

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA PAULA VASCONCELOS CHAVES
BRUNO HACHIRO DAMASCENO HINATA
JOSÉ ANTONIO RODRIGUES NETO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TERMINAIS E ESTAÇÕES-TUBO
NA CIDADE DE CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

ANA PAULA VASCONCELOS CHAVES
BRUNO HACHIRO DAMASCENO HINATA
JOSÉ ANTONIO RODRIGUES NETO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TERMINAIS E ESTAÇÕES-TUBO
NA CIDADE DE CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do curso Superior de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Maximo Tiepolo

CURITIBA

2017

ANA PAULA VASCONCELOS CHAVES
BRUNO HACHIRO DAMASCENO HINATA
JOSÉ ANTONIO RODRIGUES NETO

Estudo da viabilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba.

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

Curitiba, 11 de abril de 2017.

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

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

ORIENTAÇÃO

Gerson Maximo Tiepolo, Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gerson Maximo Tiepolo, Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior, Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

À Deus que proporcionou e presenciou cada vitória em nossa jornada acadêmica.

Aos nossos pais e familiares que nos deram o suporte e o apoio necessário ao longo de nossas vidas.

Aos mestres que deram a base suficiente para o desenvolvimento do presente projeto.

AGRADECIMENTOS

A vida é tomada por inúmeras encruzilhadas, as quais fornecem uma imensa gama de trajetórias em que podemos trilhar. Nossas escolhas entre os mais variados caminhos espelham ao nosso caráter, o qual foi construído por incontáveis trocas de experiências entre nosso ser e as mais distintas pessoas, que por algum motivo estavam destinadas a fazer parte de nossas jornadas. Para algumas dessas pessoas, o nosso tempo de convívio foi curto, mas de grande valia. Para outros, a relação será infinita em nossas almas. O fato é que caminhamos juntos e os consideramos independente do peso de suas influências.

Agradecemos a todos os professores que nos lecionaram e compartilharam de suas inteligências para provocar nossa formação de ideias e instituir nossa base de pensamento. Em especial, ao Professor Gerson Maximo Tiepolo, o qual nos orientou brilhantemente durante esse projeto. Sua postura frente a uma visão de um mundo melhor, levando em conta a sustentabilidade e a energia é inspiradora.

O nosso esforço e suor de cada dia vivido ao longo de nossas vidas acadêmicas foi possível devido à estruturação de nossa índole e ao todo suporte dado desde nossa infância, a qual nossos falsos heróis possuem a maior participação. As simples palavras contidas nesse mero papel não são suficientes frente ao que nossos pais realizaram por nós. Um enorme agradecimento à Ana Lucia de Carvalho Chaves & Paulo Vasconcelos Chaves, Marinéia das Graças Damasceno Hinata & Mauro Hinata e Silvia Maria Rodrigues & José António Rodrigues Junior. O infinito chega a ser insignificante perto do que amamos vocês!

Agradecemos a Deus por nos mostrar que somos guiados, iluminados e protegidos pela sua presença divina no mais íntimo do nosso ser. Obrigado por nos direcionar pelos seus propósitos e nos conceder sabedoria e entendimento para que pudéssemos enfrentar todos os obstáculos e aproveitar todas as oportunidades durante nossas vidas acadêmicas. Agradecemos-lhe pelo dom precioso da vida, pois sem Ti, meu eterno Deus, nada somos e nada podemos.

Por fim, agradecemos aos nossos familiares, aos presentes e aos que nos guardam de outro local. Aos amigos que viraram irmãos, sejam de infância ou de

intercâmbio, da universidade ou do ensino médio. Aos amores, de maneira geral, que estiveram conosco ao longo dessa jornada.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível. ”

(Charles Chaplin)

RESUMO

CHAVES, Ana Paula V.; HINATA, Bruno Hachiro D.; RODRIGUES NETO, José Antonio. **Estudo da viabilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba.** 2017. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Com a expectativa de aumento da demanda de energia elétrica, principalmente devido à crescente população brasileira e ao aumento do PIB nacional, a dependência do Brasil pela geração de energia por meio das usinas hidrelétricas deverá ser reduzida. Há necessidade de uma reorganização no planejamento energético do país, de tal forma que as energias renováveis sejam uma alternativa significativa no auxílio de geração, levando em conta os princípios da sustentabilidade. Neste cenário, destaca-se a energia solar fotovoltaica e em especial os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, que vem crescendo de maneira expressiva no país. Diante disto, este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade técnica da implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba. Para isto, foi realizada uma comparação do potencial fotovoltaico da cidade de Curitiba com o estado do Paraná, com outros estados brasileiros e com a Europa, região com maior capacidade instalada global de SFVCR. Além disso, foi escolhido o terminal de integração Santa Cândida e a estação-tubo Marechal Floriano para análise quanto a realização de um projeto preliminar de um SFVCR. Por meio deste trabalho, conclui-se ser viável tecnicamente a implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba.

Palavras-chave: Energias renováveis. Sistemas fotovoltaicos. Viabilidade técnica. Potencial Fotovoltaico.

ABSTRACT

CHAVES, Ana Paula V.; HINATA, Bruno Hachiro D.; RODRIGUES NETO, José Antonio. **Feasibility study for the implementation of grid-connected photovoltaic systems at bus terminals and stops (tube-stations) in the city of Curitiba.** 102 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

With the increased electric energy demand expectancy, mostly due the increasing Brazilian population and the country's GDP growth per capita, the Brazilian strong dependency upon hydropower plants should be reduced. There is a need for the country to reorganize its energy planning, in such a way that renewable energies represent excellent options to fulfill part of the electricity generation, taking into account the principles of sustentability. In this scenario, solar photovoltaic energy stands out and in particular grid-connected photovoltaic systems, which are growing in an expressive way in Brazil. Faced with this, this work aims to study the technical feasibility for the implementation of grid-connected photovoltaic systems at bus terminals and stops (tube-stations) in the city of Curitiba. To do so, a comparison was made between the photovoltaic potential of Curitiba and the state of Paraná, between the photovoltaic potential of Curitiba and others Brazilian states and between the photovoltaic potential of Curitiba and Europe, region with the largest installed grid-connected photovoltaic systems capacity in the world. Besides that, the Santa Cândida terminal and the Marechal Floriano tube-station have been selected for the realization of a preliminary grid-connected photovoltaic system project. Through this work, it is concluded that the implementation of grid-connected photovoltaic systems at bus terminals and stops (tube-stations) in the city of Curitiba is technically viable.

Keywords: Renewable energy. Photovoltaic system. Technical feasibility. Photovoltaic potential.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício Amorfo
BEM	Balanço Energético Nacional
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas e Desenvolvimento
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MME	Ministério de Minas e Energia
m-Si	Silício Monocristalino
MW	Mega Watt
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
PNE	Plano Nacional de Educação
REN 21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
RIT	Rede Integrada de Transportes
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
TCU	Tribunal de Contas da União
TD	Taxa de desempenho
Wp	Watt pico
Wh	Watt hora
WBGU	<i>German Advisory Council on Global Change</i>
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Matriz Elétrica Brasileira 2015.....	17
Figura 02 – Produção de Energia Elétrica Global e Brasileira por tipo de fonte.....	18
Figura 03 – Previsão da participação de fontes renováveis no mundo até 2100.	19
Figura 04 – População total, homens e mulheres: projeção da população residente.	21
Figura 05 – Perdas Elétricas durante a transmissão de Energia Elétrica em Países da América do Sul.	22
Figura 06 – Matriz Elétrica Global.	31
Figura 07 – Matriz Elétrica Brasileira, com as participações por fonte, dos anos de 2015 e 2014.	32
Figura 08 – Participação de Fontes Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira.	35
Figura 09 – Crescimento Evolutivo da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.	39
Figura 10 – Classificação da Radiação Solar: Componentes direta, difusa e albedo.	41
Figura 11 – Estrutura de uma célula solar.....	43
Figura 12 – (a) Material de silício puro (b) Material de silício dopado tipo N (c) Material de silício dopado tipo P	44
Figura 13 – Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos.	46
Figura 14 – Esquema demonstrativo do Sistema Solar fotovoltaico Isolado.....	48
Figura 15 – Esquema demonstrativo do Sistema Solar fotovoltaico conectado à rede.	49
Figura 16 – Esquema explicativo do Sistema de Compensação (Net Metering).....	50
Figura 17 – Célula, Módulo e Painel Fotovoltaico.	52
Figura 18 – Célula e módulo de silício monocristalino.	54
Figura 19 – Célula e módulo de silício policristalino.....	54
Figura 20 – Estrutura atômica das células de silício mono e policristalino.	55
Figura 21 – À esquerda, painel solar fotovoltaico de silício amorfo e à direita, painéis solares fotovoltaicos de silício amorfo fabricado diretamente sobre telhas de vidro curvas.....	56
Figura 22 – Integração de placas solares à edificações. À esquerda, fachada ventilada fotovoltaica no escritório sede da FEMSA em Monterrei, México. À direita, fachada ventilada fotovoltaica no escritório da Onyx Solar em Ávila, Espanha.	56
Figura 23 – Eficiência dos módulos em função das células utilizadas.	58
Figura 24 – Medidor Eletrônico Bidirecional.....	59
Figura 25 – Sistema de Medição Bidirecional com a utilização de um medidor bidirecional.	59
Figura 26 – Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná – Total Anual (Plano Inclinado).	62
Figura 27 – Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) - Janeiro a Junho.....	63

Figura 28 – Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) - Julho a Dezembro.	64
Figura 29 – Mapa Fotovoltaico Brasileiro - Total Anual.....	65
Figura 30 – Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e Mapa Fotovoltaico da Europa - Total Anual.....	67
Figura 31 – Eixos do Sistema de Transporte Público de Curitiba.	71
Figura 32 – Esquema da Rede Integrada de Transporte em Curitiba e Região Metropolitana.	72
Figura 33 – Terminal de Integração – Modelo esquemático.	73
Figura 34 – Terminal Santa Cândida.	74
Figura 35 – Estação-tubo Museu Oscar Niemeyer.	74
Figura 36 – Planta Estação Tipo 01.	75
Figura 37 – Planta Estação Tipo 02.	76
Figura 38 – Planta Estação Tipo 03.	77
Figura 39 – Planta Estação Tipo 04.	77
Figura 40 – Planta Estação Tipo 05.	78
Figura 41 – Energia anual normalizada do SFVCR sob diversos ângulos de orientação em Curitiba – Paraná.....	80
Figura 42 – Terminal do Santa Cândida.....	82
Figura 43 – Vista Superior do Terminal do Santa Cândida.	83
Figura 44 – Ilustração para definição de espaçamento mínimo entre painéis.....	84
Figura 45 – Fator de espaçamento versus latitude do local do painel fotovoltaico. ..	84
Figura 46 – Cálculo da altura de instalação dos painéis.	84
Figura 47 – Vista aérea da Linha Verde.....	86
Figura 48 – Aplicação da tecnologia da célula de silício amorfo.....	87
Figura 49 – Vista superior de duas estações da Linha Verde.....	89
Figura 50 – Esboço do Projeto da Estação-tubo Marechal Floriano.	90
Figura 51 – Tarifa cobrada pela COPEL concernente ao Subgrupo B3 – Serviços públicos.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Valores de Irradiação no plano inclinado e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no estado do Paraná e na cidade de Curitiba.	62
Tabela 02 – Valores de Irradiação Total e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no plano inclinado encontrados nos estados e no Brasil para uma TD 75%..	66
Tabela 03 –Valores de Irradiação Total e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no plano inclinado encontrada nos países da Europa e na cidade de Curitiba, para TD 75%.	68
Tabela 04 – Características dos módulos de silício monocristalino.	83
Tabela 05 – Potências estimadas do SFVCR de acordo com o fornecedor selecionado	85
Tabela 06 – Área útil estações tubo.	88
Tabela 07 – Característica do módulo de silício amorfo flexível.	89
Tabela 08 – Potência estimada para a dimensão dos módulo.....	89
Tabela 09 – Energia elétrica gerada estimada por tipo de estação-tubo – valores anuais.....	89
Tabela 10 – Energia anual gerada estimada para caso 100% das instalações nas estações-tubo forem concretizadas	90

