada. O sistema de captação e adução de água são túneis que transportam a água até a casa de força, onde estão localizadas as turbinas, que são formadas por pás ligadas a um eixo, a água faz o eixo girar que através de geradores produzem a energia elétrica. O vertedouro deixa passar o excesso de água na barragem.

A construção da barragem causa alagamentos que ocupam uma grande área e afeta a vegetação, a fauna e expulsam os moradores locais. Outro impacto ambiental causado pela represagem das águas é o obstáculo para a migração dos peixes, pois algumas espécies precisam nadar contra a correnteza como parte de seu processo de reprodução (RONCAGLIO; JANKE, 2012; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - BRASIL, 2013).

Segundo a ANEEL (2005), estas usinas são classificadas quanto a sua potência, elas podem ser de grande ou de médio porte ou uma pequena central hidrelétrica (PCH). As PCHs tem uma potência instalada entre 1,1 MW e 30 MW, e se a potencia instalada estiver acima de 30 MW ela é denominada Usina Hidrelétrica de Energia. As PCHs geram menos impacto ambiental e se prestam à geração descentralizada, mas tem o custo maior de energia e em época de estiagem pode ocorrer ociosidade das turbinas (PORTAL PCH, 2013).

No Brasil, 69,7% da potência de geração elétrica é formada por energia hidráulica, isso equivale a uma potência instalada de 84.294 MW, distribuída em 1.064 usinas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2013).

2.2.2.2 Biomassa

Segundo o Ministério do Meio Ambiente - Brasil (2013), a biomassa é o recurso originário da matéria orgânica (vegetal ou animal) utilizado para a produção de energia. Este tipo de energia é considerada um aproveitamento indireto da energia solar, pois esta energia foi previamente utilizada para fixar o carbono através da fotossíntese. A biomassa pode se transformar em energia através da fermentação, queima, carburação, pirólise, produção de metanol e etanol, síntese de hidrogênio, células combustíveis, entre outros (RONCAGLIO; JANKE, 2012).

A biomassa é o componente principal de vários novos tipos de combustíveis e fontes de energia como o bio-óleo, o biogás, o *Biomass-to-Liquids* (BTL) e o biodiesel. As biomassas mais usadas são: a lenha (já representou 40% da produção energética primária no Brasil) e o bagaço da cana-de-açúcar.

A biomassa, nos dias de hoje, é muito utilizada na geração de eletricidade, sobretudo em sistemas de cogeração e no fornecimento de energia elétrica para demandas isoladas da rede elétrica (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - BRASIL, 2013).

O Brasil possui situação geográfica favorável para a produção de biomassa, pois recebe uma grande quantidade de radiação solar o ano todo, outro ponto favorável para o país é a grande quantidade de terras para a agricultura, com condições de solo e climáticas favoráveis, o que faz o Brasil ter uma vantagem na produção desta fonte de energia (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - BRASIL, 2013).

Segundo Roncaglio e Janke (2012), a biomassa tem como problema a poluição gerada por sua queima, o dióxido de carbono, mas diferente da queima dos combustíveis fósseis, a biomassa não libera enxofre. A produção da cana-de-açúcar em larga escala também gera uma série de problemas, tanto ambientais como sociais, como o uso excessivo do solo e a mão-de-obra infantil.

Para Abreu (2013) a quantidade liberada de o dióxido de carbono, pela queima deste tipo de combustível, é inferior à consumida pela fotossíntese quando há a produção da biomassa. Isto ocorre porque a raiz, aonde é acumulada uma parte do carbono produzido pela planta, continua no solo na maior parte das vezes. Assim, ao se utilizar a biomassa como combustível se está contribuindo para uma pequena diminuição de CO₂ da atmosfera.

2.2.2.3 Eólica

O Ministério do Meio Ambiente - Brasil (2013) define energia eólica como aquela produzida pela força dos ventos. A força do vento é captada por hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico, os aerogeradores. A quantidade de energia gerada é função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás (hélices) e da velocidade do vento.

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica entrou em operação na Dinamarca em 1976 (ROSA; FRACETO; MOSCHINI-CARLOS, 2012). Segundo a *World Wind Energy Association* (2013), em 2012, havia no planeta 282 GW instalados em centrais eólicas, sendo 75,3 GW na China, 59,9 GW nos EUA e 31,0 GW na Alemanha.

Uma usina de energia eólica precisa ser instalada em localizações que possuam ventos superiores a 7m/s, e a altura da torre deve se situar entre 60 a 100m. A grande vantagem da energia eólica é que não há consumo de combustível, portanto não há a liberação de gases que poluem a atmosfera, esta energia é considerada abundante, renovável, limpa e disponível em muitos lugares. Os pontos negativos da energia gerada pelo vento são a poluição visual, acidentes com aves, geração de ruídos e interferências eletromagnéticas, o custo da energia (considerada uma energia cara) e a dependência da intensidade dos ventos (ROSA; FRACETO; MOSCHINI-CARLOS, 2012).

Estima-se que o Brasil tenha um potencial de geração de energia eólica de 143 GW, sendo 52% de todo este potencial localizado na região nordeste (ROSA; FRACETO; MOSCHINI-CARLOS, 2012). Segundo o Ministério de Minas e Energia - Brasil (2013) até o final de 2012 o Brasil possuía 84 usinas eólicas, com uma potência instalada de 1.886 MW.

2.2.2.4 Solar

A incidência de radiação solar no Brasil é muito boa. Cabe salientar que países como a Alemanha, onde têm-se a maior capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, a sua região de maior incidência de radiação solar é aproximadamente 40% menor que a pior região no Brasil (TIEPOLO *et al.*, 2013). Segundo a ANEEL (2005), aproveita-se a energia solar de diversas maneiras, ela pode-se ser utilizada para aquecimento solar passivo, que é quando a energia solar entra e é absorvida pela edificação, fazendo assim o aquecimento e a iluminação do espaço sem a utilização de energia elétrica, sendo ela melhor aproveitada utilizando-se técnicas arquitetônicas apropriadas.

A energia solar também pode ser aproveitada para o aquecimento de fluidos com a utilização de coletores solares. Utilizadas em residências, edifícios públicos e comerciais, hospitais, restaurantes, hotéis e similares são usualmente utilizadas para o aquecimento da água, a temperaturas inferiores a 100°C, destinadas à higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes. Este sistema deve ser utilizado juntamente com um sistema auxiliar, pois a incidência da radiação solar é intermitente (ANEEL, 2005; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - BRASIL, 2013). O Instituto Vitae Civilis (2013) estima que a quantidade de energia elétrica usada atualmente no Brasil para aquecimento residencial de água em chuveiros e aquecedores elétricos de acumulação (boilers) é superior a 5% do consumo total do país, e enfatiza a importância desta tecnologia.

As usinas termosolares são um outro tipo de aproveitamento da energia solar. Esta tecnologia utiliza o Sol para aquecer um fluido, que esquentando a água até que ela vire vapor, que por sua vez alimenta turbogeradores convencionais que produzem a energia elétrica. Para se obter altas temperaturas utilizam-se concentradores que concentram a luz solar para melhorar o aquecimento (STANO JÚNIOR; TIAGO FILHO, 2007).

A energia solar também é utilizada para produção de energia elétrica diretamente, a partir da geração solar fotovoltaica. A radiação solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio dos fótons presentes na radiação solar (luz) incidentes sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Este sistema não emite dióxido de carbono, além de ser uma geração distribuída, ou seja, não necessita de investimentos governamentais em linhas de transmissão, mas a energia fotovoltaica ainda é considerada uma tecnologia cara (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - BRASIL, 2013; RONCAGLIO; JANKE, 2012).

2.3 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

2.3.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico acontece em materiais semicondutores. Estes materiais foram descobertos a pouco mais de 50 anos e tem a característica de hora se comportar como condutores e hora como isolantes. Os semicondutores são atualmente muito utilizados em computadores e aparelhos eletrônicos, como o silício e o germânico, além do gálio, do cádmio, arsênio e telúrio (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2012).

O semicondutor mais usado é o silício. Segundo Shayani (2006), o silício possui número atômico 14, com três orbitas ao redor do núcleo, a primeira com 2 elétrons, a segunda com 8 elétrons e a última, chamada de banda de valência, com 4 elétrons. O silício consegue alcançar a estabilidade fazendo quatro ligações covalentes, cada átomo faz 4 ligações com átomos vizinhos, formando estruturas sólidas.

As ligações covalentes, entre os elétrons de diferentes átomos, podem ser quebradas se um dos elétrons receber energia externa fazendo com que ele se afaste do seu respectivo núcleo, até que fique livre da atração deste. Com isso, o elétron deixa a banda de valência, em que não pode se movimentar livremente, passando para a banda de condução. A saída do elétron da banda de valência deixa uma lacuna elétrica, o que cria o par elétron-lacuna, originado a partir do aumento da energia do elétron (SHAYANI, 2006).

Este elétron livre pode ser direcionado para um circuito, criando assim uma corrente elétrica. Mas no caso do silício não há formação de corrente elétrica, pelo fato que o elétron livre imediatamente se unifica a uma lacuna causada pela saída de outro elétron, fazendo com que a energia seja transformada em calor. Para manter o elétron livre é necessária a utilização de um campo elétrico.

Então, para que se produza a desejada corrente elétrica, é necessário que haja um processo que acelere os elétrons livres para fora do material, para um circuito externo. Isso pode ser realizado com a aplicação de um campo elétrico. O material das células fotovoltaicas é preparado de forma a possuir um campo elétrico permanente, que é gerado por meio da adequada dopagem do material semicondutor (SHAYANI, 2006).

Quando o silício que possui quatro elétrons na banda de valência se une a um elemento que possui cinco elétrons na banda de valência, como o fósforo ou o arsênio, a

estrutura contará com um elétron extra. Este elétron extra necessitará de uma quantidade pequena de energia térmica para se desprender do núcleo e passar para a banda de condução. Nesse caso, o fósforo é um material dopante doador de elétrons, denominado dopante N ou impureza N; essa dopagem é denominada dopagem do tipo N (FREITAS, 2006).

Freitas (2006) nos mostra que quando juntamos o silício com um elemento que possua três elétrons na última camada, faltará um elétron para completar a ligação, se formará uma lacuna. Com uma pequena quantidade de energia um elétron pode se deslocar para a lacuna fazendo com que buraco se desloque. O boro e o índio são elementos que possuem três elétrons na banda de valência, e neste caso, são chamados de dopante P ou impureza P; essa dopagem é denominada dopagem do tipo P.

Mesmo com dopagem, o silício continua com carga neutra, pois a quantidade de elétrons e de prótons é a mesma. Entretanto, quando o silício do tipo N é posto em contato com o silício do tipo P, os elétrons livres do material com dopagem do tipo N preenchem as lacunas do material com dopagem do tipo P. Logo, a camada do tipo N, que cedeu elétrons, fica positivamente carregada; a camada do tipo P, que recebeu elétrons, fica negativamente carregada. Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons da camada N para a camada P. Este processo alcança equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira de potencial capaz de impedir o fluxo dos elétrons livres remanescentes no lado N. Está criada a junção PN (SHAYANI, 2006).

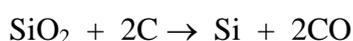
Nessa situação, o efeito fotovoltaico pode ocorrer. Quando um elétron da camada P recebe energia externa suficiente do fóton da luz solar incidente na junção PN, ele move-se para a banda de condução e cria o par elétron-lacuna. O campo elétrico existente força o deslocamento desse elétron para a camada N, não permitindo o seu retorno, e, simultaneamente, repele a lacuna para o extremo oposto da camada P. Criada a condição de circulação de corrente elétrica no interior do material semiconductor dopado, a simples colocação de contatos elétricos nas duas extremidades do material permite à tensão elétrica existente entre elas originar corrente elétrica, que produzirá os efeitos desejados na carga externa. Essa é a base do funcionamento das células fotovoltaicas (SHAYANI, 2006).

2.3.2 Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é o local onde ocorre a conversão da radiação solar em corrente elétrica. Entre os diversos materiais utilizados para a fabricação das células, destacam-se as

células que empregam a tecnologia de silício cristalino (c-Si), que podem ser de dois tipos: silício monocristalino (mc-Si) e o silício policristalino (pc-Si). Dentre os outros tipos de tecnologia fotovoltaica pode-se citar os chamados filmes finos, como o silício amorfo (a-Si) e o arseneto de gálio (GaAs) e os compostos policristalinos, como o telureto de cádmio (CdTe) e o disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂) (GHENSEV, 2006).

Segundo Vasconcelos (2013), as células que utilizam silício cristalino como material base ocupam aproximadamente 90% do mercado. Segundo Muñiz e García (2006), o silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, e é extraído na forma de dióxido de silício (SiO₂). Em seguida, o SiO₂ é submetido a dois processos: a redução e a purificação. A redução consiste em adicionar carbono em altas temperaturas.