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	TEMA DE PESQUISA.....	20
1.1.1.	Delimitação do Tema.....	20
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS.....	20
1.3	OBJETIVOS	22
1.3.1.	Objetivo Geral.....	22
1.3.2.	Objetivos Específicos	22
1.4	JUSTIFICATIVA.....	23
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
2.1	SUSTENTABILIDADE E GERAÇÃO DE ENERGIA	29
2.1.1	Desenvolvimento Sustentável	29
2.1.2	Sustentabilidade e Geração de Energia	30
2.2	PANORAMA ENERGÉTICO	30
2.2.1	Matriz Elétrica Global	30
2.2.2	Matriz Elétrica Brasileira	32
2.2.3	Energias Renováveis.....	34
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	36
2.3.1	Energia Solar.....	36
2.3.2	Energia Fotovoltaica.....	37
2.3.3	Radiação Solar	40
2.3.4	Estrutura da Célula Fotovoltaica e o Efeito Fotovoltaico	42
2.3.5	Geração Distribuída e a Energia Solar Fotovoltaica.....	45
2.3.6	Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos	45
2.3.7	Componentes de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	51
2.3.7.1	Células Solares e Painéis Solares.....	51
2.3.7.2	1º Geração – Células de Lâminas Cristalinas	53
2.3.7.2.1	Célula de Silício Monocristalina (m-Si)	53
2.3.7.2.2	Célula de Silício Policristalina (p-Si)	54
2.3.7.3	2ª Geração – Célula de Filmes Finos	55

2.3.7.3.1	Célula de Silício Amorfo (a-Si).....	55
2.3.7.3.2	Célula de Telureto de Cádmio (CdTe).....	57
2.3.7.3.3	Célula de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS).....	57
2.3.7.3.4	Célula de Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio(CIGS)	57
2.3.7.4	Medidores Eletrônicos	58
2.3.7.5	Inversores.....	60
3.	ANÁLISE DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE CURITIBA	61
3.1	COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE CURITIBA COM O ESTADO DO PARANÁ.....	61
3.2	COMPARAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DA CIDADE DE CURITIBA COM OUTROS ESTADOS DO BRASIL.....	65
3.3	COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE CURITIBA COM A EUROPA.....	67
4.	ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM ESTAÇÕES-TUBO E TERMINAIS DE CURITIBA	70
4.1	PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA – TRANSPORTE COLETIVO	70
4.1.1	Terminais.....	72
4.1.2	Estações-Tubo	74
4.1.2.1	Estação-tubo TIPO 01	75
4.1.2.2	Estação-tubo TIPO 02	76
4.1.2.3	Estação-tubo TIPO 03	76
4.1.2.4	Estação-tubo TIPO 04	77
4.1.2.5	Estação-tubo TIPO 05	78
4.2	Projetos preliminares– Viabilidade Técnica	78
4.2.1	Premissas.....	79
4.2.2	Projeto Preliminar no Terminal Santa Cândida.....	81
4.2.2.1	Tipologia Seleccionada e Orientação dos Painéis	82
4.2.2.2	Levantamento das Dimensões da Cobertura	83
4.2.2.3	Cálculo de Radiação e Geração de Energia Fotovoltaica	83
4.2.3	Projeto Preliminar na Estação-tubo Marechal Floriano	85
4.2.3.1	Tipologia Seleccionada	86
4.2.3.2	Levantamento da Área de Cobertura	87
4.2.3.3	Cálculo de Radiação e Geração de Energia Fotovoltaica	88

5.	CONCLUSÃO	92
----	-----------------	----

1. INTRODUÇÃO

O considerável potencial hídrico brasileiro e o baixo custo da implantação de usinas hidrelétricas, comparado a outras fontes de energia, faz com que a supremacia na matriz elétrica brasileira pertença à geração hidrelétrica, que representou no ano de 2015, 64% da oferta interna de energia elétrica. Em contrapartida, os impactos ambientais decorrentes da implantação de grandes reservatórios de água representam a principal desvantagem da geração hidráulica. Em um nível menor, como pode ser visto na Figura 1, outras fontes também contribuem para a geração de energia elétrica no país, tais como o gás natural e os derivados de petróleo, que foram responsáveis no ano de 2015 por 80% do incremento da geração de energia elétrica mediante as condições hídricas desfavoráveis (BEN, 2016).

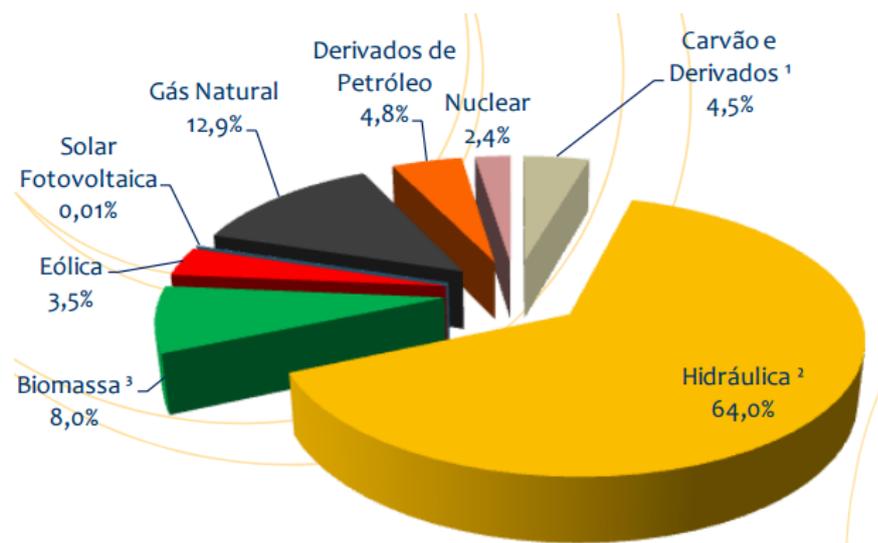


Figura 01 – Matriz Elétrica Brasileira 2015

Fonte: BEN, 2016.

Segundo Villalva (2013), as tradicionais fontes de energia elétrica ainda constituem a base mundial e nacional da geração de eletricidade, através das usinas hidrelétricas; termelétricas a carvão e a petróleo; e as usinas nucleares. Esta distribuição pode ser observada através da Figura 02, a qual apresenta a produção de energia elétrica global e brasileira por tipo de fonte. Logo, percebe-se que houve um acréscimo na utilização de combustíveis fósseis e nuclear, devido às condições

desfavoráveis da geração hidráulica pela falta de chuva no Brasil no período compreendido entre 2012 e 2015 (TIEPOLO, 2015).

Tipo de fonte energética	% DE PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE - GLOBAL E BRASIL									
	GLOBAL					BRASIL				
	REN21 2012 (referente ao ano de 2011)	REN21 2013 (referente ao ano de 2012)	REN21 2014 (referente ao ano de 2013)	REN21 2015 (referente ao ano de 2014)	REN21 2016 (referente ao ano de 2015)	BEN 2012 (referente ao ano de 2011)	BEN 2013 (referente ao ano de 2012)	BEN 2014 (referente ao ano de 2013)	BEN 2015 (referente ao ano de 2014)	BEN 2016 (referente ao ano de 2015)
Combustíveis Fósil e Nuclear	79,7%	78,3%	77,9%	77,2%	76,3%	11,0%	15,5%	20,7%	25,6%	24,6%
Hidroelétricas	15,3%	16,5%	16,4%	16,6%	16,6%	81,9%	76,9%	70,6%	65,2%	64%
Outras Renováveis (não-hidro)	5%	5,2%	5,7%	6,2%	7,3%	7,1%	7,7%	8,7%	9,3%	11,51%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Figura 02– Produção de Energia Elétrica Global e Brasileira por tipo de fonte.

Fonte: Adaptado de TIEPOLO (2015).

No entanto, de acordo com Geller (2002), este padrão atual não é sustentável, proporcionando diversos impactos ambientais e sociais. Por isso, uma revolução na produção e consumo mundial de energia se faz necessária, o que resultaria em inúmeros benefícios econômicos, sociais e ambientais. Esta transformação pressupõe a melhora da eficiência energética e a transferência das fontes atuais por fontes renováveis.

Segundo Estender e Pitta (2008), o perfil de consumo de energia elétrica no Brasil tem se mostrado mais favorável à popularização das energias renováveis ano a ano. Isso se deve, além da onda de preocupação ambiental, às infinitas possibilidades de utilização e captação desses recursos. Dentre as mais populares se encontram a energia solar, a energia eólica, a biomassa e a primordialmente utilizada, energia hidráulica.

A Figura 03 ilustra a previsão da participação das diferentes fontes de energia elétrica no mundo até 2100, ano em que está previsto uma participação de 54% da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica global. Segundo Sapa Solar (2015), o conselho consultivo alemão para alterações climáticas (WBGU) prevê que a participação das energias não renováveis será cada vez menor devido ao esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis e ao aumento da demanda de energia elétrica, e em contrapartida, as energias renováveis tendem ao desenvolvimento e expansão, principalmente na área de sistemas solares fotovoltaicos.

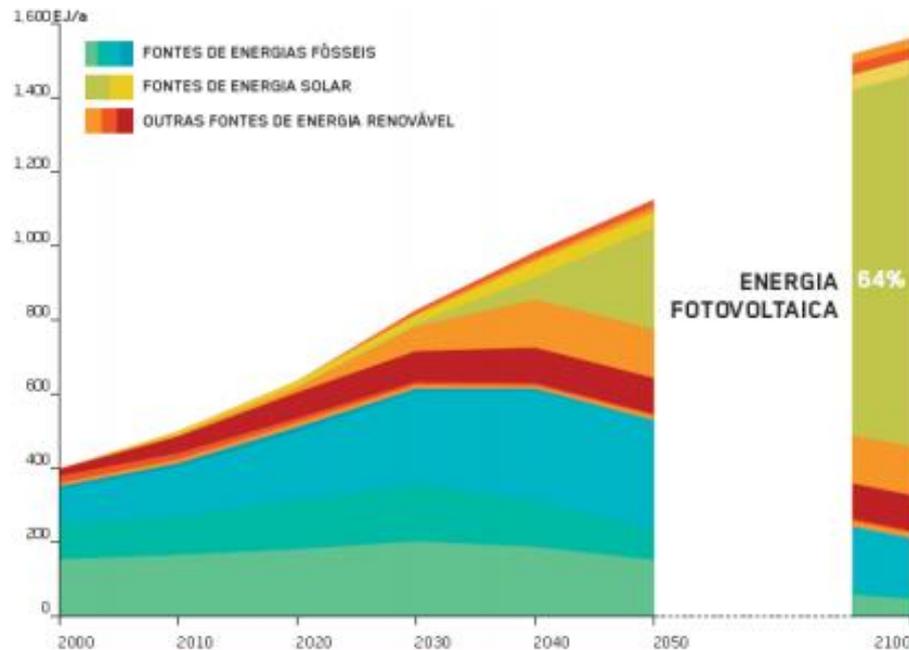


Figura 03 – Previsão da participação de fontes renováveis no mundo até 2100.