O produto resultante deste processo é o silício com uma pureza de 98%, porém para ser utilizado nas células fotovoltaicas o elemento necessita estar com uma pureza de 99,9999%. Para chegar à pureza necessária, o silício é submetido ao processo de purificação onde ele é tratado quimicamente para a obtenção do nível de pureza necessário (MUÑIZ; GARCÍA, 2006).

Para se utilizar o silício nas células fotovoltaicas, o material deve ter algumas características, além do alto grau de pureza, como a baixa densidade de defeitos e o material deve ter a estrutura monocristalina. O processo usualmente usado para se chegar às qualificações desejadas é chamado "Processo Czochralski". Neste processo o silício é fundido junto com uma pequena quantidade de dopante. Após o material estar totalmente fundido, e introduzido uma haste, a haste põe-se em movimento de rotação e o silício se solidifica em torno dela formando um cilindro (MUÑIZ; GARCÍA, 2006).

O cilindro é dividido em vários discos de aproximadamente 0,3 mm de espessura. Neste disco são introduzidas as impurezas do tipo N de forma a obter a junção PN. A superfície resultante é lisa e reflete parte da radiação que deveria estar sendo usada para a produção de energia, portanto é criada uma superfície rugosa em forma de pirâmides microscópicas que os raios refletidos se choquem contra outra pirâmide (MUÑIZ; GARCÍA, 2006).

Em seguida são formados os contatos metálicos, ou seja, é este processo que se constrói a conexão elétrica da célula com o circuito externo. O método mais utilizado para este processo é o processo químico de deposição por troca iônica de níquel (RAMOS, 2006).

Por último é aplicada uma película anti-refletora com a finalidade de se conseguir um aumento na eficiência (MUÑIZ; GARCÍA, 2006).

As células de silício policristalino, são mais baratas que as de silício monocristalino, mas possuem um eficiência menor, enquanto as de mc-Si possuem uma eficiência de conversão energética testada em laboratório de 25%, as de pc-Si possuem 20,4% (GREEN, 2012; GHENSEV, 2006).

Ghensev (2006) afirma que a célula de silício policristalino pode ser fabricado em qualquer formato, pois é feito a partir de moldes, podendo ser quadradas, o que aumentaria a relação de quantidade de células por área útil. O processo de preparação das células é menos rigoroso, porém perde-se um pouco em eficiência

O silício amorfo é utilizado por vários eletrônicos de baixo consumo energético, como os relógios e as calculadoras. Em células fotovoltaicas com aproximadamente 1 μm de espessura, absorve até 90% da energia luminosa incidente, possuem eficiência de conversão energética entre 5 a 8%. Este tipo de célula é afetada por um processo de degradação nos primeiros meses de operação, reduzindo sua eficiência, esta característica é chamada de efeito *Staebler Wronski* (GHENSEV, 2006).

O arseneto de gálio é um semiconductor composto pela mistura do Gálio com o Arsênio. O Gálio é um elemento raro, mais do que o Ouro, e é formado da fusão do Alumínio com o Zinco. Já o Arsênio não é um elemento raro e é considerado tóxico. Nas células fotovoltaicas possuem 28,8% de eficiência, testada em laboratório. Pouco utilizadas devido ao preço muito elevado da matéria prima (GREEN, 2012; GHENSEV, 2006).

O telureto de cádmio é composto de telúrio, um semimetal relativamente caro e tóxico, e o cádmio, subproduto a extração do zinco é escasso e tóxico. As células fotovoltaicas construídas com telureto de cádmio são constituídas por uma estrutura tipo heterojunção, ou seja, são compostas por diversas faixas, entre elas, o vidro, um óxido redutor transparente, sulfato de cádmio e, o telureto de cádmio e um contato traseiro (geralmente o ouro ou o Alumínio) como mostrado na Figura 2 (GHENSEV, 2006).

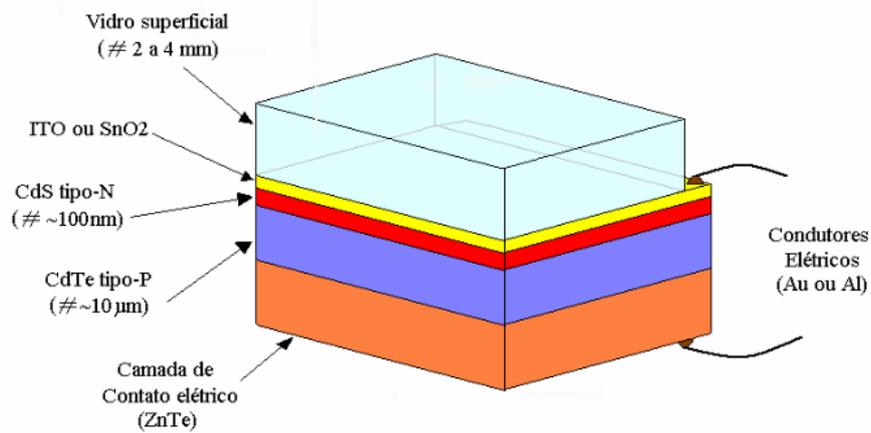


FIGURA 2 - Modelo ilustrativo de uma célula fotovoltaica de telureto de cádmio

Fonte: GHENSEV (2006).

Segundo Ghensev (2006), o disseleneto de cobre e índio é formado principalmente por cobre, índio e selênio, que são compostos estáveis e variando a porcentagem de cada elemento obtêm-se propriedades semicondutoras. Possuem eficiência de conversão energética entre 9 a 10%, e assim como as células fotovoltaicas de telureto de cádmio são constituídas por uma estrutura tipo heterojunção, como mostra a Figura 3.

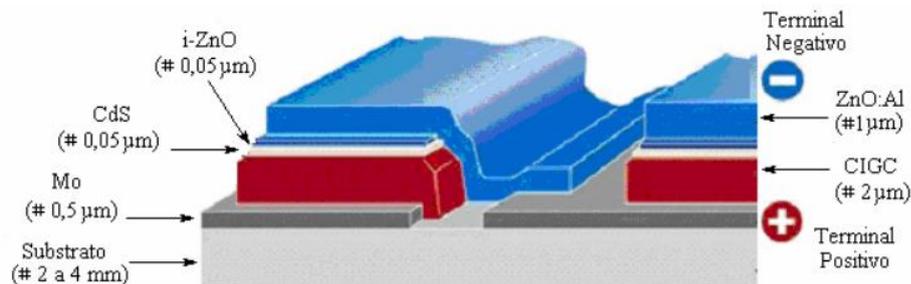


FIGURA 3 - Composição estrutural de uma célula fotovoltaica de disseleneto de cobre e índio

Fonte: GHENSEV (2006).

Segundo Almeida (2012), toda célula fotovoltaica possui uma curva característica de corrente *versus* tensão ($I \times V$), nesta curva pode-se detectar alguns pontos importantes como a tensão de circuito aberto ($V_{oc\text{célula}}$), que ocorre quando a corrente e potência são zero; a corrente de curto-circuito ($I_{sc\text{célula}}$), que ocorre quando a tensão e potência são zero; e o ponto de máxima potência ($P_{MP\text{célula}}$), que ocorre quando a tensão é $V_{M\text{célula}}$ (tensão de máxima potência), a corrente é $I_{M\text{célula}}$ (corrente de máxima potência) e a potência é $P_{M\text{célula}}$ (potência máxima), como mostra a Figura 4. Pode-se traçar também uma curva característica de potência *versus* tensão ($P \times V$), onde é fácil observar o ponto de máxima potência no ápice da curva, mostrada na Figura 5.

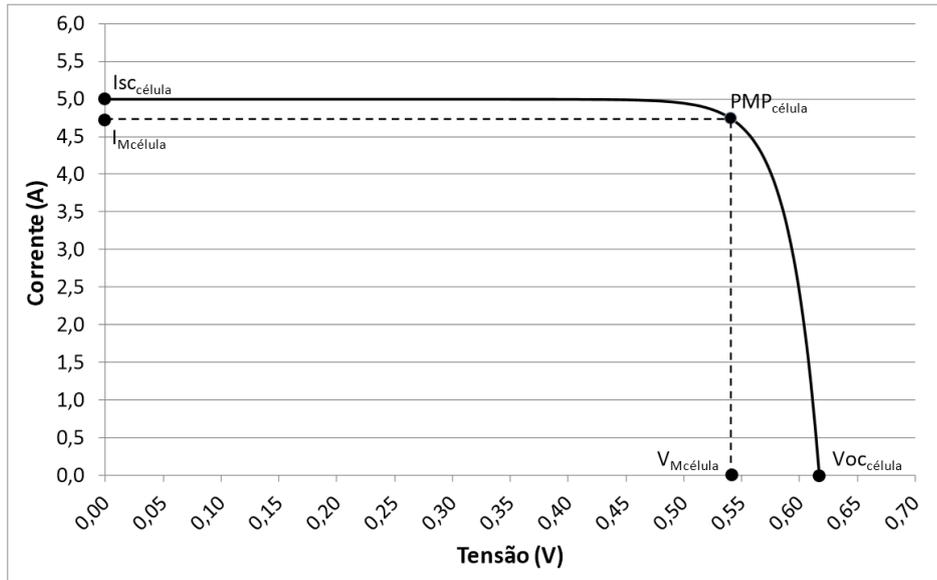


FIGURA 4 - Curva I x V de uma célula fotovoltaica

Fonte: ALMEIDA (2012).

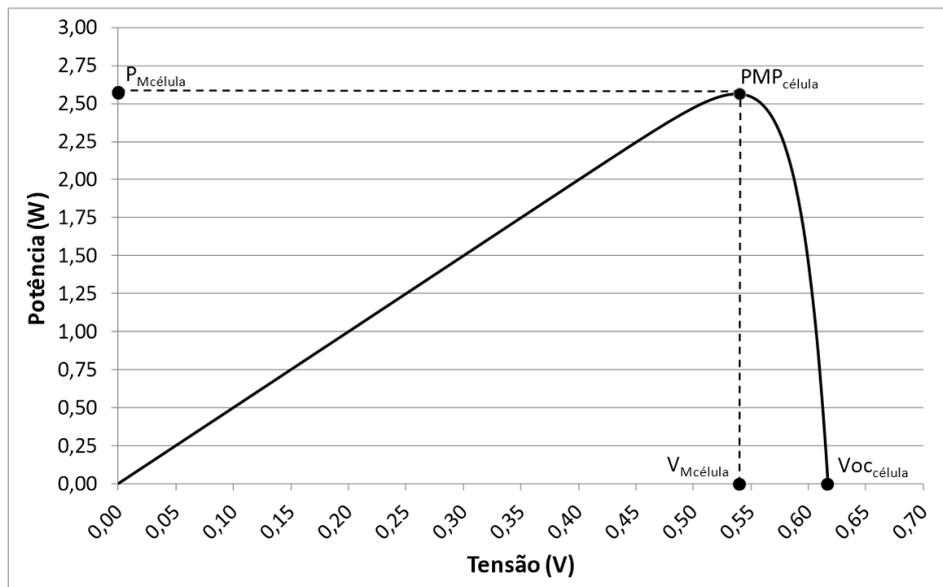


FIGURA 5 - Curva P x V de uma célula fotovoltaica

Fonte: ALMEIDA (2012).

2.3.3 Módulo Fotovoltaico

Egido, Montero e Arribas (1999) afirmam que módulo fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas. Estas células são protegidas contra as intempéries, e são associadas eletricamente para a transmissão de corrente. Um módulo pode possuir um número variado de células, geralmente são formados por 33 a 36 ligadas em série ou em paralelo, mas este número depende da necessidade de tensão e corrente (CASTRO, 2008).

Segundo Castro (2006), para a união de vários módulos eles podem ser ligados também em série e em paralelo, com a finalidade de obter-se mais potência e criar assim os painéis fotovoltaicos, como mostra a Figura 6.

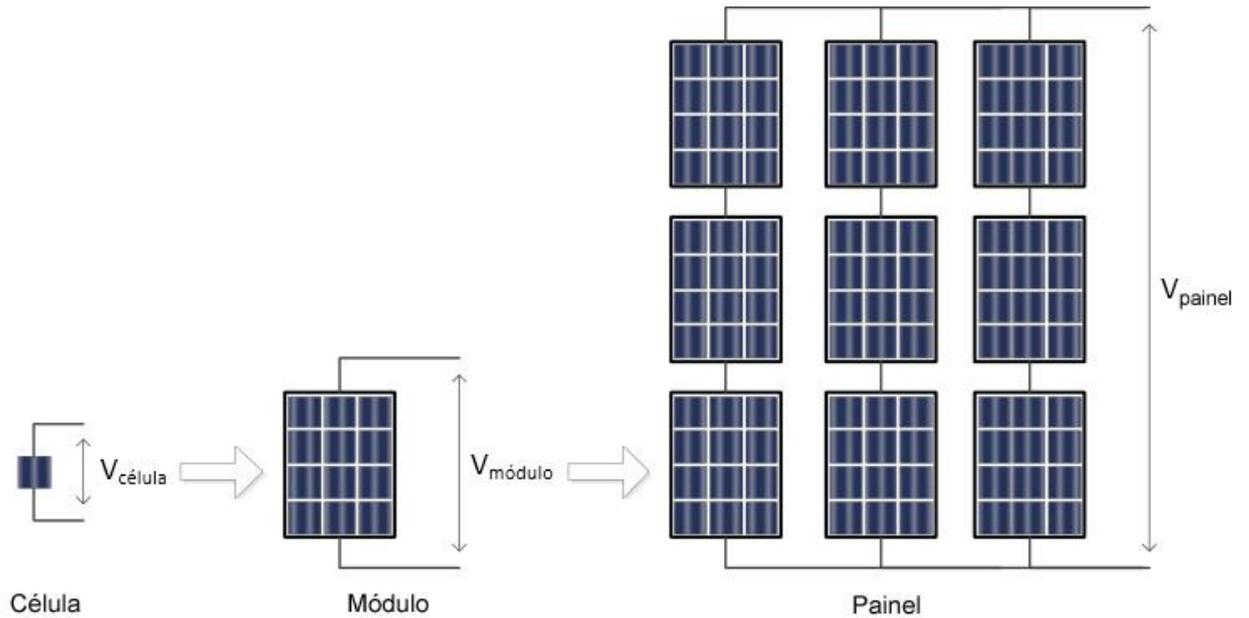


FIGURA 6 - Célula, módulo e painel fotovoltaico

Fonte: ALMEIDA (2012).

O módulo fotovoltaico também possui curvas $I \times V$ e $P \times V$ que derivam da combinação das curvas características das células fotovoltaicas que o compõem (ALMEIDA 2012).

A Figura 7 apresenta módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias.

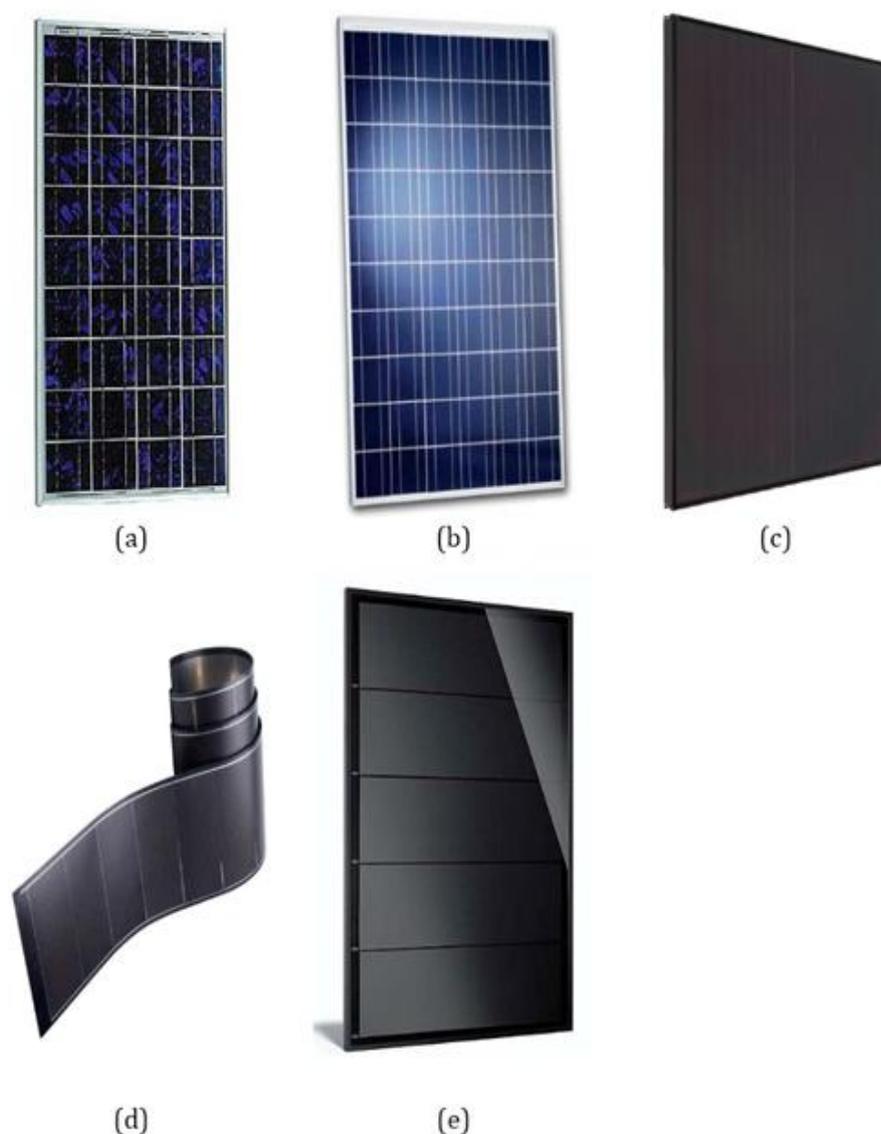


FIGURA 7- Módulos Fotovoltaicos de (a) silício policristalino, (b) silício monocristalino, (c) silício amorfo, (d) filme fino, (e) disseleneto de cobre-índio

Fonte: ALMEIDA (2012).

2.4 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como isolados ou conectados à rede elétrica. Esta classificação se refere a como o sistema se relaciona com relação à rede elétrica (JUCÁ; CARVALHO, 2013).

2.4.1 Sistemas fotovoltaicos isolados

O sistema fotovoltaico isolado é aquele que não está conectado à rede elétrica de energia. Utilizado normalmente em lugares isolados onde não há a cobertura da rede elétrica.

É utilizado junto com um banco de baterias recarregáveis que armazena a energia para os horários em que não há radiação solar (GALLI, 2003). Para Rüter *et al.* (2007) este tipo de sistema é composto de painéis fotovoltaicos, controlador de carga, baterias e inversor, como mostra a Figura 8.

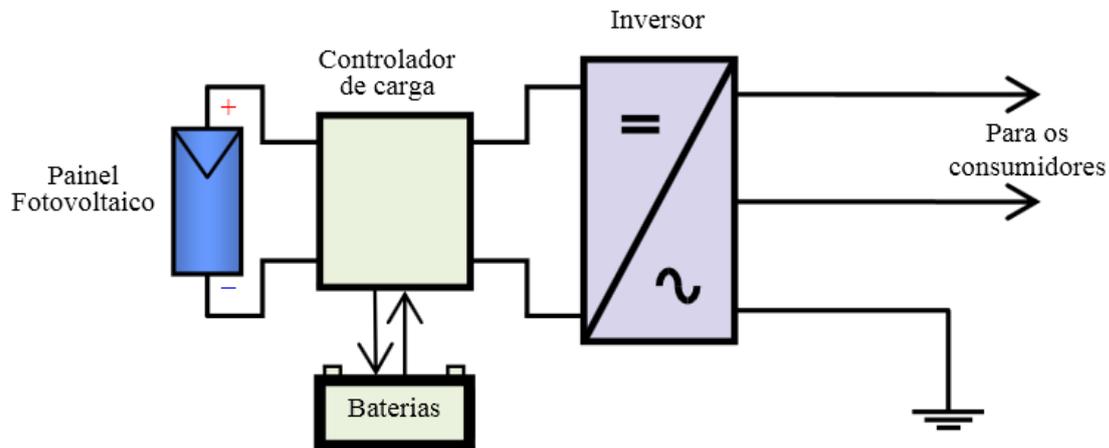


FIGURA 8 - Constituição Básico de um sistema fotovoltaico autônomo isolado

Fonte: RÜTHER *et al.* (2007).

O controlador de carga evita a sobrecarga ou a descarga total do sistema de baterias, ou seja, ele protege o sistema de acumulação desligando a abastecimento de energia quando a bateria está com a capacidade máxima ou quando a carga dos acumuladores chega à profundidade de descarga máxima eles são desconectados.

O inversor transforma a corrente que vem dos painéis, que é corrente contínua, para corrente alternada para que esta possa fazer a alimentação dos equipamentos, que utilizam este tipo de configuração (JUCÁ; CARVALHO, 2013).

2.4.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é aquele que está conectado efetivamente à rede elétrica de energia. Neste tipo de sistema não há necessidade de um sistema que acumule a energia e representa uma complementação para a geração de energia para a rede em que está conectado (JUCÁ; CARVALHO, 2013). A Figura 9 mostra a configuração básica do sistema conectado à rede, ou seja, os painéis fotovoltaicos ligados a um inversor que é conectado à rede elétrica.

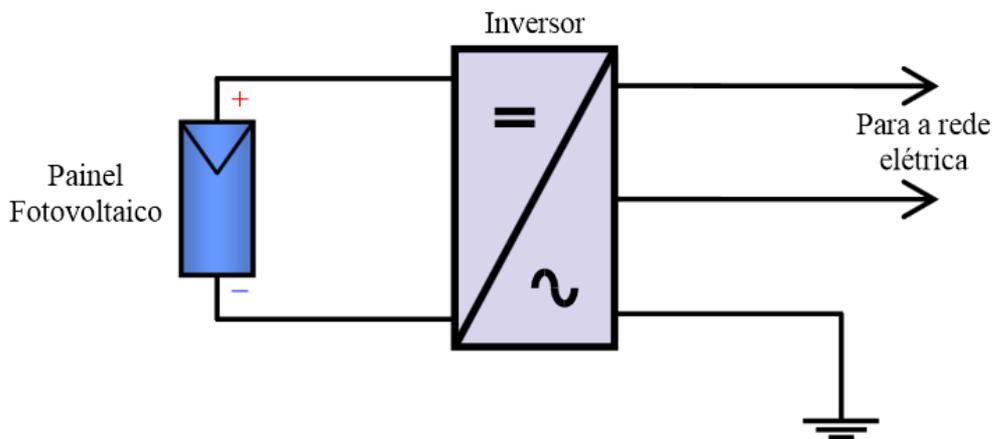


FIGURA 9 - Constituição Básica do sistema fotovoltaico conectado à rede

Fonte: RÜTHER *et al.* (2007).

O inversor usado neste caso é específico para este fim, pois quando não está conectado à rede ele não converte a corrente contínua em corrente alternada. Ele deve possuir um dispositivo anti-ilhamento, pois caso haja uma interrupção no fornecimento de energia pela concessionária, o inversor se desligará automaticamente. A energia entregue pelo inversor possui as características da energia da rede: tensão, frequência e fase (RÜTHER *et al.*, 2007).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser classificados como de grande ou de pequeno porte. As grandes centrais fotovoltaicas são as de grande porte, elas ocupam uma grande área e geralmente estão localizadas em locais afastados dos grandes centros urbanos. Os sistemas de pequeno porte formam a chamada geração distribuída e se constituem de painéis instalados nas edificações residenciais e comerciais. Este sistema tem como principais vantagens a diminuição das perdas, por ser produzida próxima aos consumidores, não ocupa grandes espaços livres, diminui os investimentos em linhas de transmissão, melhora a qualidade da energia distribuída (CÂMARA, 2011).

2.4.2.1 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

Segundo Urbanetz Junior (2013), para fazer o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede usa-se a equação (3) e a equação (4).

$$P_{FV} = (E \cdot G) / (H_{TOT} \cdot PR) \quad (3)$$

$$A = (P_{FV} / E_{FF}) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

P_{FV} é a potencia fotovoltaica instalada (Wp);

E é a energia gerada pelo sistema fotovoltaico (Wh);

G é a irradiância nas condições padrão para ensaio ($1.000\text{W}/\text{m}^2$);

H_{TOT} é a irradiação diária (Wh/m^2);

PR é a *performance ratio* ou taxa de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede (0,7 a 0,8);

A é a área útil do painel (m^2);

E_{FF} é a eficiência da tecnologia do módulo.

Sendo o Wp (watt-pico) a unidade de medida da potência elétrica de um painel fotovoltaico quando em determinadas condições padrão: radiação solar de $1000\text{ W}/\text{m}^2$ a uma temperatura ambiente de $25\text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar igual a 1,5 (BERMAN, 2002).

2.5 SITUAÇÃO MUNDIAL E SITUAÇÃO BRASILEIRA ATUAL DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Segundo a Associação Européia da Indústria Fotovoltaica - EPIA (2013), mesmo em meio de uma crise mundial na área econômica, o mercado de energia solar fotovoltaica está em crescimento em nível mundial. No ano de 2012 houve um aumento de 31GWp de sistemas solares fotovoltaicas conectados à rede (contra 30,4 GWp em 2011), como mostrado na Figura 10.

No ano de 2012 a potência instalada de energia solar fotovoltaica ultrapassou 100 GWp no mundo, sendo que a Europa possui a maior quantidade de sistemas fotovoltaicos, quase 70% do total mundial, como pode ser visto na Figura 11. A Alemanha adicionou neste ano 7.604 MWp seguido pela Itália que também cresceu, 3.438 MWp, conforme a Figura 12 (EPIA, 2013).