Fonte: SAPA SOLAR, 2015.

Segundo estudo publicado pela *World Wide Fund for Nature* (WWF, 2012), o Brasil recebe boa incidência de radiação solar diária durante a maior parte do ano em todo o seu território. Além disso, o Brasil também possui grandes reservas de silício, matéria prima indispensável para a produção dos painéis solares. Essa conjunção de fatores representa uma boa oportunidade para o investimento em pesquisa, desenvolvimento e implantação comercial de toda a cadeia tecnológica da energia solar fotovoltaica.

É neste contexto de desenvolvimento sustentável e necessidade de substituição dos padrões de geração de energia atuais por fontes renováveis, que se enquadram os sistemas fotovoltaicos, os quais através de módulos fotovoltaicos convertem a energia do sol diretamente em energia elétrica (URBANETZ, 2010). Estes sistemas podem ser classificados como isolados ou conectados à rede.

Os sistemas isolados são indicados para regiões em que a rede elétrica não é capaz de atender o consumidor, como, em áreas rurais ou de preservação ambiental, já que estas se encontram afastadas dos grandes centros urbanos o que demandaria muitos recursos para suprir estes clientes.

Em contrapartida, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) são vistos como uma forma de geração distribuída ao longo dos alimentadores da rede

elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar energia próxima ao ponto de consumo. Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) apresentam um novo conceito de geração de energia limpa e renovável, e tem registrado crescimento mundial muito superior ao dos Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) (TIEPOLO *et al.*, 2014b).

1.1 TEMA DE PESQUISA

O presente trabalho possui como tema de pesquisa o estudo da viabilidade de implantação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba.

1.1.1. Delimitação do Tema

Obtenção do potencial solar fotovoltaico através do estudo de mapas fotovoltaicos e valores de irradiação (kWh/m²) para análise da contribuição da energia solar fotovoltaica na geração de eletricidade em estações-tubo e terminais da cidade de Curitiba.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Segundo Glenn *et al.*, (2011), há dois fatores predominantes que devem influenciar de maneira expressiva os governantes quanto às estratégias de investimentos futuros na área de energia. Primeiramente, de acordo com os dados estatísticos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), há uma expectativa crescente da população brasileira residente até 2030, como é possível observar na Figura 04. Como uma projeção, é esperada mais de 223 milhões de habitantes residentes no território brasileiro em 2030 e concomitantemente pode-se esperar uma maior demanda de energia elétrica.

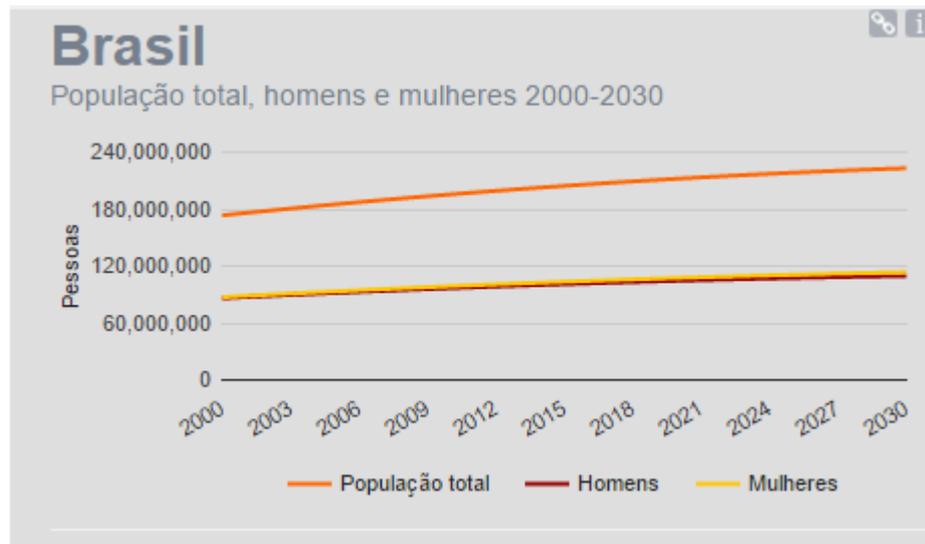


Figura 04– População total, homens e mulheres: projeção da população residente.

Fonte: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014.

Aliada à perspectiva do crescimento populacional, prevê-se globalmente também um aumento bastante significativo da renda per capita até o ano de 2030 (GLENN *et al.*, 2011), o que pode resultar em uma menor desigualdade econômica e social, mas também e muito provavelmente num maior consumo de fontes energéticas, em especial a elétrica, com a melhoria da qualidade de vida e maior poder de compra da população em geral (TIEPOLO *et al.*, 2013).

Diante deste panorama, o governo brasileiro deverá dispor de alternativas a fim de expandir o sistema elétrico brasileiro, com soluções que sejam economicamente e socialmente viáveis.

A energia elétrica no Brasil é gerada predominantemente a partir de usinas hidrelétricas (URBANETZ, 2010), principalmente devido ao seu potencial hídrico, com o qual o país é favorecido geograficamente. No entanto, as grandes fontes geradoras de energia se encontram em bacias hidrográficas específicas, normalmente distantes dos centros de consumo (TIEPOLO *et al.*, 2013). Tais extensões geram perdas significativas de energia nas linhas de transmissão. Segundo o acórdão Nº 2211/2008, processo TCU Nº 025.619/2007-2, publicado pelo Tribunal de Contas da União (TCU) em 2008, as perdas elétricas totais brasileiras chegam a um percentual de 20,28%, como é mostrado na Figura 05. Comparativamente, tal número é expressivo e chega a ser o dobro de países como Peru e Argentina. Tais perdas devem ser diminuídas. A utilização da geração distribuída se torna uma alternativa para evitar a dependência atual e total de energia elétrica de fontes geradoras distantes (TIEPOLO *et al.*, 2013).

Empresa	Perdas Técnicas	Perdas Comerciais	Perdas Totais
Chilectra - CHILE	4,6%	1,0%	5,6%
Condensa - COLÔMBIA	8,3%	3,2%	11,5%
Eldenor - PERU	7,8%	1,5%	9,3%
Edesur - ARGENTINA	6,8%	3,1%	9,9%
BRASIL	12,70%	7,58%	20,28%

Figura 05 – Perdas Elétricas durante a transmissão de Energia Elétrica em Países da América do Sul.

Fonte: Tribunal de Contas da União – TCU, 2008.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) seriam uma possível solução para a crescente demanda de energia elétrica, visando menores perdas durante as transmissões e auxiliando no incentivo ao estudo, e conseqüentemente, ao avanço de tais tecnologias no Brasil. “Curitiba, capital do estado do Paraná, premiada com o prêmio *Globe Award Sustainable City* sendo eleita como a cidade mais sustentável do mundo pela *Globe Fórum* da Suécia em 2010, teria condições favoráveis, principalmente devido a sua posição geográfica, para a utilização dos SFVCR em seus terminais e estações-tubo?”

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar e analisar a viabilidade da implantação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) em terminais e estações-tubo no município de Curitiba, PR.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica e sintetizar os principais conceitos que envolvem a Energia Solar Fotovoltaica e em particular, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede (SFVCR).
- Pesquisar dados referentes aos níveis de irradiação da cidade de Curitiba.

- Realizar levantamento das estações-tubo e terminais localizados na cidade de Curitiba - PR, bem como descrever as suas características construtivas e elétricas.
- Elaborar projeto preliminar para a realização de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede para um terminal e uma estação-tubo específica de Curitiba.
- Avaliar sobre a viabilidade técnica da instalação de painéis fotovoltaicos nas instalações previstas.

1.4 JUSTIFICATIVA

O conceito de desenvolvimento sustentável foi inicialmente abordado pela *World Conservation Union* por meio do documento *World's Conservation Strategy*. Segundo este, para haver desenvolvimento sustentável as esferas sociais e ecológicas devem ser consideradas, além dos fatores econômicos dos recursos vivos e não vivos (VAN BELLEN, 2006 *apud* TIEPOLO, 2015). Porém, o conceito foi formalmente definido e divulgado durante a Comissão de Brundtland, na década de 1980, onde foi elaborado o relatório *Our Common Future*, quando a primeira-ministra norueguesa, Gro Harlem Brundtland, apresentou a seguinte definição para o conceito: “É a forma como as atuais gerações satisfazem as suas necessidades sem, no entanto, comprometer a capacidade de gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1980 *apud* ESTENDER e PITTA, 2008).

Ao longo dos últimos anos, a sociedade vem modificando a sua linha de raciocínio, bem como suas ações quando se relaciona o desenvolvimento sustentável ao cotidiano. Nas sociedades modernas atuais o consumo energético é muito significativo, passando a ser extremamente relevantes os problemas ocasionados durante a sua geração, como o ambiental, social, econômico e geopolítico nas suas diversas etapas (TIEPOLO, 2015). Devido a toda tecnologia criada e que vem sendo aprimorada desde a primeira revolução industrial, a energia elétrica acaba sendo um dos fatores quase indispensáveis, nos dias de hoje, para a sobrevivência humana. Atualmente, por parte dos cidadãos, há uma maior consciência da necessidade da

preservação dos recursos naturais (TIEPOLO *et al.*, 2013). Sendo assim, a energia elétrica necessita ser tratada de forma sustentável, da produção ao consumo final, de forma a garantir às gerações futuras possibilidades de aproveitamento dos recursos energéticos tal como é possível para as gerações atuais (BUCUSSI, 2007) (EPE, 2005).

No Brasil, o estado do Paraná é um dos maiores produtores de energia elétrica através das hidroelétricas, devido à grande bacia hidrográfica do estado (TIEPOLO, 2015). De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), o país gerou, no ano de 2015, 64% de sua energia elétrica total por meio das fontes hidroelétricas (MME, 2016). Mas apesar deste grande potencial hídrico, a sua expansão na matriz elétrica encontra-se em declínio devido à dificuldade de explorar o potencial ainda não utilizado, e também devido às pressões da sociedade e entidades públicas e ambientais (TIEPOLO, 2015). Atualmente, estima-se que 67% do potencial hidráulico do Paraná já tenham sido explorados de um total de 23.937 MW (BEN, 2015). O impacto ambiental gerado pela implantação dessas usinas tem estado cada vez mais em discussão, devido às vastas áreas inundadas e que são necessárias para a formação do reservatório para movimentação das turbinas dos seus geradores (URBANETZ, 2010). Com o alagamento de grandes áreas, há a alteração na fauna, flora e microclima da região (EPE, 2013). Além do fator ambiental, o social também é predominante, visto que moradores das áreas inundadas deverão ser transferidos para outros lugares (URBANETZ, 2010).