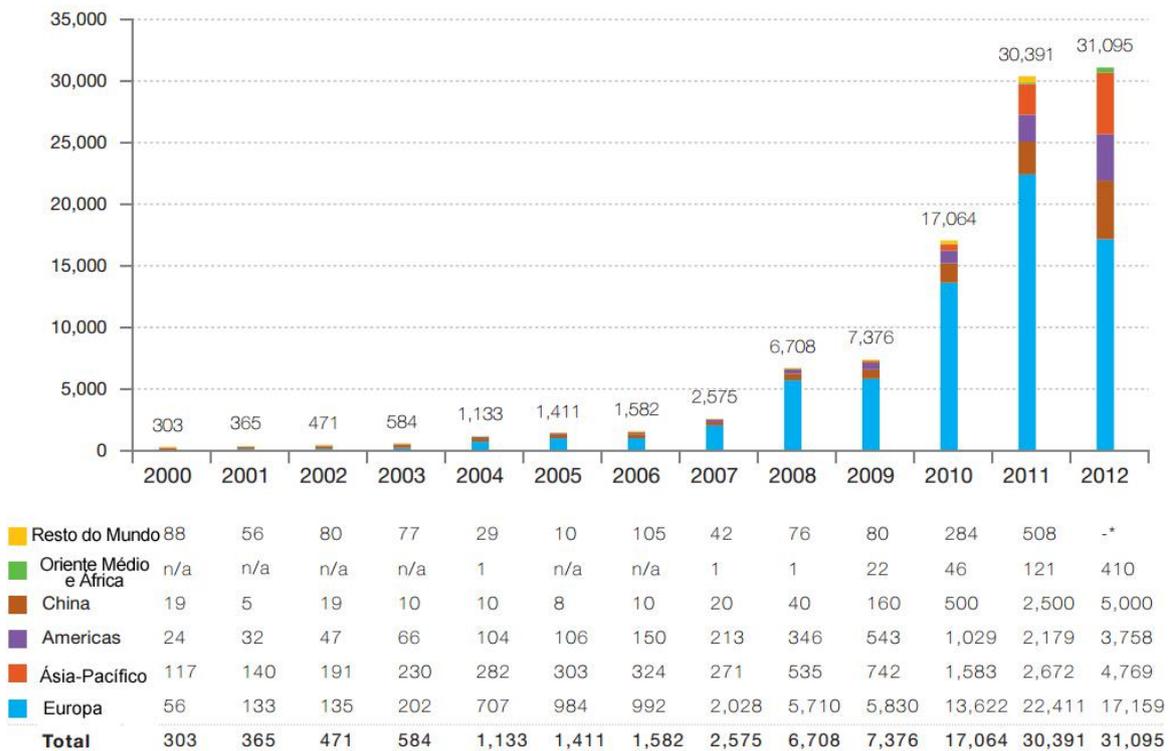


FIGURA 10- Evolução global anual de instalações de sistemas solares fotovoltaicas 2000 - 2012(MWp)

Fonte: EPIA (2013).

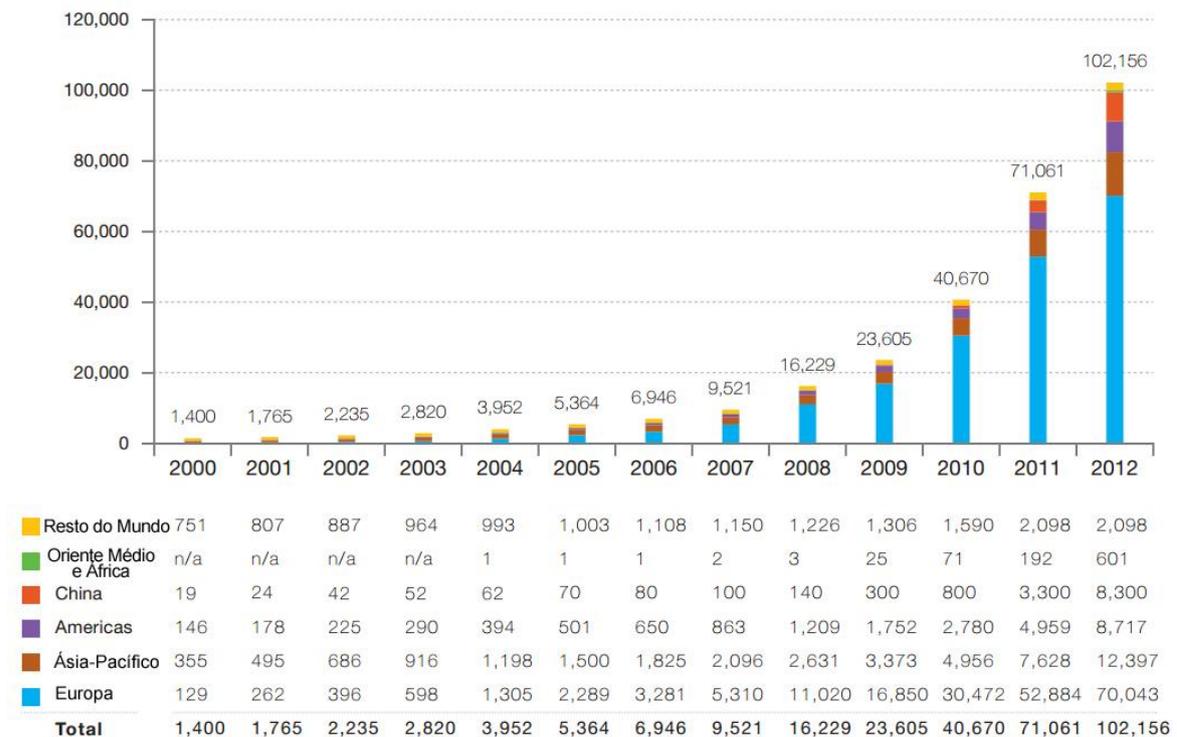


FIGURA 11 - Evolução global acumulada da capacidade instalada de energia fotovoltaica 2012 (MWp)

Fonte: EPIA (2013).

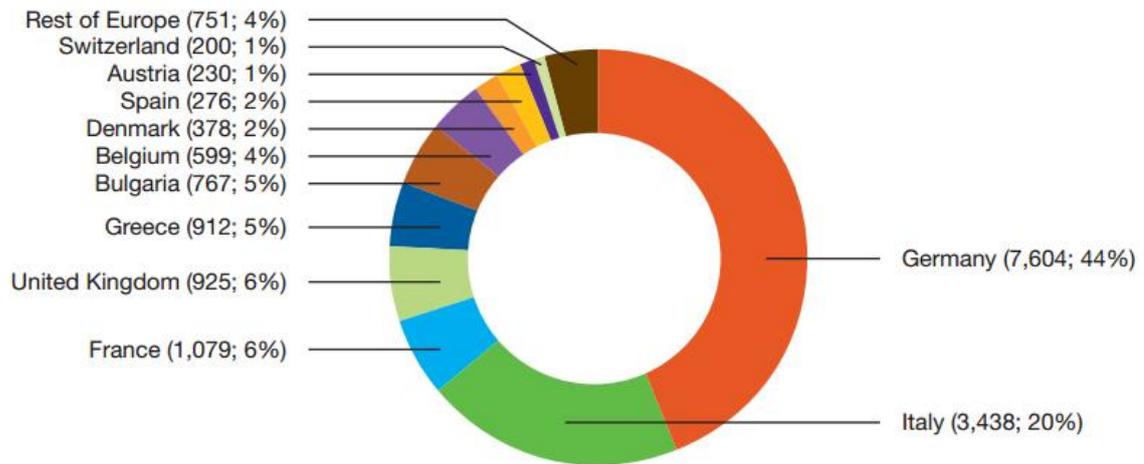


FIGURA 12 - Divisão do mercado europeu de energia fotovoltaica adicionada no ano de 2012 (MWp,%)

Fonte: EPIA (2013).

No mercado mundial é a Alemanha que apresenta a maior capacidade instalada de painéis fotovoltaicos. Até o final de 2012, o país possuía 32,4 GWp, seguido pela Itália, com 16,4GWp, China (8,3GWp), EUA (7,8GWp) e Japão, com cerca de 6,9GWp, como pode ser visto na Figura 13. Estes 5 países juntos obtiveram, somente no ano de 2012, um crescimento na capacidade instalada equivalente a dois terços do crescimento total do ano (31GW) (EPIA, 2013).

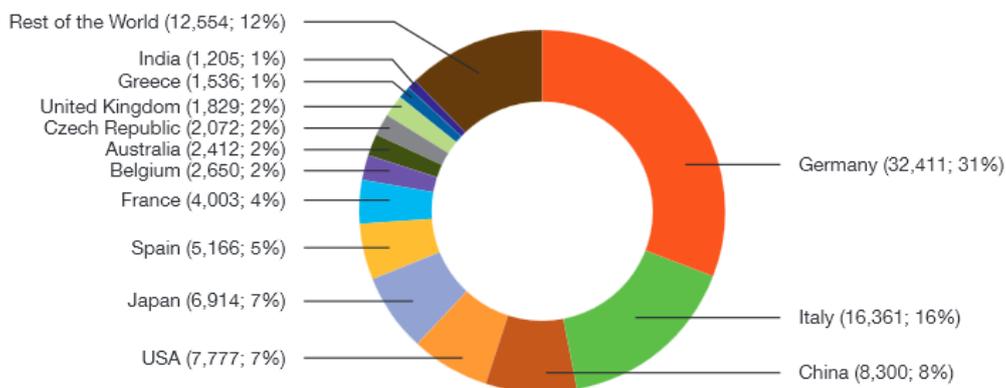


FIGURA 13 Capacidade instalada de energia fotovoltaica 2012 (MW,%)

Fonte: EPIA (2013).

A Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica - EPIA (2013), afirma que a energia solar fotovoltaica é, somente atrás da energia hidráulica e eólica, a terceira principal fonte de energia renovável em termos de capacidade instalada no mundo. No Brasil, os números ainda são desprezíveis em relação à Europa. Enquanto na Europa a capacidade

instalada é de 70.043 MWp, no Brasil, aproximadamente 3 MWp estão conectados à rede elétrica (URBANETZ JUNIOR, 2013)

2.5.1 Relatório da necessidade de energia até 2030 no Brasil

Segundo a ANEEL (2013), a principal fonte de energia elétrica no Brasil é a hidráulica, com uma potência instalada de geração elétrica de 85.494 MW, equivalente a 69% do total nacional, enquanto a energia solar total tem capacidade instalada de 2.758 kWp o que equivale a apenas 0,002%, como mostra a Tabela 1, e a capacidade instalada conectada à rede elétrica é de apenas cerca de 3 MWp.

TABELA 1- Capacidade de Geração do Brasil

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	421	256.047	0,21
Central Geradora Eólica	97	2.109.364	1,69
Pequena Central Hidrelétrica	462	4.569.748	3,66
Central Geradora Solar Fotovoltaica	30	2.758	0
Usina Hidrelétrica	193	80.668.224	64,67
Usina Termelétrica	1.752	35.138.012	28,17
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1,6
Total	2.957	124.734.153	100

Fonte: ANEEL (2013).

A matriz energética nacional é considerada uma das mais limpas do mundo, com 70,2% da oferta de energia elétrica brasileira proveniente de fontes renováveis, conforme Figura 14, enquanto a média mundial é menor que 20% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2013).

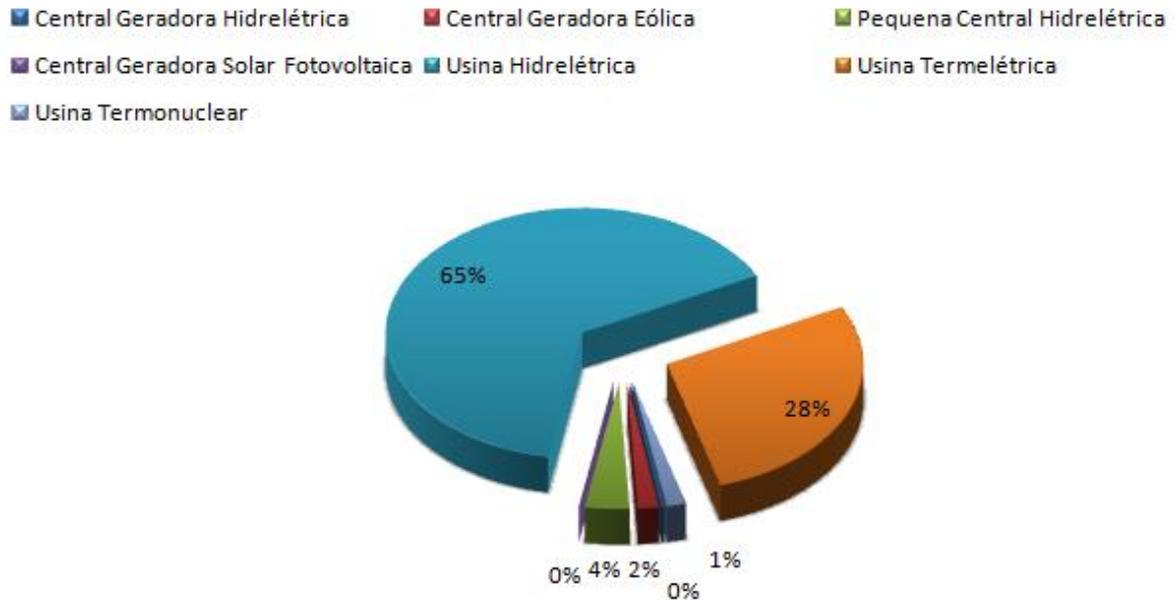


FIGURA 14 - Oferta de potência de geração elétrica (%)

Fonte: ANEEL (2013).

O Ministério de Minas e Energia - Brasil (2013) considera que cerca de 30% do potencial hidrelétrico brasileiro já está em aproveitamento, grande parte desta porcentagem está localizada próxima aos grandes centros urbanos, ou seja, o potencial não desenvolvido está em sua maioria localizado nas regiões norte e centro-oeste, como mostra a Figura 15.

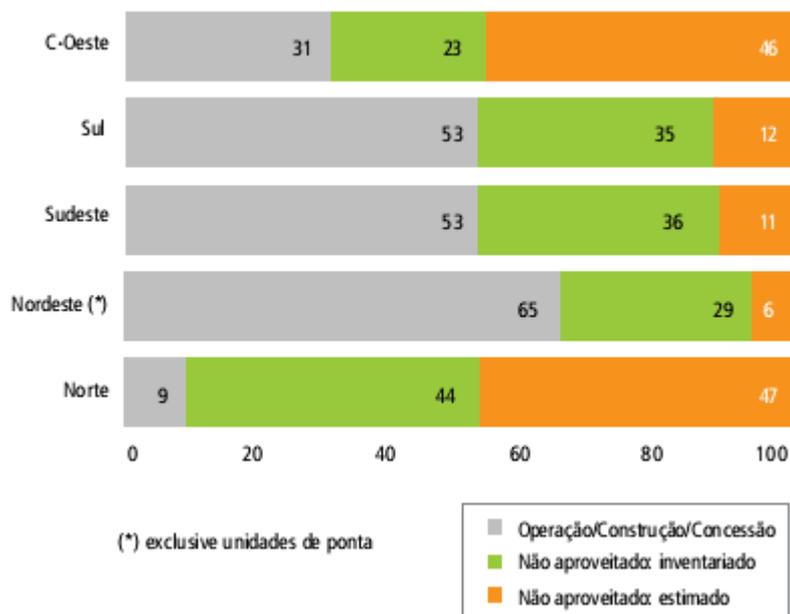


FIGURA 15 - Aproveitamento do potencial hidrelétrico brasileiro, por região (%)

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL (2007).

Estima-se que o consumo de energia elétrica em 2030 ficará entre 950 a 1.250 TWh/ano. Mesmo com a instalação de mais 140 mil MWh em energia elétrica proveniente de hidrelétricas, ou seja, 80% do potencial hidráulico brasileiro sendo aproveitado, este aumento pode não ser o suficiente para atender a demanda estimada para 2030 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2013).

2.5.2 Experiência do Escritório Verde

O escritório verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Curitiba, é um escritório sustentável que foi construído aplicando várias técnicas e produtos para testar a eficácia dos mesmos. Uma das técnicas aplicadas neste escritório é a da energia fotovoltaica. O sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde entrou em operação em 14 de dezembro de 2011 e gerou, até agosto de 2013, aproximadamente 4 MWh, e é composto por 10 módulos KYOCERA de silício policristalino, que possui uma potência instalada de 2,1 kWp, e um inversor monofásico de 220 V e 2 kW de potência nominal, conforme a Figura 16. A área ocupada na cobertura da edificação para este painel fotovoltaico é de apenas 15 m². O escritório verde produziu mais energia do que consumiu desde o início do seu funcionamento, sendo assim considerado uma edificação de energia positiva, ou seja ele exportou energia (adaptado de URBANETZ JUNIOR; CASAGRANDE JUNIOR, 2012).



FIGURA 16 - Painel fotovoltaico e inversor instalados no escritório verde da UTFPR.

Fonte: URBANETZ JUNIOR; CASAGRANDE JUNIOR (2012).

3 CENÁRIOS PARA A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

3.1 PREMISSAS ADOTADAS PARA OS CÁLCULOS

O Ministério de Minas e Energia – Brasil (2007) estima que o consumo de energia elétrica em 2030 ficará entre 950 e 1.250 TWh/ano, sendo que no ano de 2012 o consumo de energia elétrica no país foi de 498,4 TWh/ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – BRASIL, 2013), isso indica que haverá um crescimento no consumo de 90 a 150%.

Este capítulo apresenta um estudo quantitativo da área necessária para instalação de painéis fotovoltaicos visando o atendimento do crescimento da demanda prevista pelo Ministério de Minas e Energia para 2030.

Assim, nesta pesquisa criou-se 3 cenários para a geração de energia em 2030:

1. o primeiro cenário prevê a energia fotovoltaica suprimindo 10% do crescimento de demanda mínimo previsto;
2. o segundo cenário prevê a energia fotovoltaica suprimindo 10% do crescimento de demanda máximo previsto;
3. o terceiro cenário foi construído para verificar-se qual seria a área de painéis fotovoltaicos necessária para suprir o consumo atual de energia elétrica.

Sendo que, para o 1º e o 2º cenário o restante do crescimento da demanda (90%) deve ser atendida por outras fontes de energia elétrica cujo planejamento deve ser feito pelo governo brasileiro.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar (2005) tem como objetivo suprir parte da demanda de informações por meio da divulgação do levantamento da disponibilidade de energia solar no território brasileiro utilizando um modelo de transferência radiativa alimentado por dados climatológicos e de 10 anos de informações extraídas de imagens de satélite geoestacionário e validado por dados coletados em estações de superfície. O mapeamento do potencial energético solar apresentado nos Atlas é um dos produtos gerados pelo Projeto SWERA. A partir dos dados contidos no Atlas Brasileiro de Energia Solar foi feita uma média, para descobrir qual a média nacional de radiação no plano inclinado, mostrado na Figura 17. Para o valor de H_{tot} (irradiação diária) foi utilizado o valor de 5,52 kWh/m².dia, sendo que este representa o valor médio anual no plano inclinado, do total diário obtido para as principais regiões do Brasil (PEREIRA et al., 2006).

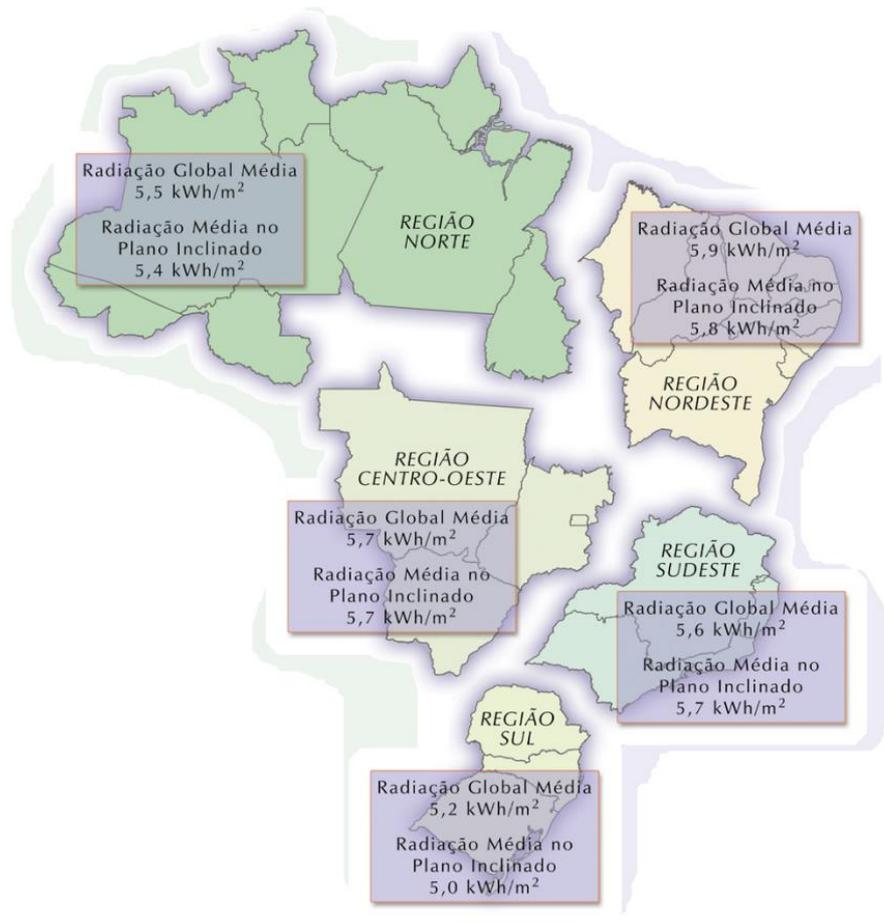


FIGURA 17 - Potencial anual médio de energia solar para cada região do Brasil.

Fonte: PEREIRA et al. (2006).

Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global (5,52 kWh/m²) apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global - 5,8 kWh/m² - ocorre no norte do Estado da Bahia, conforme a Figura 18, próximo à fronteira com o Estado do Piauí. Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano (aproximadamente 300 mm/ano) e a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil. A menor irradiação solar global - 4,25 kWh/m² - ocorre no litoral norte de Santa Catarina, como pode ser visto na Figura 18, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano (PEREIRA *et al.*, 2006).

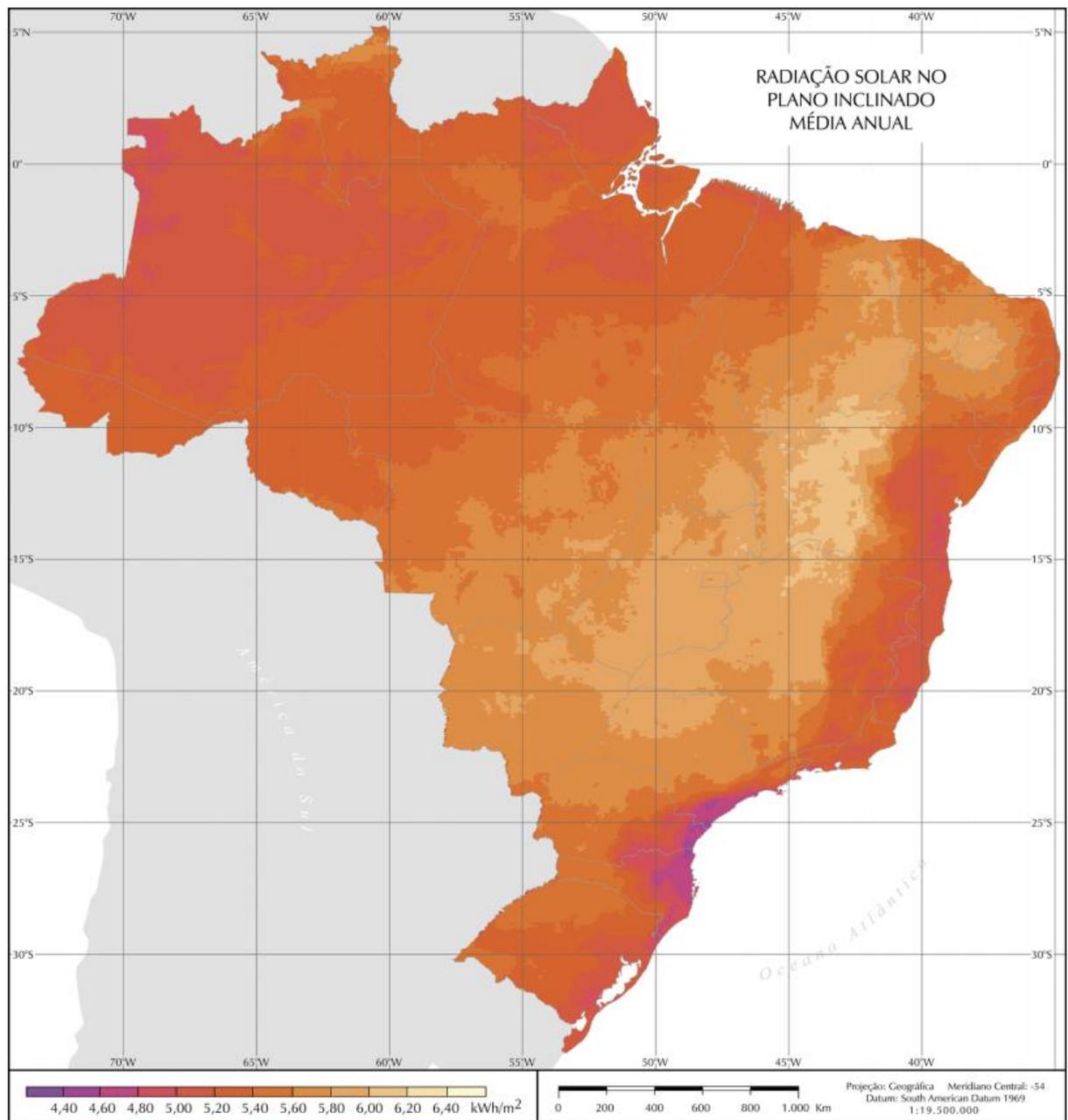


FIGURA 18 - Mapa brasileiro da média anual da radiação solar no plano inclinado.