Como já mencionado, com a expectativa de aumento da demanda de energia elétrica, principalmente devido à crescente população brasileira e ao aumento do Produto Interno Bruto nacional, a nítida dependência do país pela geração de energia por meio das usinas hidrelétricas deverá ser reduzida. Há uma necessidade de uma reorganização no planejamento energético do país, de tal forma que as energias renováveis sejam uma alternativa significativa no auxílio de geração, levando em conta os princípios da sustentabilidade. A popularização das energias renováveis se deve, além da onda de preocupação ambiental, às infinitas possibilidades de utilização e captação de recursos naturais. Neste ambiente, destaca-se a energia solar fotovoltaica e em especial os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.

A energia solar fotovoltaica é caracterizada como uma energia renovável devido ao sol ser um recurso natural inesgotável, abundante e permanente. Ela é

considerada como uma energia limpa visto que não polui e não prejudica o ecossistema considerado. Dentre os motivos que fazem os SFVCR serem uma excelente opção ao auxílio na geração de energia elétrica, destacam-se as menores perdas do Sistema Interligado Nacional (SIN), com a sua utilização como geração distribuída próximo ao ponto de consumo.

O sistema de geração distribuída promove o descongestionamento da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. De tal forma que os SFVCR contribuem para fornecer energia elétrica próxima ao ponto de consumo (TIEPOLO, 2015). Os consumidores acabam por gerar parte ou toda energia necessária para suprir suas necessidades pessoais, principalmente através de células fotovoltaicas, sendo que a energia não utilizada e excedente pode ser entregue ao sistema elétrico (TIEPOLO *et al.*, 2013).

As grandes fontes geradoras de energia se encontram em bacias hidrográficas específicas, normalmente distantes dos centros de consumo (TIEPOLO *et al.*, 2013). Tais extensões geram perdas elétricas expressivas durante sua transmissão. Os SFVCR possuem a vantagem de poder ser instalada próximo ao ponto de consumo principalmente em regiões urbanas, diminuindo as perdas hoje existentes entre o ponto de geração de energia elétrica e o consumidor final (TIEPOLO, 2015). Dessa maneira, regiões com grande irradiação solar tendem a ser priorizadas com investimentos da tecnologia fotovoltaica (TIEPOLO *et al.*, 2013).

O Brasil tem uma expectativa quanto à participação do país na geração de energia solar por conta da potencialidade desta fonte e por abrigar a maior reserva de quartzo do mundo (SOUZA *et al.*, 2010). O índice de radiação solar do Brasil é um dos mais altos do mundo. Grande parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima a linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações de radiação solar durante o dia (SEMAR, 2014). Sobretudo, existem importantes reservas de quartzo de qualidade no país e indústrias com liderança em silício de grau metalúrgico (CGEE, 2010), importante elemento o qual é utilizado nas células solares em painéis fotovoltaicos.

O presente trabalho é visto como uma motivação aos próximos estudos e ao incentivo às pesquisas envolvendo a energia solar como tema principal a fim de promover o desenvolvimento sustentável e o avanço tecnológico na matriz energética brasileira. Ainda, tem como fundamentação a importância dos SFVCR no meio urbano

para o município de Curitiba, capital do estado do Paraná, cidade a qual é conceito em sustentabilidade.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos para a realização deste trabalho foram divididos em etapas.

A primeira etapa consistiu na pesquisa da bibliografia referente à energia solar fotovoltaica com enfoque aos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede por meio de livros, artigos, revistas científicas, informativos, monografias e teses.

A segunda etapa realizou o levantamento do potencial solar fotovoltaico na cidade de Curitiba, bem como no Paraná, através de mapas e estudos já desenvolvidos por instituições brasileiras. Ainda, levantou valores de irradiação de países de referência aos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede e realizará uma comparação entre as regiões estudadas.

A terceira etapa englobou a obtenção das características construtivas e elétricas das estações-tubos e terminais da cidade de Curitiba. Para isso, houve o contato com as empresas responsáveis para realizar o levantamento de tais dados.

A quarta etapa fez o estudo para instalação de painéis fotovoltaicos nas estações-tubos e terminais da cidade de Curitiba, identificando a tecnologia a ser utilizada em cada caso e a capacidade de geração. Os dados obtidos durante o projeto foram avaliados e analisados a fim de aferir a viabilidade técnica da implantação dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso é estruturado em cinco capítulos.

O CAPÍTULO 01 ou INTRODUÇÃO possui como objetivo fundamental determinar os fatores orientadores que darão rumo para a obtenção de uma resposta

ao estudo pré-estabelecido. Dessa forma, o capítulo descreve brevemente a metodologia do trabalho, de forma a deixar devidamente definido seu tema central, bem como a sua delimitação, deixando explícitos os problemas a serem resolvidos e a justificativa dos mesmos. Por fim, traz uma descrição clara dos objetivos a serem alcançados e da linha geral de pesquisa com a qual o estudo proposto se desencadeará.

O CAPÍTULO 02 ou REFERENCIAL TEÓRICO enfoca na fundamentação teórica que será utilizada como um embasamento para a compreensão do presente estudo. Assim sendo, o capítulo define conceitos relacionados ao desenvolvimento sustentável; à utilização de energias renováveis na matriz energética atual; à energia solar fotovoltaica conceituada como a energia do futuro, bem como sua contextualização, e principalmente, aos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR). Para tais sistemas, preocupa-se em sua descrição conceitual detalhada visando suas características construtivas; seu modo de operação; suas vantagens e, as normas e políticas, pertinentes ao estudo, em regimento no cenário brasileiro.

O CAPÍTULO 03 ou ANÁLISE DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE CURITIBA - apresenta um levantamento de valores de irradiação no estado do Paraná e em Curitiba, além de uma análise dos Mapas Fotovoltaicos do estado do Paraná. Da mesma forma, são apresentados valores de irradiação de alguns países europeus, os quais possuem influência na utilização e na tecnologia de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) atualmente. Por conseguinte, há a realização de uma análise comparativa do potencial fotovoltaico das regiões consideradas.

O CAPÍTULO 04, SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NAS ESTAÇÕES-TUBO E TERMINAIS DE CURITIBA, realiza um levantamento de dados concernentes às estações-tubo e terminais da cidade de Curitiba. Dessa maneira, o capítulo apresenta a análise estrutural de tais instalações, bem como os possíveis dados técnicos dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede a serem implantados em tais estruturas. Como exemplificação, há a apresentação de dois projetos preliminares- Implantação de um SFVCR em um terminal e em uma estação-tubo específica de Curitiba.

Por fim, o CAPÍTULO 05 ou CONCLUSÕES tem como objetivo o fechamento do trabalho, indicando a viabilidade técnica da implantação dos Sistemas

Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba. Para isso, serão apresentados argumentos baseados na reiteração de algumas análises realizadas ao longo do trabalho.

A estrutura do trabalho ainda é composta pelas referências bibliográficas consultadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SUSTENTABILIDADE E GERAÇÃO DE ENERGIA

2.1.1 Desenvolvimento Sustentável

A partir de meados da década de 1950, o Brasil passou por um processo de industrialização bastante acelerado (BORTOLETO, 2001). Juntamente ao progresso industrial brasileiro, vieram problemas de cunho ambiental que foram desprezados por muito tempo. O crescimento desordenado dos centros urbanos por meio do êxodo rural devido às indústrias trouxe um maior desmatamento e um aumento da poluição do ar e dos rios, visto que as mesmas liberavam seus resíduos, muitas vezes tóxicos ao meio ambiente.

A sociedade durante muitos anos teve o seu “desenvolvimento sustentável” baseado no ato de sustentar o seu crescimento econômico e social, sem que houvesse uma extrema preocupação com os impactos ambientais que poderiam ser ocasionados (TIEPOLO, 2015). Apenas a partir da década de 70, houve a percepção da degradação dos recursos naturais como um problema de primeira linha na agenda política internacional. A revolução no pensamento e na relação do homem com o meio ambiente advinda do Iluminismo desencadeou durante a Modernidade um processo de desenvolvimento econômico e tecnológico que ao alcançar o século XX demonstrou-se problemático trazendo a perspectiva da finitude dos recursos naturais (GAVARD, 2009).

O conceito de sustentabilidade é relativamente recente e está relacionado com o desenvolvimento econômico, o desenvolvimento social e a proteção ambiental. Tais campos se inter-relacionam e precisam ser harmonizados para que o desenvolvimento de uma determinada região demográfica seja sustentável (GOLDEMBERG, 2015). Com tais pensamentos, surge um movimento de amparo das necessidades terrestres, que visa tanto promover o bem-estar global como a manutenção do meio ambiente, sendo ele, o desenvolvimento sustentável que de tanto discutido foram concebidas as tantas definições que se ouvem falar (BESKLOW,

2013). Com isso, criaram mecanismos de mitigação como forma a combater a degradação ambiental, principalmente quando o assunto envolvido é a energia.

2.1.2 Sustentabilidade e Geração de Energia

A ação humana na busca de garantir as condições de sua reprodução enquanto espécie é modificadora do seu entorno físico, uma etapa fundamental na longa trajetória do esforço da espécie humana em dominar a natureza de modo a garantir sua subsistência (GAVARD, 2009). Desde os primórdios da humanidade, o homem utilizou os recursos naturais para a sua própria satisfação, utilizando determinados tipos de energia nas mais variadas atividades do cotidiano. Dentre elas estão a Energia Térmica (Combustão) por meio de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos; a Energia Hidráulica; a Energia da Terra como a geotérmica e a de geopressão; a Energia Nuclear por meio da fissão e fusão; a Energia dos Oceanos; bem como a Energia Solar e a Energia Eólica.

O uso de fontes de energia e de tecnologias modernas de uso final levou a mudanças qualitativas na vida humana, proporcionando tanto o aumento da produtividade econômica quanto do bem-estar da população (GOLDEMBERG e MOREIRA, 2005). A energia, além de ser indispensável no modo de vida atual, necessita ser tratada de forma sustentável, da produção ao consumo final, de forma a garantir às gerações futuras possibilidades de aproveitamento dos recursos energéticos tal como é possível para as gerações atuais (BUCUSSI, 2007 *apud* TIEPOLO, 2015) (EPE, 2005 *apud* TIEPOLO, 2015). Dessa forma, um dos grandes desafios para a humanidade neste século é o de fazer a transição para um futuro de energia sustentável (FAPESP, 2010).

2.2 PANORAMA ENERGÉTICO

2.2.1 Matriz Elétrica Global

A estrutura energética de uma nação é um dos elementos mais decisivos em sua economia, podendo ser considerado um dos setores estratégicos do país. A sua

aplicação encontra-se nos mais diversos setores, entre eles o comércio, a agricultura, a produção industrial, o sistema de transportes e telecomunicações, a saúde e a educação. Qualquer sobressalto do setor energético interfere na posição do país no comércio mundial, já que, na composição dos custos da produção, a energia é um fator que pode tornar a mercadoria mais ou menos competitiva (COLOMBO, 2013). Dessa forma, o crescimento econômico de um país está intimamente ligado à sua estrutura energética.