Fonte: PEREIRA *et al.* (2006).

O valor para PR (*Performance Ratio*) utilizado será de 0,75. O desempenho global é um valor adimensional, que mostra o efeito total de perdas em um sistema fotovoltaico, indicando o quanto sua operação se aproxima da ideal ($PR = 1$), e permite comparar sistemas independentemente da localização geográfica, posicionamento do gerador fotovoltaico e potência nominal, pois normaliza a produtividade em relação à irradiação. Valores típicos de desempenho global figuram 0,6 e 0,9 (PINTO FILHO, 2012). Uma análise de desempenho, realizada pela Agência Internacional de Energia com um total de 334 sistemas fotovoltaicos em 14 países com 1.142 séries anuais (alguns sistemas possuem mais de um ano de

medições), mostrou que a grande maioria dos sistemas tem seu desempenho global na faixa mencionada (JAHN; NASSE, 2003). A Figura 19 resume os resultados. No entanto, sistemas ótimos apresentam um desempenho global acima dos 0,75 (ALMEIDA, 2012).

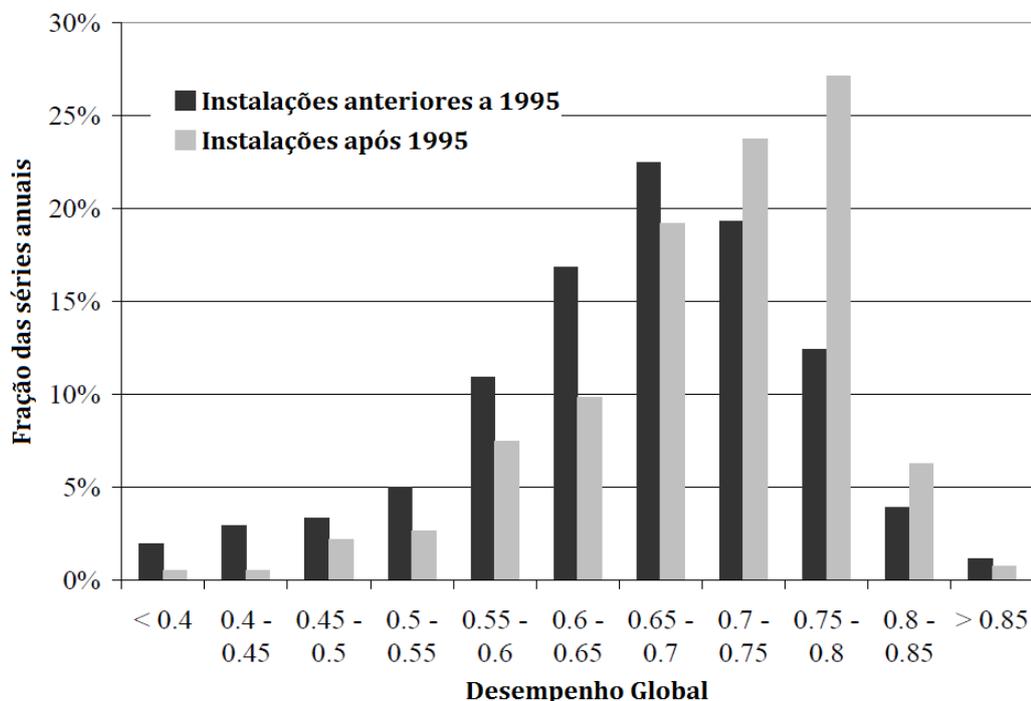


FIGURA 19 - Distribuição do desempenho global de 334 sistemas fotovoltaicos (1.142 conjuntos de séries anuais) em 14 países em dois períodos diferentes de instalação.

Fonte: ALMEIDA,(2012).

Para a eficiência da tecnologia do módulo (E_{FF}), o valor utilizado será de 14%. A eficiência das células de silício monocristalino e policristalino é de aproximadamente 14% e as de filmes finos (de silício amorfo e outros materiais) apresentam eficiência na faixa de 7,5 a 13% (CELEMÍN; PLASENCIA; PERDICES, 2008).

O valor de 1.000 W/m^2 ou 1 kW/m^2 foi utilizado para a variável G – constante solar, que indica a irradiância solar recebida na Terra. A radiação emitida pelo sol, situado a uma distância aproximada de 150 milhões de quilômetros da Terra, ao atingir a camada externa da atmosfera terrestre possui uma intensidade de 1.367 W/m^2 , este valor é conhecido como constante solar. Este é o valor utilizado quando os módulos fotovoltaicos encontram-se no espaço, fora da atmosfera terrestre. Assim, nas aplicações espaciais de conversão da energia solar em energia elétrica, toda essa energia pode estar disponível na superfície dos dispositivos de conversão fotovoltaica. Contudo, nas aplicações terrestres, a propagação da radiação solar na atmosfera vai sofrer os efeitos atenuantes do espalhamento e da absorção, resultando em uma irradiância de aproximadamente 1.000 W/m^2 , ao meio dia solar na

superfície terrestre em dias sem nuvens, sendo esse o valor considerado no dimensionamento de sistemas solares para a geração de eletricidade (URBANETZ JUNIOR, 2010).

3.2 CÁLCULOS

3.2.1 1º Cenário

O primeiro cenário prevê a energia fotovoltaica suprimindo 10% do crescimento do consumo de energia elétrica mínimo previsto, e a irradiação diária (H_{TOT}) de 5,52 kWh/m².dia.

Primeiramente determina-se qual a previsão de crescimento do consumo de energia elétrica.

$$950 \text{ TWh/ano} - 498,4 \text{ TWh/ano} = 451,6 \text{ TWh/ano}$$

Com o valor da previsão acima, determina-se o quanto 10% representa.

$$E = 10\% \text{ de } 451,6 \text{ TWh/ano} = 45,16 \text{ TWh/ano}$$

Dividindo o valor da energia anual calculado acima pelos 365 dias do ano, determina-se qual é a energia que deve ser gerada diariamente pelo sistema fotovoltaico.

$$E = \frac{45,16}{365} = 0,1237 \text{ TWh/dia} = 123.700.000 \text{ kWh/dia}$$

Utilizando a equação (3) tem-se:

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot PR}$$

$$P_{FV} = \frac{123.700.000 \times 1}{5,52 \times 0,75}$$

$$P_{FV} = 29.879.227,05 \text{ kWp}$$

$$P_{FV} = 29,9 \text{ GWp}$$

E para determinar qual a área de painéis fotovoltaicos que será necessária para gerar essa energia, utiliza-se a equação (4):

$$A = \left(\frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \times 100$$

$$A = \left(\frac{29.879.227,05}{14} \right) \times 100$$

$$A = 213.423.050,4 \text{ m}^2$$

$$A = 213,4 \text{ km}^2$$

Tem-se assim a necessidade de uma área de 213,4 km² de painéis fotovoltaicos significando uma potência fotovoltaica instalada de 29,9 GWp. Esse número representa 10% da previsão mínima de crescimento de 2012 a 2030, sendo que na demanda total prevista para 2030 representa o valor de 4,75%.

A Figura 10 mostra que em 2012 foi instalado no mundo 31 GWp em sistemas fotovoltaicos, isso significa que seria necessário aproximadamente 96% da produção de um ano para atender este 1º cenário, para uma situação mais realista, diluindo este valor nos 17 anos faltantes até 2030, seria necessária a instalação de 1,76 GWp por ano, a partir do ano de 2013 para alcançar o valor calculado.

A área de 213,4 km² equivale a 49,1% da capital do Paraná, ou seja, para que fosse aplicado o 1º cenário seria preciso de uma área equivalente a menos da metade de Curitiba, como mostra a Figura 20, que possui uma área de 434,9 km² (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2013).

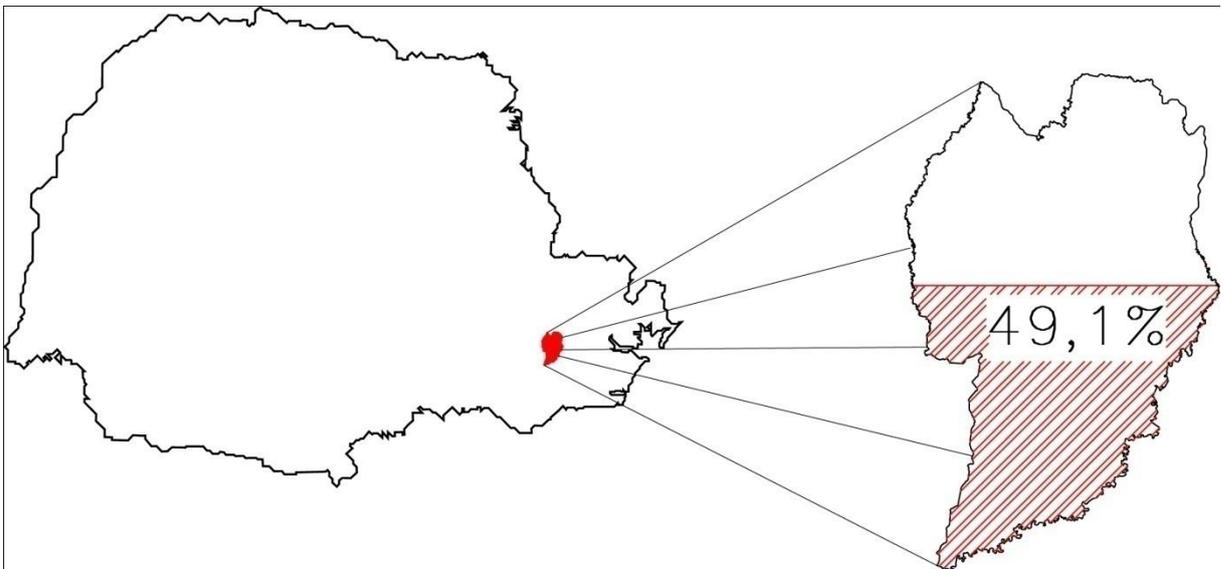


FIGURA 20- Localização de Curitiba no Estado do Paraná e porcentagem (49,5%) da área equivalente à necessária para o 1º cenário

3.2.2 2º Cenário

O segundo cenário prevê a energia fotovoltaica suprindo 10% do crescimento do consumo de energia elétrica máximo previsto.

Primeiramente determina-se qual o valor de E:

$$E = 10\% \text{ de } (1.250 \text{ TWh/ano} - 498,4 \text{ TWh/ano}) = 75,16 \text{ TWh/ano}$$

Transformando a energia de anual para diária temos.

$$E = \frac{75,16}{365} = 0,2059 \text{ TWh/dia} = 205.900.000 \text{ kWh/dia}$$

Utilizando a irradiação diária (H_{TOT}) de $5,52 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ e substituindo na equação (3):

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot PR}$$

$$P_{FV} = \frac{205.900.000 \times 1}{5,52 \times 0,75}$$

$$P_{FV} = 49.734.299,52 \text{ kWp}$$

$$P_{FV} = 49,7 \text{ GWp}$$

Determinada qual é a potencia fotovoltaica a ser gerada, utiliza-se a equação (4) para verificar qual será a área útil necessária para a instalação dos painéis fotovoltaicos

$$A = \left(\frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \times 100$$

$$A = \left(\frac{49.734.299,52}{14} \right) \times 100$$

$$A = 355.244.996,5 \text{ m}^2$$

$$A = 355,2 \text{ km}^2$$

Portanto para o 2º cenário serão necessários $355,2 \text{ km}^2$ de painéis fotovoltaicos, significando uma potência fotovoltaica instalada de $49,7 \text{ GWp}$. Diferentemente do 1º cenário, a produção mundial do ano de 2012 (31 GWp) não seria suficiente para atingir a meta deste cenário, supondo a distribuição da instalação dos módulos ao longo dos 17 anos que faltam para 2030, seria necessária a instalação de $2,9 \text{ GWp}$ por ano.

Neste cenário a energia solar fotovoltaica representaria 6% da produção de energia elétrica de 2030, e ocuparia uma área equivalente a 82,4% da cidade de Curitiba (PR), como mostrado na Figura 21.

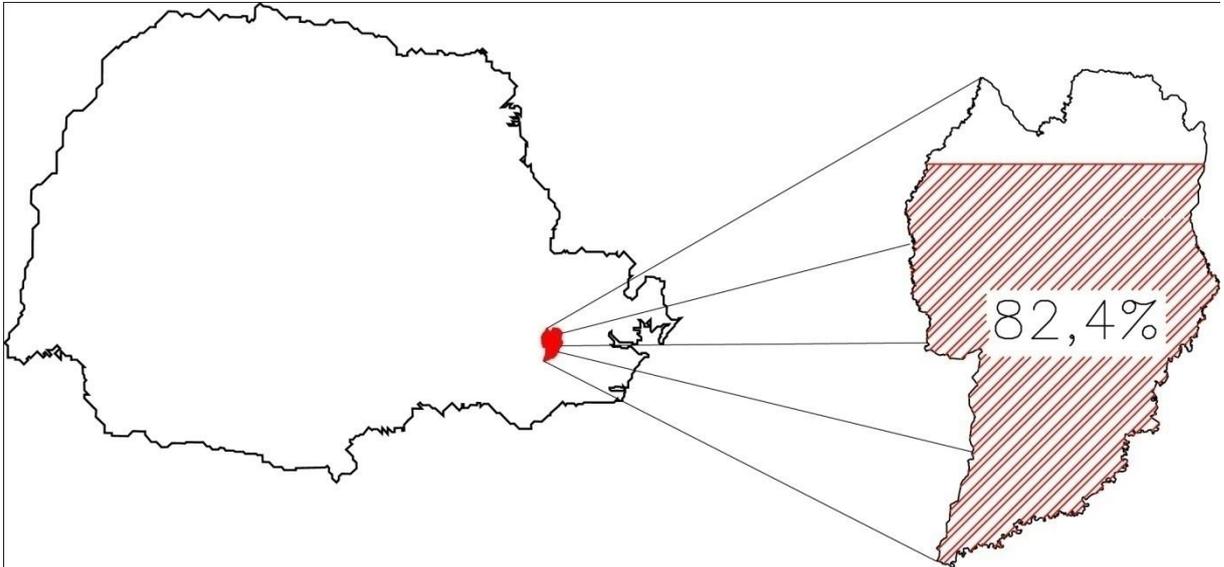


FIGURA 21 - Localização de Curitiba no Estado do Paraná e porcentagem (82,4%) da área equivalente à necessária para o 2º cenário

3.2.3 3º Cenário

Neste cenário é calculada a área de painéis fotovoltaicos para suprir o consumo de energia elétrica do ano de 2012, que era de 498,4 TWh/ano, ou 1,3655 TWh/dia.

$$E = \frac{498,4}{365} = 1,3655 TWh/dia = 1.365.500.000 kWh/dia$$

Substituído os valores na equação (3) tem-se:

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot PR}$$

$$P_{FV} = \frac{1.365.500.000 \times 1}{5,52 \times 0,75}$$

$$P_{FV} = 329.830.917,9 kWp$$

$$P_{FV} = 329,8 GWp$$

Substituído o valor da potência fotovoltaica instalada e da eficiência do módulo na equação (4):

$$A = \left(\frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \times 100$$

$$A = \left(\frac{329.830.917,9}{14} \right) \times 100$$

$$A = 2.355.935.128 \text{ m}^2$$

$$A = 2.355,9 \text{ km}^2$$

Para suprir a demanda atual de energia elétrica seria necessária uma potência fotovoltaica instalada de 329,8 GWp e uma área de 2.355,9 km² de painéis fotovoltaicos. Isso equivale a 5,42 cidades de Curitiba, conforme Figura 22.

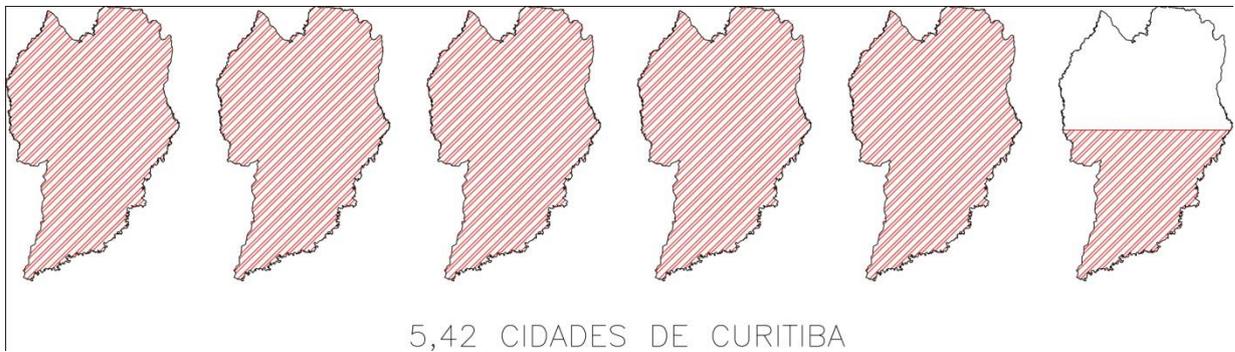


FIGURA 22 - Área de painéis necessária para o 3º cenário

3.3 RESUMO DOS RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos três cenários apresentados.

TABELA 2 - Relação entre demandas e áreas

Cenários	Potência fotovoltaica instalada (GWp)	Área de painéis (km ²)
1º Cenário	29,9	213,4
2º Cenário	49,7	355,2
3º Cenário	329,8	2.355,9

3.4 ANÁLISES

3.4.1 Comparação com hidrelétricas

A principal fonte de energia elétrica no Brasil é a hidráulica, mas esse tipo de energia provoca grandes alagamentos, que ocorrem no período de construção das usinas, a Tabela 3 mostra a área inundada de algumas usinas brasileiras. Comparando estes dados com o resultado obtido no 3º cenário, nota-se que neste, para cada 1 km² do cenário, tem-se aproximadamente 140 MWp de potência fotovoltaica instalada, enquanto que para a usina de Itaipu esta relação é de 1 km² para 10,4 MW. Nota-se também que a usina de Tucuruí tem uma área de inundação parecida com a área necessária de painéis do último cenário, mas comparando a capacidade instalada a energia solar fotovoltaica ultrapassaria os 329,8 GWp necessários para gerar os atuais 498,4 TWh/ano de energia elétrica .

TABELA 3 - Área inundada e capacidade instalada de algumas usinas brasileiras

Usina	Área inundada (km ²)	Fator de Capacidade	Capacidade instalada (MW)
Itaipu (PR)	1.350	83%	14.000
Tucuruí (PA)	2.430	49%	8.370
Porto Primavera (SP)	2.250	66%	1.540
Sobradinho (BA)	4.214	51%	1.050

Fonte: ITAIPU BINACIONAL (2013), MARCATO (2008).

Segundo Urbanetz Junior e Casagrande Junior (2012), o fator de capacidade de um sistema fotovoltaico, instalado na cidade de Curitiba é de 14,5%. Comparando-se com os valores apresentados na Tabela 3 percebe-se que as usinas fotovoltaicas possuem fator de capacidade inferior ao das usinas hidrelétricas, cerca de 3 a 6 vezes menor, o que significa que a quantidade de energia elétrica gerada por uma usina hidrelétrica, de mesma potência instalada que uma fotovoltaica, é de 3 a 6 vezes maior.

Segundo a Cidade de Tucuruí (2013), a usina de Tucuruí levou 9 anos para ser construída (1975-1984). Já o tempo de implantação de sistemas geradores de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos é bastante curto. A ativação do sistema depende basicamente da instalação dos painéis, da cabeção e do inversor junto à carga. O sistema disponibiliza a

energia elétrica em curtíssimo prazo. Um exemplo é o escritório verde que teve seu sistema de 2,1 kWp instalado em poucos dias.

As vantagens da geração distribuída em relação às opções de geração centralizada são várias, entre elas a integração às edificações não necessitando área adicional para sua implementação, pode ser utilizada no meio urbano junto ao ponto de consumo com a eliminação/diminuição das perdas por não necessidade de ampliar ou repotencializar as linhas de transmissão e distribuição. A geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos é condizente com o modelo da geração distribuída. Sendo altamente modular, pode ser instalada nas edificações existentes, passando a gerar energia elétrica em um curto espaço de tempo e devido a essa flexibilidade, os ajustes devido a taxas de crescimento da demanda podem ser realizados rapidamente, reduzindo o risco associado a erros de planejamento tanto nos casos de sub dimensionamento como também de sobre dimensionamento já que os componentes do sistema fotovoltaico podem ser remanejados com facilidade.

A principal desvantagem do sistema fotovoltaico é a dependência de horas de brilho de sol, resultando na necessidade de sistemas complementares.

3.4.2 Uso e ocupação do solo *versus* área para o sistema fotovoltaico

Rossi e Krüger (2004) realizaram nos anos de 2002 e 2003 um levantamento em alguns bairros da cidade de Curitiba, das porcentagens de ocupação de solo em catorze locais da cidade: Bairro Alto, Cajuru, Fazendinha, Portão, Santa Felicidade, São Brás, São Lourenço, Barreirinha, Campo Comprido, Cidade Industrial, Mercês, Pinheirinho, Santa Quitéria e Xaxim.

Em cada bairro foi obtida uma foto aérea de uma área com aproximadamente 49.000 m². Foi realizado um quantitativo de cada área para estabelecer qual era a porcentagem dos seguintes elementos: área verde (matas e bosques), área construída, área pavimentada, área livre (gramados, plantações e terra batida) e área de água (piscinas, rios, córregos e lagos), o resultado pode ser visto na Tabela 4 (ROSSI; KRÜGER, 2004).

Com esta amostra, pode-se calcular uma média aproximada da área construída em Curitiba, ou seja, 24,05% da cidade é formada por edificações. Segundo a Prefeitura Municipal de Curitiba (2013), a cidade possui uma área de 434,967 km². Com isso conclui-se que aproximadamente 104,61 km² da cidade de Curitiba é composta de edificações.

TABELA 4- Porcentagens de ocupação do solo para catorze locais de Curitiba

Localidades	Água (%)	Construída(%)	Livre(%)	Pavimentada(%)
Bairro Alto	0	23,69	43	30,62
Cajuru	0	24,51	51,32	24,17
Fazendinha	0	25,76	24,42	43,33
Portão	0	22,23	35,47	31,2
Santa Felicidade	0	12,74	63,25	24,01
São Brás	0	24,56	52,26	12,98
São Lourenço	0	13,2	42,43	26,88
Barreirinha	0	37,27	13,64	45,37
Campo Comprido	0	25,74	18,27	24,04
Cidade Industrial	0	34,99	34,11	26,33
Mercês	0,95	20,23	45,05	28,28
Pinheirinho	0	25,22	37,23	35,82
Santa Quitéria	0,1	19,89	31,8	30,29
Xaxim	0	26,67	29,17	41,25

Fonte: Adaptado de Rossi e Krüger (2004).

Se for utilizada a área de todos os telhados de edificações, ignorando a orientação destes, comparando-se esta área com as áreas apresentadas na Tabela 2, percebe-se que para o 3º cenário (onde se calcula a área de painéis necessária para atender a demanda atual) seriam necessárias 22,5 cidades de Curitiba para atingir a área calculada. Já para o 1ª cenário (onde a área de painéis necessária para atender a demanda tem seu valor mais baixo), precisaria de aproximadamente 2 cidades de Curitiba para atender a demanda simulada. Tudo isso utilizando apenas áreas já ocupadas, não havendo necessidade de utilização de áreas adicionais.

Outro estudo realizado sobre a ocupação urbana foi feito pela EMBRAPA. Este estudo apresenta um mapeamento e uma estimativa da área urbanizada no Brasil, por este estudo, Curitiba tem uma área urbanizada de 319,47 km² (MIRANDA; GOMES; GUIMARÃES, 2005). Os dois estudos mostram resultados diferentes, portanto será feita uma análise comparativa com este resultado também.

Utilizando-se apenas áreas urbanizadas, ignorando a orientação das edificações, Curitiba seria suficiente para atender integralmente o 1º cenário e 90% do 2º cenário. Sendo que este segundo estudo não especifica o que ele classifica como área urbanizada, ou seja, ele pode estar incluindo nesta área a pavimentação e espaços livres no meio da malha urbana.

O estudo de Miranda, Gomes e Guimarães (2005), estima que há aproximadamente 21.285 km² de área urbanizada no país, mesmo que neste número estejam inclusas outras áreas, ela é suficiente para atender a qualquer um dos três cenários apresentados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado deste estudo de área necessária para painéis fotovoltaicos pode ser comparado com a área total do território brasileiro. Sendo esta de 8.515.767 km², observa-se que o valor mais alto de área a ser utilizada (355,2 km²) não chega a 0,005% da área do território brasileiro. Mesmo para atendimento de 100% do consumo atual de energia elétrica, 498,4 TWh/ano, a área total necessária ficaria em 2.355,9 km², em termos percentuais, não chega a 0,03% da área do território brasileiro.

Em termos de valores de irradiação solar, vale observar que os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m²/ano) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²/ano), França (900-1650 kWh/m²/ano) e Espanha (1200-1850 kWh/m²/ano) (PEREIRA et al., 2006). E estes países investiram, e continuam investindo, maciçamente na energia solar fotovoltaica como pode ser observado nas figuras apresentadas.