A geração de energia no mundo se resume principalmente aos combustíveis fósseis e às fontes nucleares, que juntos correspondem a 76,3% da matriz elétrica mundial, a qual pode ser observada na Figura 06 (REN21, 2016). Apenas 23,7% da geração mundial de energia correspondem à participação das fontes renováveis, fator preocupante muito pelos impactos ambientais e sócio-políticos causados pelas fontes não renováveis.

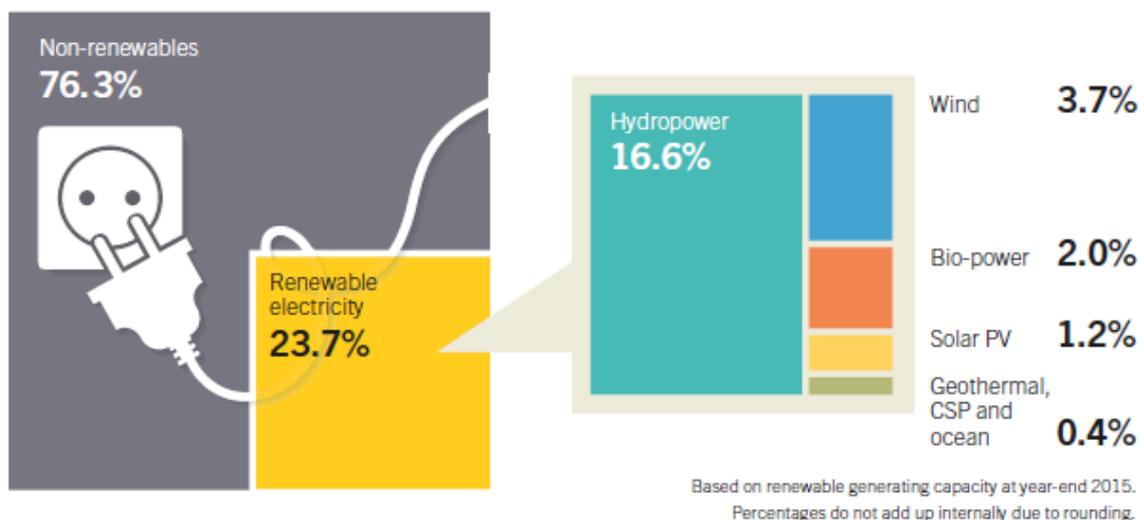


Figura 06– Matriz Elétrica Global.

Fonte: REN21, 2016.

Com uma maior demanda prevista de energia mundial, devido a uma tendência do crescimento da renda per capita e do crescimento da população mundial, novas estruturações nos planejamentos energéticos devem ser realizadas, pois todos os países almejam a autossuficiência energética e baixos custos na produção de energia, para que as atividades econômicas não fiquem sujeitas às oscilações de preço das fontes importadas. A busca por uma matriz energética diversificada constitui estratégia de planejamento adotada por vários governos, para evitar

desabastecimento, enfrentar crises econômicas e incentivar a prática do desenvolvimento sustentável por meio da geração de energias limpas e renováveis (COLOMBO, 2013).

2.2.2 Matriz Elétrica Brasileira

O planejamento do setor energético é extremamente importante para assegurar a continuidade do abastecimento de energia ao menor custo, com o menor risco e com os menores impactos ambientais para a sociedade (TIEPOLO e CANGIOLIERI, 2012). Entre os fatores que são relevantes na escolha de tais fontes, destacam-se a disponibilidade de recursos naturais necessários para a geração de eletricidade na área geográfica considerada, o custo do processo da captação ou exploração de tais recursos naturais até a sua conversão em energia elétrica, bem como os impactos sociais, políticos e principalmente ambientais causados pela fonte em questão.

Em relação ao Brasil, grande parte da energia elétrica gerada provém de fontes renováveis, principalmente através de fonte hidroelétrica, complementada pelos combustíveis fósseis e nucleares, e com uma parcela menor das renováveis não hidráulicas (TIEPOLO, 2015). É possível observar tal distribuição da Matriz Elétrica Brasileira na Figura 07 com suas participações nos anos de 2014 e 2015.

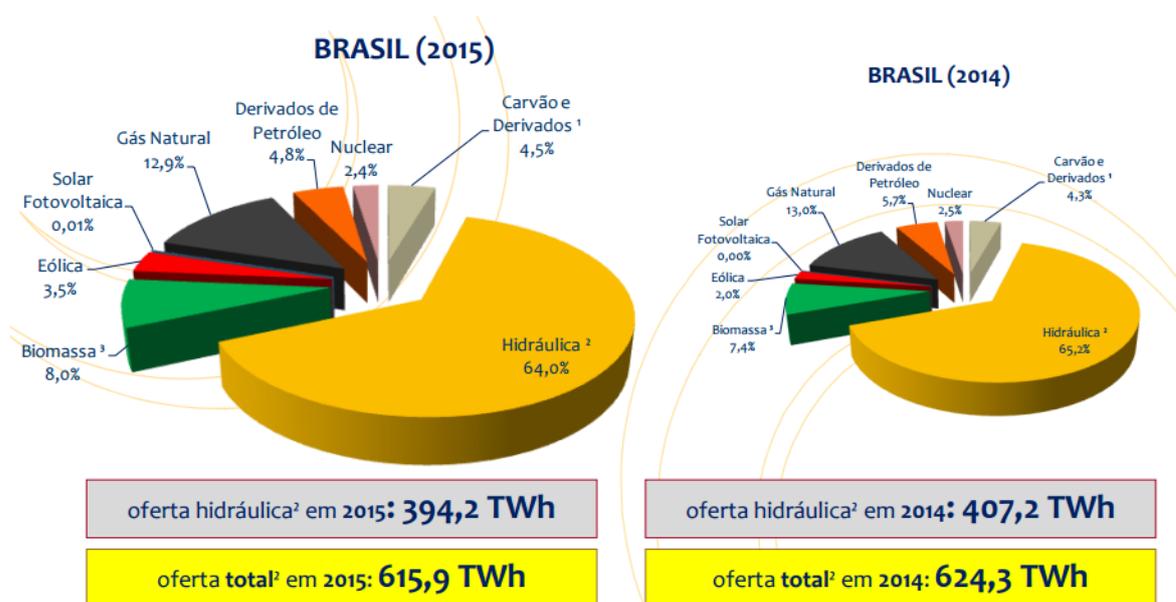


Figura 07– Matriz Elétrica Brasileira, com as participações por fonte, dos anos de 2015 e 2014.

Fonte: EPE, 2016.

Historicamente, o Brasil procurou depender de insumos energéticos nacionais sempre que possível, devido à grande dificuldade do país em gerar dólares para importá-lo e pelo enorme gasto que houve importando petróleo e seus derivados (GOLDEMBERG e MOREIRA, 2005). Ao contrário da matriz energética mundial, a matriz hidráulica foi sempre dominante no Brasil, uma vez que o país é um dos mais ricos do mundo em recursos hídricos. A hidroeletricidade atingiu cerca de 92% em 1995, 83% em 2002 (GOLDEMBERG e MOREIRA, 2005) e em 2015 atingiu uma parcela de 64% da energia produzida no país (EPE, 2016). O Brasil já explorou a maioria do seu potencial, restando boa parte de sua capacidade na região Amazônica. Entretanto, apesar de ser considerada uma energia renovável e limpa, a sociedade brasileira está cada vez mais consciente e se impõe na defesa contra os impactos ambientais gerados pela construção de novas usinas hidrelétricas.

Devido ao pequeno volume de chuvas em 2014 e 2015, o Brasil sofreu um período prolongado de secas, interferindo diretamente nos níveis de armazenamento dos reservatórios brasileiros. Para solucionar tal *déficit* no fornecimento de energia elétrica, outras fontes de energia foram mais requisitadas. Segundo Goldemberg e Moreira (2005), por razões de segurança de abastecimento, é mais interessante depender de vários energéticos primários. Essas variações no volume de chuvas, assim como os impactos ambientais justificam a inserção de fontes de energias renováveis não hídricas na matriz elétrica brasileira. Como fontes complementares, o Brasil se vale principalmente dos combustíveis fósseis, com uma contribuição de 12,9% de gás natural, 4,8% de derivados de petróleo e 4,5% de carvão mineral e derivados. Além de tais fontes não limpas, o Brasil se dispõe de duas usinas nucleares com uma participação de 2,4% na Oferta Interna de Energia (EPE, 2016).

Entre suas energias renováveis não hídricas, destacam-se o crescimento da energia eólica e da biomassa. O Brasil, apesar de ainda apresentar tímida participação no mercado eólico mundial, obteve crescimento significativo em sua capacidade instalada no período compreendido entre 2003 e 2013 (BNDS, 2013). Segundo o Balanço Energético, houve um crescimento de 78% da participação de energia eólica na Oferta Interna de Energia brasileira, do ano de 2014 ao ano de 2015 (EPE, 2016).

A energia solar, apesar da alta taxa de crescimento, ainda é pouco significativa na matriz (MME, 2016). No âmbito de energia fotovoltaica, o Brasil ainda carece de maiores investimentos na área. Muitos estudos desta fonte energética estão

em desenvolvimento em algumas universidades do país, mas o aporte financeiro em projetos de geração de energia elétrica através de iniciativas públicas e privadas ainda é insipiente, principalmente devido à alta tecnologia envolvida, e ao custo no investimento de retorno de longo prazo (TIEPOLO e CANGIOLIERI, 2012). Entretanto, há múltiplas razões pelas quais a energia solar fotovoltaica tende a crescer no Brasil.

O país possui uma disponibilidade muito grande de recursos naturais, de tal forma que em comparação a outros países, o Brasil pode ser considerado um país sustentável energeticamente. Em 2015, as fontes renováveis chegaram a 75,5% de participação na matriz de Oferta Interna de Energia Elétrica (MME, 2016) e só tendem a crescer ainda mais, com destaque às fontes de energia solar fotovoltaica, eólica e biomassa.

2.2.3 Energias Renováveis

O crescimento populacional, associado ao crescimento da renda per capita prevista, são fatores que impulsionarão os investimentos na matriz energética global (TIEPOLO *et al.*, 2012). Dentro destes conceitos, uma das grandes questões está em como atender as crescentes demandas energéticas da sociedade moderna (TIEPOLO, 2015), sendo que as principais fontes energéticas utilizadas a nível mundial, como os combustíveis fósseis e a energia nuclear, e a nível local, como a fonte hidráulica, geram notáveis impactos sociais, políticos e ambientais.

Dessa forma, cresce cada vez mais a busca por fontes renováveis e não poluentes, as quais não dependam de recursos limitados pela natureza e que durante sua exploração produzam impactos reduzidos ao meio ambiente (TIEPOLO *et al.*, 2012). Diz-se que uma fonte de energia é renovável quando não é possível estabelecer um fim temporal, ou seja, quando sua fonte é inesgotável (AGENEAL, 2016).

De acordo com o Balanço energético de 2016, 75,5% da Oferta Interna de energia elétrica brasileira é composta de energias renováveis, como pode ser observado na Figura 08 (EPE, 2016). Obviamente, grande parte dessa parcela é correspondida pela energia elétrica gerada pelas usinas hidrelétricas, no entanto, como já visto, o Brasil possui um número expressivo em geração de energia por meio de biomassa e usinas eólicas, além do alto crescimento da energia solar fotovoltaica.