Ao contrário das demais fontes de geração de energia que exigem áreas adicionais para sua construção, se os módulos fotovoltaicos forem integrados à edificação, não há necessidade de ampliação ou repotencialização das linhas de transmissão e distribuição da fonte geradora até o local de consumo da energia gerada, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede apresentam esta vantagem da fonte já estar próxima do local de consumo, diminuindo a necessidade dessas linhas que podem até, apresentar um entrave para ampliação do fornecimento de energia.

Como exemplo, há o caso dos parques eólicos da região de Caetitê, na Bahia, com quase 300 MW de potência, sendo o maior conjunto eólico da América Latina. Depois de 17 meses de obras e de um investimento da ordem de R\$1,2 bilhão, o empreendimento ficou pronto em julho de 2012, porém o sistema de transmissão necessário para conectá-lo ao Sistema Interligado Nacional (SIN) inclui uma linha de 120 km de extensão que não foi construída pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), responsável pela obra, com previsão de conclusão somente para setembro de 2013 quando só então entrará no sistema.

Observa-se que a quantidade de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica, instalada no mundo, teve aumento na ordem de 31 GWp em um ano, como se observa nos anos de 2011 e de 2012. A China implantou cerca de 2,5 GWp em 2011 e 5 GWp

em 2012. Para atingir o valor de 10% do mínimo de oferta de energia elétrica calculado neste trabalho, ou seja, 29,9 GWp ou cerca de 213,4 km² de painéis fotovoltaicos, seriam necessárias a aquisição e a instalação de valores da ordem dos instalados no mundo em um único ano. Fisicamente é possível, considerando que a produção dos painéis fotovoltaicos continue neste mesmo ritmo, mas a viabilidade e as implicações quanto ao aspecto econômico teriam que ser consideradas.

Quanto ao aspecto econômico, apesar de não ser o foco deste trabalho, cabe citar como exemplo, a informação contida na ata da 131^a Reunião Ordinária do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) ocorrida em 03/07/2013 com a presença Ministro de Minas e Energia, Edison Lobão. Deliberou-se pelo desligamento de um grupo de térmicas que corresponde a 3.850 MW de capacidade instalada, pois como consequência há a expectativa de redução de aproximadamente R\$ 1,4 bilhões no custo mensal de operação. A Empresa de Pesquisa Energética, na Nota Técnica de maio 2012, estimou os custos de instalação de um sistema fotovoltaico entre R\$ 6,89 a R\$ 7,66 o Wp para sistemas residenciais (<10 kWp), R\$ 5,91 o Wp para sistemas comerciais (100 kWp) e de R\$ 5,20 o Wp para sistemas industriais e usinas (>1000 kWp). Calculando o valor para uma instalação fotovoltaica com capacidade de 3.850 MWp, obtêm-se os valores aproximados de R\$ 20 bilhões para colocar esta usina funcionando ou cerca de R\$ 29,5 bilhões considerando o sistema fotovoltaico distribuído nas residências. Comparando com o custo mensal de uma térmica, em 15 meses o sistema fotovoltaico estaria pago no caso de uma usina ou em 21 meses para sistemas distribuídos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2013).

A expansão da capacidade instalada por meio de usinas movidas a combustíveis fósseis envolve elevados custos de operação, conforme exemplificado no parágrafo acima, além de prejudicar a atual situação da matriz de geração elétrica brasileira considerada limpa e renovável. Observa-se também que a segurança no suprimento dos combustíveis é também preocupação manifestada em reuniões do CMSE (Ata da 118^o Reunião de 22/10/2012), pois exige planejamento com antecedência por parte dos fornecedores.

A capacidade de geração fotovoltaica poderá ser aproveitada complementarmente às outras formas de geração, principalmente com relação à geração hidrelétrica. Se por um lado a geração fotovoltaica depende de sol, a geração hidrelétrica depende de chuvas. Durante o dia a energia solar provê o atendimento à demanda enquanto os reservatórios das usinas hidrelétricas são poupados.

Com tudo isso se conclui que a energia solar fotovoltaica conectada à rede é uma opção muito viável para complementar a demanda prevista para 2030, além da vantagem da possibilidade de utilização de áreas já construídas para fixação dos painéis, é facilmente instalada em centros urbanos, diminuindo os investimentos em linhas de transmissão e distribuição, contribuindo na diversificação da oferta de energia elétrica, fator este importante para a segurança do suprimento energético e, principalmente, é uma energia considerada limpa e é renovável.

REFERÊNCIAS

ABREU, Luis. **Vantagens do Uso da Biomassa**. Disponível em: <<http://imooc.uab.pt/blog/view/12921/biomasa-menos-co2>>. Acesso em: 24 de set. 2013.

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

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, 2005.

_____. **Banco de Informação de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15>>. Acesso em: 23 de set. 2013.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 2 v.

BAUER, Wolfgang; WESTFALL, Gary D.; DIAS Helio. **Física para Universitários - Eletricidade e Magnetismo**. São Paulo: AMGH Editora LTDA, 2012.

BERMAN, Célio. **Energia No Brasil, Para Que? Para Quem?: Crise E Alternativa Para Um País Sustentável**. São Paulo: Livraria da Física, 2002.

BORGES, Cristiano M. **Energia, capitalismo inclusivo e desenvolvimento sustentável: chaves para a quebra de um paradigma**. Dissertação de Mestrado em Energia, Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, SP. 2007.

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

CASTRO, Adriana P. de A. S.; LABAKI, Lucila C.; CARAM, Rosana M.; BASSO, Admir; FERNANDES, Mauro R. **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p.69-76, mai/jun. 2003.

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

CELEMÍN, María D. R. H.; PLASENCIA, IgnacioG.; PERDICES, Mercedes B. **Fuentes De Energía Para El Futuro**. Madrid: Secretaria de Estado de Educación y Formación, Instituto superior de formación y Recursos para el Profesorado, 2008.

CIDADE DE TUCURUÍ, **Histórico da Usina.** Disponível em: <http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/CONSTRU%C3%87%C3%83O/CONSTRU%C3%87%C3%83O.htm>. Acesso em: 04set. 2013.

CORATO, Lucas L.; NAKANISHI, Tatiana M.; CARAM, Rosana. M. **Inovações tecnológicas em fachadas transparentes a partir da década de 70.** In: ENCAC, VI., 2001, São Pedro, SP.

DIONYSIO, Renata B.; MEIRELLES, Fatima V. P. **Combustíveis: A química que move o mundo.** Disponível em: <<http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

EGIDO, Miguel A.; MONTERO, Mercedes; ARRIBAS, Luis. **Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación Al Desarrollo.** Madrid: Iepala, 1999.

ELETROBRAS. Ministério de Minas e Energia. **Energia nuclear.** Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Espa%C3%A7odoConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx>>. Acesso em: 26 jun. 2013.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION - EPIA. **Global Market Outlook For Photovoltaics 2013-2017.** Bélgica. Disponível em: <<http://www.epia.org/>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

FREITAS, Fábio E. **Célula Solar se SNO₂/TIO₂ Preparada por "Spray" - Pirólise Ativada com Corante Orgânico.** Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP. 2006.

FROTA, Anésia. B.; SCHIFFER, Sueli. T. R. **Manual de conforto térmico: Arquitetura, Urbanismo.** 8. ed. São Paulo: Nobel, 2007. 243 p.

GALLI, Cláudio. **Sobre Volta, Batatas e Fótons.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2003.

GHENSEV, Almir. **Materiais e Processos de Fabricação de Células Fotovoltaicas.** Monografia de Especialização em Fontes Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras, MG. 2006.

GREEN, Martin A.; EMERY, Keith; HISHIKAWA, Yoshihiro; WARTA, Wilhelm; DUNLOP, Ewan D. **Solar cell efficiency tables (version 40).** Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2012. Disponível em:<<http://pt.scribd.com/doc/112081383/Green-Et-Al-2012-Solar-Cell-Efficiency-Tables-Version-40>>. Acesso em: Set. 2013.

HASHIMURA, Luís de M. **Aproveitamento do Potencial de Geração de Energia Elétrica por Fontes Renováveis Alternativas no Brasil: Instrumentos de Política e Indicadores e Progresso.** Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 2012.

HEWITT, Paul G.; RICCI, Trieste F.; GRAVINA, Maria H.; CAVALCANTI, Cláudio J. H. **Física Conceitual.** Porto Alegre: 2008.

HOPKINSON, Ralph G.; PETHERBRIDGE, Peter; LONGMORE, James. **Iluminação Natural.** 1975 Calouste Gulbenkian, Lisboa, 776p.

INSTITUTO VITAE CIVILIS, **Boas práticas em Energia Solar.** São Paulo - SP. Disponível em: <<http://www.vitaecivilis.org.br/>>. Acesso em: 24jul. 2013.

ITAIPU BINACIONAL. **Energia hidráulica.** Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

JAHN, Ulrike; NASSE, Wolfgang. **Performance analysis and reliability of grid-connected PV systems in IEA countries.** 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japão: 2003.

JANNUZZI, Gilberto. D. M.; SWISHER, Joel N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis.** Campinas, Autores Associado, 1997.

JUCÁ, Sandro C. S.; CARVALHO, Paulo C. M. de. **Métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos: Aplicações em dessalinização.** 1 ed. Duque de Caxias, 2013.

LANDSBERG, J. J.; SANDS, Peter J.; **Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models.** Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2011.

MARCATO, Miracyr A. **ITAIPU – Energia e diplomacia.** Revista Engenharia, ed. 589. 2008

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL. **Balço Energético Nacional - Ano Base 2012.** Brasília, 2013.

_____. **Matriz Energética Nacional 2030.** Brasília, 2007.

_____. **Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2012**. Brasília, 2013.

_____. **CMSE**. Disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/menu/conselhos_comite/cmse.html. Acesso em: 04 set. 2013.

MIRANDA, E. E. de; GOMES, E. G.; GUIMARÃES, M. **Mapeamento e estimativa da área urbanizada do Brasil com base em imagens orbitais e modelos estatísticos**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.urbanizacao.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 5 set. 2013.

MONTALVÃO, Edmundo. **Energia Nuclear: Risco ou Oportunidade**. Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado. 2012.

MUÑIZ, Javier M. M.; GARCÍA, Rafael C. **Energia solar fotovoltaica**. Madrid: Fundación Confemetal, 2006.

MURRAY, Raymond L. **Energia Nuclear**. Hemus, 2004.

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

PINTO FILHO, Gilberto F. **Ferramenta computacional para dimensionamento e avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, PA. 2012.

PORTAL PCH. **O que é uma PCH?** Disponível em: <http://www.portalpch.com.br/index.php/saiba-mais/o-que-e-uma-pch>. Acesso em: 18jul. 2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. **Perfil de Curitiba**. Disponível em: <http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174>. Acesso em: 25ago. 2013.

RAMOS, Cristina de M. **Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado em Energia, Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, SP. 2006.

RIBEIRO, Flávio de M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil- Usina de Itaipu: primeira aproximação**. Dissertação de Mestrado em Energia, Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, SP. 2004.

RONCAGLIO, Cyntia; JANKE; Nadja. **Desenvolvimento Sustentável**. 1ed. Curitiba: IESDE Brasil, 2012.

ROSA, André H; FRACETO, Leonardo F.; MOSCHINI-CARLOS, Viviane. **Meio Ambiente E Sustentabilidade**. Porto Alegre -Brasil: Bookman, 2012.

ROSA, Daniel. J. M.; **Caracterização da radiação solar: O caso da Cidade Universitária/ USP e da Ilha do Cardoso/ Cananéia**. Tese de Mestrado, PIPGE-USP. São Paulo, 2003.

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

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

SHAYANI, Rafael A. **Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Isolado Utilizando Módulos de 32 Células**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-265/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 184p. 2006.

STANO JÚNIOR, Ângelo; TIAGO FILHO, Geraldo L. **Energias Renováveis**. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas, Itajubá, MG. 2007

TIEPOLO, Gerson M.; URBANETZ JUNIOR, Jair; CANCELIERI JUNIOR, Osiris. **Inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica do Estado do Paraná: Análise do potencial produtivo**. Revista SODEBRAS, Vol 8, N° 87. 2013.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

_____. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Dimensionamento de Sistemas**. UTFPR, Curitiba. 2012.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy. **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR**. VIII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2012.

VANDERLEI, Paula S. S.; CARAM, Rosana M.; **Vidros translúcidos utilizados nas fachadas das edificações e sua preocupação com o conforto ambiental.** Revista Tecnológica, 2007.

VASCONCELOS, Yuri. **O Desafio do Sol.** Revista Pesquisa FAPESP, ed. 207. Maio, 2013.

VICTORIA, Idilio M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotoelétricos.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

WORD WIND ENERGY ASSOCIATION. **World Wind Energy Report 2012.** Alemanha. Disponível em: <<http://www.wwindea.org>>. Acesso em: 18 jul. 2013.