A aceleração de tais energias é impulsionada por uma gama de fatores, incluindo a melhoria da relação custo-competitividade das tecnologias renováveis, iniciativas políticas, rápido acesso ao financiamento, segurança energética, preocupações ambientais e devido a crescente demanda de energia em economias emergentes e em desenvolvimento (REN21, 2016).

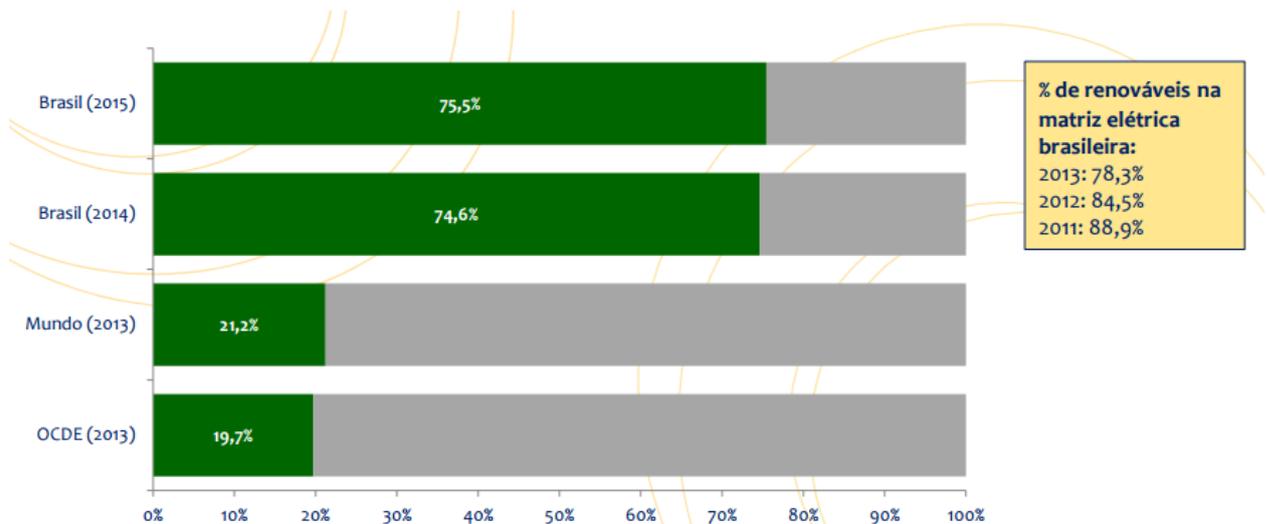


Figura 08– Participação de Fontes Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira.

Fonte: EPE, 2016.

A Energia eólica e a energia solar fotovoltaica tiveram adições recorde pelo segundo ano consecutivo, representando aproximadamente 77% das novas instalações a nível mundial. Até o final de 2015, a quantidade de energia renovável gerada no planeta era suficiente para abastecer uma estimativa de 23,7% da eletricidade global (REN21, 2016). Tais fontes alternativas de energia, que antigamente podiam apresentar um alto custo de geração, começam a ser parte fundamental na matriz elétrica de alguns países, já que a sua viabilidade vem tornando-se satisfatória (TOYAMA *et al.*, 2014).

O emprego em uma escala maior das fontes renováveis não hídricas observará a conciliação entre dois direcionamentos estratégicos: incentivar a busca de soluções “limpas” e sustentáveis para a matriz energética e minimizar o impacto do custo de produção de energia para o consumidor (EPE, 2007). O investimento em fontes como a biomassa, eólica e principalmente, a energia solar fotovoltaica vem crescendo de maneira a se esperar que tais fontes ocupem grande parte da matriz

elétrica brasileira e mundial. Com as tecnologias atualmente disponíveis, a tendência é que essas sejam as energias do futuro.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.3.1 Energia Solar

A energia solar surge como uma fonte de energia alternativa de recurso infinito, com um potencial enorme a ser explorado, em um momento em que a conscientização ambiental cresce em discernimento com as mudanças ambientais que afetam as relações da sociedade no mundo moderno.

Estima-se que o sol tenha reserva de hidrogênio suficiente para alimentar reações nucleares por mais cinco bilhões de anos, de maneira a considerar a energia solar como uma energia infinita (NASA, 2013 *apud* PINHO E GALDINO, 2014).

A energia solar intermitente na Terra é denominada de radiação solar e é responsável por todos os processos físicos, químicos, biológicos e meteorológicos que se fazem sentir no planeta (MONTEIRO, 2014). A magnitude de sua importância em relação a energia é imensurável, pois todas as outras fontes são derivadas da energia solar. O processo biológico de fotossíntese do reino vegetal é dependido de luz. Além de servirem como insumos alimentícios ao reino animal, as plantas fornecem o oxigênio necessário à vida aos seres humanos e ainda, servem como base para a geração de energia através de biomassa. A parte que resta, passa a fossilizar-se e eventualmente pode servir como combustível fóssil (HADDAD, 2004).

Aquecida pelo Sol, a água dos oceanos, rios e lagos elevam-se na atmosfera sob a forma de vapor, misturam-se ao ar e são carregadas pelo vento. Posteriormente, a água recai na terra como chuva, neve ou outra forma de umidade. Este ciclo hidrológico resulta na fonte de energia denominada energia hidráulica e auxiliam no enchimento dos níveis de reservatório de usinas hidrelétricas (HADDAD, 2004). A circulação atmosférica, causadora dos ventos, é influenciada pela radiação solar e nos encaminha a produção da energia eólica.

Além disso, a energia solar nos fornece aquecimento. Com as instalações adequadas, é obtida a energia solar térmica, a qual é utilizada por meio de coletores

e aquecedores solares. Já a energia heliotérmica é o processo de uso e acúmulo do calor proveniente dos raios solares com a utilização de concentradores, tais como espelhos. Os espelhos são utilizados para refletir a luz solar e concentrá-las em um único ponto, onde há um receptor, de forma a gerar uma enorme quantidade de calor, a qual será acumulada e utilizada para gerar eletricidade.

Sobretudo, a radiação solar pode ser usada para a conversão direta de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica. O crescimento da potência fotovoltaica instaladas nos últimos anos superou todas as previsões, inclusive as mais otimistas, demonstrando o potencial desta tecnologia como fonte de energia em todo mundo (ONU, 2013). A energia solar fotovoltaica é considerada limpa, renovável e uma das energias do futuro.

2.3.2 Energia Fotovoltaica

O princípio da conversão da energia solar em energia elétrica se fundamenta no efeito fotovoltaico, descoberto por Antoine Henri Becquerel em 1839. O físico observou que ao expor materiais semicondutores à radiação solar, os mesmos eram capazes de gerar uma corrente elétrica. Essa tecnologia permitiu com que, somente em 1954, houvesse a criação das células solares, nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos. Tais células foram fabricadas a partir de silício cristalino e atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica de 6%. Nos anos 1950-70 iniciaram-se as pesquisas intensivas nesta área, especialmente para aplicações espaciais. A grande mudança foi produzida a partir dos anos 70, motivada em parte pela primeira crise energética internacional, que fomentou uma tentativa de diversificação das fontes energéticas e promoveu a pesquisa e o desenvolvimento da energia fotovoltaica como uma fonte energética (ONU, 2013).

A energia solar fotovoltaica destaca-se por inúmeras vantagens frente às outras fontes energéticas, as quais pode-se citar:

- A radiação solar proveniente do sol é um recurso natural intermitente, sendo assim, a energia fotovoltaica é considerada como uma energia renovável;
- É uma energia limpa e sem fontes de poluição;

- As unidades de conversão de energia solar fotovoltaica podem operar com uma manutenção mínima;
- A tecnologia solar está desenvolvendo rapidamente, de tal forma em que os painéis solares estão cada dia mais evoluídos ao mesmo tempo em que os seus custos vêm decaindo. Fatos que tornam, cada vez mais, a energia solar uma solução economicamente viável;
- Garante maior estabilidade frente aos aumentos das tarifas de energia;
- O uso da energia solar fotovoltaica como uma geração distribuída pode reduzir o desperdício das perdas elétricas nas linhas de transmissão;
- A energia solar é oportuna em lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga a grandes investimentos em linhas de transmissão. Além disso, isso pode contribuir para reduzir a emigração da população rural de países em desenvolvimento para áreas urbanas incapazes de administrar adequadamente a semelhante avalanche humana (ONUDI, 2013) e;
- A energia solar pode ser utilizada em complementariedade com outra fonte energética. No caso do Brasil, no mesmo momento em que há chuvas em abundância em determinadas épocas, o que beneficia a geração de energia através das hidroelétricas, em outro momento há a escassez das chuvas e a predominância de radiação solar, o que beneficia a geração de energia através de fontes fotovoltaica (TIEPOLO e CANGIOLIERI, 2012).

O mercado mundial de energia solar fotovoltaica cresceu aproximadamente 25% em relação a 2014. Sendo assim, a capacidade instalada mundial foi elevada para 227 GW, em contrapartida aos 177 GW e aos 138 GW dos anos 2014 e 2013, respectivamente, como mostra a Figura 09. Além disso, a energia solar fotovoltaica experimentou mais um ano de crescimento recorde, adicionando 50 GW, o equivalente a um número estimado de 185 milhões de módulos fotovoltaicos. A China, o Japão e os Estados Unidos novamente representaram a maioria da capacidade adicional, mas os mercados emergentes em todos os continentes contribuíram significativamente para o crescimento global, impulsionado em grande parte pelo aumento do custo-competitividade da energia solar fotovoltaica (REN21, 2016).

Figure 14. Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2005–2015

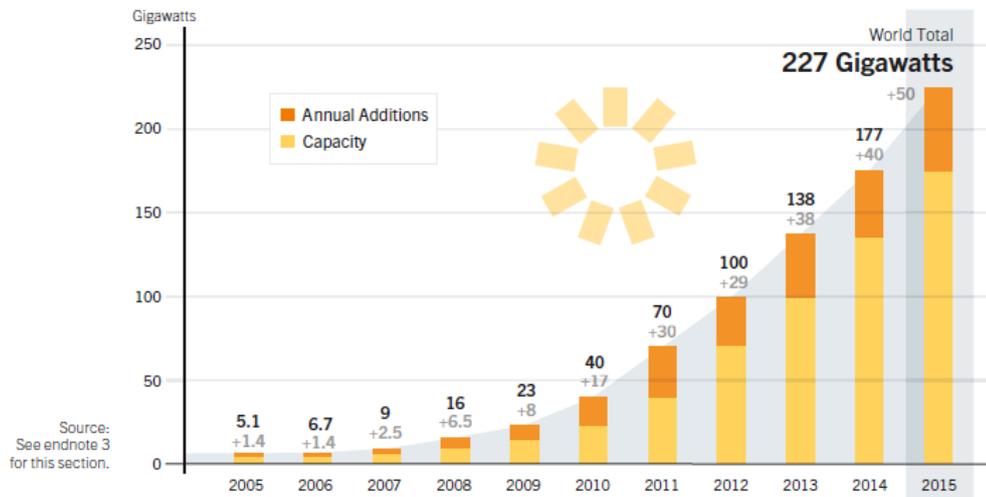


Figura 09– Crescimento Evolutivo da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.

Fonte: REN21, 2016.

O avanço tecnológico que tornou possível o desenvolvimento desta fonte energética nos mercados desenvolvidos e emergentes decorre da confluência de vários fatores: a maturidade tecnológica de todos os componentes do sistema unida ao crescimento da capacidade global de fabricação, o aumento da competitividade da energia solar fotovoltaica, a crescente demanda por energia elétrica, a consciência dos impactos causados pelas emissões do dióxido de carbono e a outros fatores conjunturais como o alto preço do petróleo e a facilidade para conseguir financiamento para este tipo de tecnologia (ONUUDI, 2013) (REN21, 2016). Sobretudo, o principal fator a ser considerado é que todos os países que se destacam na aplicação da energia solar fotovoltaica adotaram programas de incentivo, seja subsidiando a aquisição dos sistemas fotovoltaicos, remunerando atrativamente a energia fôtoegerada ou ambas as situações (URBANETZ, 2010).

De acordo com os dados da Administração Nacional de Energia da China, o país alcançou uma expressiva capacidade fotovoltaica instalada de 43,2 GW no início de 2016. Dessa forma, a nação asiática supera a potência alemã que, segundo seu órgão regulador de eletricidade, gás e outras infraestruturas, *Federal Network Agency*, possui uma capacidade de 39,6 GW instalados. Apesar disto e das convulsões econômicas pelas quais atravessa o país asiático, está previsto que a base instalada de painéis fotovoltaicos continue crescendo (BEJERANO, 2016).

A capacidade instalada de energia solar fotovoltaica cresce no Brasil de maneira lenta, mas expressiva. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2016, o país gerou 59 GWh no ano de 2015, superando os 16 GWh do ano anterior (EPE, 2016). Tais números tendem a crescer devido aos incentivos federais e regionais que estão sendo estabelecidos no país, tais como a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS) nas operações de compensação de energia na maioria dos estados brasileiros; o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), o qual realiza financiamentos nos equipamentos fotovoltaicos para consumidores residenciais e; os leilões de reserva envolvendo projetos de energia solar fotovoltaica. Além disso, programas como o Solcial, organização sem fins lucrativos que levam energia solar a quem mais precisa, o projeto Telhados Solares, o qual se baseia em um projeto de pesquisa e desenvolvimento da CPFL com a instalação de painéis solares em residências e comércios na cidade de Campinas e, sobretudo, o projeto Bônus Fotovoltaico, o qual oferecerá subsídio de 60% na compra de painéis fotovoltaicos para mil residências catarinenses, contribuem para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no país.

2.3.3 Radiação Solar

Devido às reações internas de fusão nuclear, o sol emite uma abundante quantidade de energia através de luz solar. Uma pequena parte dessa energia é transferida para a Terra. Nesse contexto, segundo a NBR 10899:2006, a radiação solar é a forma de transferência de energia advinda do sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas. Sua importância é muito expressiva, pois o sol é considerado o principal elemento para manter o clima na Terra, de tal forma a garantir o equilíbrio térmico na superfície terrestre. Existem duas grandezas quantificadoras da radiação solar: a Irradiância e a Irradiação.

De acordo com a NBR 10899:2006, a Irradiância solar é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área da mesma. Tal grandeza tem como unidade no Sistema Internacional de unidades (SI), Watt por metro quadrado (W/m^2). Já a Irradiação, definida pela mesma norma técnica, tem como definição como a irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo específico.

Ela é medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado (Wh/m^2 ou J/m^2).

Caso a radiação não tenha sido espelhada pela atmosfera, ou seja, não haja nenhum tipo de desvio até o raio encontrar a superfície determinada, a radiação é conhecida como direta. Para os raios que são absorvidos ou espalhados por partículas em suspensão, tais como poeira ou vapor d'água, denomina-se difusa. A superfície terrestre reflete uma fração da radiação solar recebida. Assim, o dispositivo fotovoltaico, dependendo de sua orientação, pode receber também parte desta radiação, a qual é denominada de albedo (ONUUDI, 2013). Por fim, entende-se por radiação global, a soma da radiação direta juntamente com a radiação difusa. As componentes da radiação solar podem ser observadas esquematicamente na Figura 10, em que a radiação difusa, direta e albedo estão representados pelas componentes 01, 02 e 03, respectivamente.

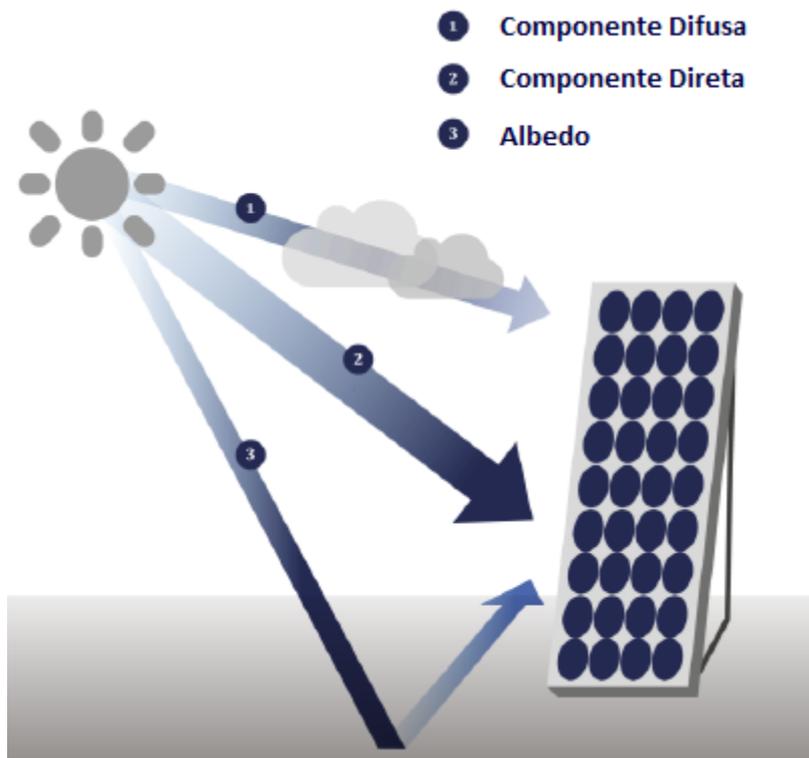


Figura 10– Classificação da Radiação Solar: Componentes direta, difusa e albedo.

Fonte: ONUUDI, 2013.

Além disso, a incidência de radiação solar varia diariamente, devido ao movimento de rotação da Terra, alternando períodos de tempo com incidência solar direta e períodos de tempo com ausência de incidência solar direta, períodos

conhecidos como dia e noite. Contudo, ainda deve-se considerar o movimento da Terra anualmente. O planeta em seu movimento em torno do sol descreve uma trajetória elíptica. O seu eixo, em relação ao plano normal à elipse, apresenta uma inclinação de $23,45^\circ$, a qual juntamente com o seu movimento de translação, dá origem as estações do ano (PINHO E GALDINO, 2014). Dessa forma, a radiação solar depende das condições atmosféricas, tais como nebulosidade e umidade relativa do ar; e da latitude local associada ao tempo, visto que os raios solares atingem a superfície com diferentes intensidades, variando com o dia/noite e com as estações do ano.

O fator primordial para se determinar a orientação dos painéis fotovoltaicos é a posição solar em relação à Terra. A captação de radiação solar ocorre de maneira mais eficiente quando os raios solares incidem perpendicularmente ao plano do painel fotovoltaico, de tal forma que para se resultar em máxima captação, seria necessário que o módulo fosse ajustado em todo momento (VILLALVA e GAZOLI, 2013). Como a maioria dos sistemas são fixos, para maximizar o aproveitamento da energia solar, é ajustada a posição do painel de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia (ANEEL, 2005).

2.3.4 Estrutura da Célula Fotovoltaica e o Efeito Fotovoltaico

O elemento fundamental no processo de conversão da energia solar em energia elétrica é a célula solar. As células solares são constituídas por materiais semicondutores, os quais possuem características intermediárias de um material isolante e um material condutor. Deve-se dar um destaque especial ao silício, elemento mais utilizado para a fabricação das células solares. Basicamente, elas são constituídas por uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (IZIDORO *et al.*, 2010), conceitos que serão definidos posteriormente. A célula solar com suas bases P e N podem ser observadas na Figura 11.

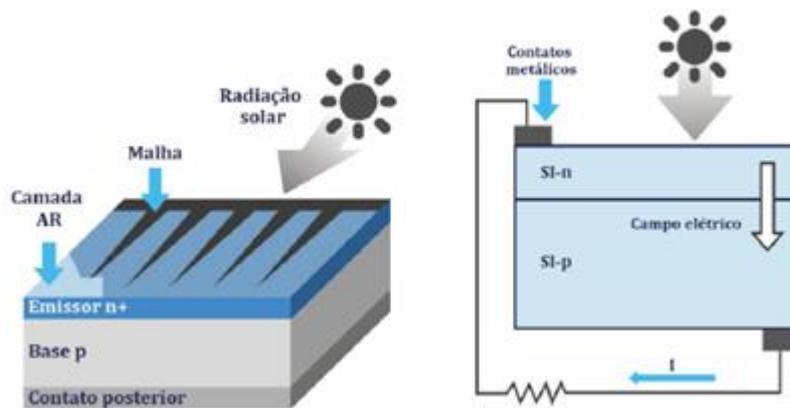


Figura 11– Estrutura de uma célula solar.

Fonte: ONUDI, 2013.

Os materiais intrínsecos são semicondutores cuidadosamente refinados para haver a redução de impurezas a um nível muito baixo (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004). O cristal de silício, em sua forma intrínseca, possui poucos elétrons livres devido a sua tetravalência. O átomo de silício possui quatro elétrons de valência, os quais são compartilhados por meio de ligações covalentes com átomos adjacentes, como é possível observar na parte (a) da Figura 12. Dessa forma, pode-se considerar o cristal de silício puro como um mau condutor elétrico. Para alterar a sua condutividade elétrica é utilizado um processo conhecido como dopagem, o qual é realizado introduzindo impurezas de maneira controlada com materiais que apresentam excesso ou defeito de elétrons com relação ao silício (ONUDI, 2013). Um material semicondutor submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco e pode ser do tipo N ou do tipo P.

O material do tipo N é criado com a introdução dos elementos de impureza que tem cinco elétrons na camada de valência, como é o caso do antimônio dopado num cristal de silício na parte (b) da Figura 12. É importante observar que as quatro ligações covalentes ainda se mantêm presentes, embora haja um elétron que pode se mover livremente dentro do recém-formado material do tipo N. Já o material do tipo P é criado com a introdução dos elementos de impureza que tem três elétrons na camada de valência, como é o caso do boro dopado num cristal de silício na parte (c) da Figura 12. Nesse caso há um número insuficiente de elétrons para realizar as quatro ligações covalentes, de tal modo que os espaços vazios são denominados de lacunas (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004).

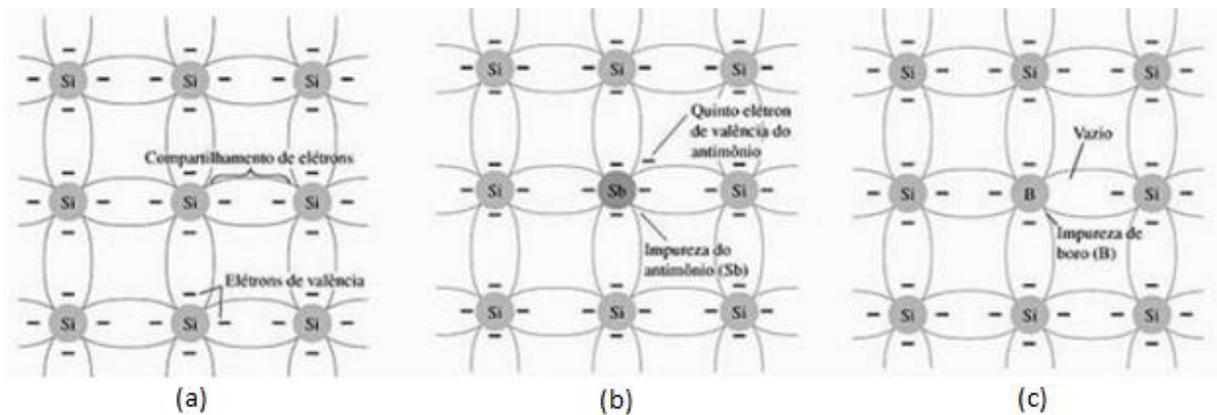


Figura 12– (a) Material de silício puro (b) Material de silício dopado tipo N (c) Material de silício dopado tipo P

Fonte: Adaptado de BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004.

Como enunciado, a célula solar é composta por uma capa de material tipo N e outra do tipo P. Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras (IZIDORO *et al.*, 2010). Entretanto, quando os materiais são unidos, os elétrons e as lacunas da região de junção se combinam, resultando em uma capa elétrica e em uma ausência de portadores livres na região próxima à junção e denominando a região como depleção (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004). A maioria das células está formada a partir de uma união p-n, a qual se adicionam contatos metálicos posteriores para poder extrair a corrente até o exterior (ONUDI, 2013), como pode ser visto na Figura 11.

O princípio de funcionamento de uma célula solar é explicado pelo efeito fotovoltaico, o qual foi relatado em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel. O físico francês observou que, caso fossem expostos à luz, eletrodos de prata mergulhados num eletrólito poderiam produzir uma pequena diferença de potencial e, por consequência, a geração de uma corrente elétrica (PINHO E GALDINO, 2014). Baseado em tal prática, pode-se afirmar que o efeito fotovoltaico é um fenômeno físico, o qual ocorre quando os fótons contidos na energia do sol incidem sobre um material semiconductor (RÜTHER, 2004), transmitindo sua energia aos elétrons de valência e ocasionando uma diferença de potencial entre a junção p-n. Gera-se assim um fluxo de elétrons na conexão e enquanto a luz continuar a incidir na célula, o fluxo de elétrons se manterá (IZIDORO *et al.*, 2010). A intensidade da corrente elétrica será proporcional à irradiação solar.

2.3.5 Geração Distribuída e a Energia Solar Fotovoltaica

A geração distribuída é conceituada como a energia gerada próxima ou no próprio local de consumo, independentemente da potência do sistema, tecnologia ou fonte utilizada (TOYAMA *et al.*, 2014). Ela foi amplamente utilizada durante a segunda metade do século XX, em um período crescente de industrialização, em que as redes de transporte e as tecnologias com viés à energia ainda eram escassas. Dessa forma, os comércios, as residências e até mesmo a agricultura geravam a sua própria energia elétrica para seus processos cotidianos. Com as melhorias técnicas nos transformadores e no transporte de energia, a partir da década de 40 foi que a geração centralizada de grande porte passou a ser utilizada, indicando melhoras expressivas no rendimento dos processos de produção de energia.

No entanto, com o aparecimento da cogeração logo após as crises petrolíferas, suas vantagens se mostraram expressivas novamente. Nesse contexto, a diminuição das perdas durante a transmissão de energia elétrica e por consequência, a sua melhor qualidade e a redução do custo de produção foram fatores decisivos para o investimento na geração distribuída. Além disso, destaca-se um maior aproveitamento dos recursos renováveis, uma maior estabilidade à tensão elétrica, o alívio de sobrecargas e congestionamentos no sistema de transmissão, bem como a possibilidade de adiar o investimento no setor elétrico. Adicionalmente, ela ressurgiu como uma necessidade à mitigação no efeito de impactos ambientais, utilizando-se de energias renováveis e permitindo o desenvolvimento de fontes de energia até então pouco exploradas.

2.3.6 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos

Segundo a Norma Brasileira, aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11704: 2008 – Sistemas Fotovoltaicos – Classificação, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados quanto à sua configuração e quanto à sua interligação com o sistema público de fornecimento de energia elétrica. Essa classificação é detalhada na Figura 13 e será mais bem compreendida com as definições logo em seguida.

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

Figura 13– Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos.

Fonte: ABNT NBR 11708, 2008.

A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos em cada situação (PINHO E GALDINO, 2014).

2.3.6.1. Quanto à Configuração

Quanto à configuração dos Sistemas Fotovoltaicos, a ABNT NBR 11704: 2008 os dividem em sistemas puros e sistemas híbridos.

2.3.6.1.1 Sistemas Puros

Os Sistemas puros utilizam gerador fotovoltaico como único gerador de energia elétrica (ABNT, 2008).

2.3.6.1.2 Sistemas Híbridos

São aqueles que resultam da associação do gerador fotovoltaico com outros tipos de geradores de energia elétrica (ABNT, 2008). Estes sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação ao usuário (PINHO E GALDINO, 2014). Uma de suas vantagens é o compartilhamento das linhas de transmissão das fontes geradoras de tal maneira a provocar uma redução nos custos das instalações.

2.3.6.2. Quanto à Interligação com o Sistema Público de Energia

Os sistemas fotovoltaicos, quanto à interligação com o sistema público de fornecimento de energia elétrica, por sua vez, podem ser classificados em Sistema Fotovoltaicos Isolados ou Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.

2.3.6.2.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

Os Sistemas Fotovoltaicos Isolados possuem como princípio de funcionamento a captação da energia solar por meio dos painéis fotovoltaicos e, por conseguinte, há a conversão da energia captada em energia elétrica decorrente do efeito fotovoltaico. Devido à natureza variável da radiação solar em ciclos diários (dia e noite, presença de nuvens) e anuais (diferentes níveis de irradiação dependente da estação do ano) é necessária a incorporação de um sistema de acumulação de energia elétrica para que, desse modo, a sua utilização ocorra no momento em que seja oportuna e não necessariamente no momento em que é produzida (ONU DI, 2013). As baterias eletroquímicas são os elementos armazenadores de energia mais comumente utilizados. A necessidade de um conjunto de baterias é responsável pelo aumento no custo de implantação e pelo custo de manutenção (SANTOS *et al.*, 2008).

Os Sistemas Fotovoltaicos Isolados também conhecidos como sistemas fotovoltaicos autônomos são comumente utilizados em áreas distantes dos centros urbanos e sem acesso à rede elétrica, tais como em residências em áreas rurais, ilhas, áreas de *camping* e comunidades isoladas. Como característica própria, esses sistemas não possuem qualquer conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica (ABNT, 2008). O Sistema Fotovoltaico Isolado, com seus componentes constituintes é demonstrado esquematicamente na Figura 14.

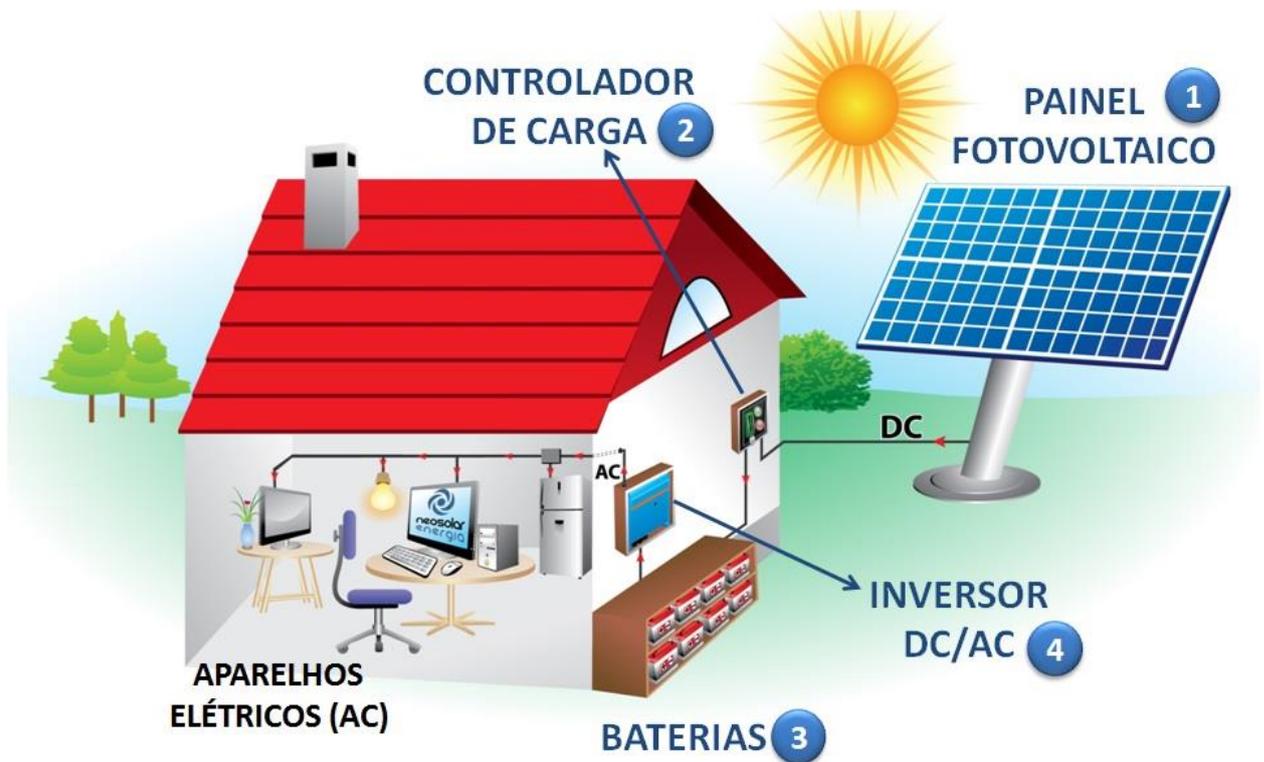


Figura 14– Esquema demonstrativo do Sistema Solar fotovoltaico Isolado.

Fonte: NEOSOLAR, 2016.

2.3.6.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Como o próprio nome já conceitua, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede são sistemas que estão efetivamente conectados ao sistema público de fornecimento de energia elétrica (ABNT, 2008). A energia produzida por esses sistemas é consumida diretamente pela carga ou injetada na rede elétrica para que possa ser consumida por outras unidades consumidoras do sistema de distribuição. Dessa forma, na maioria dos casos, não são necessários o uso de acumuladores. Basicamente, a rede elétrica da concessionária é vista como o elemento armazenador, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede (URBANETZ, 2010).

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede são constituídos basicamente pelos painéis fotovoltaicos, um inversor e um de medidor eletrônico, o qual realiza o balanço de energia elétrica injetada na rede pública e consumida da rede pública. Tal sistema e seus componentes constituintes são demonstrados na Figura 15.

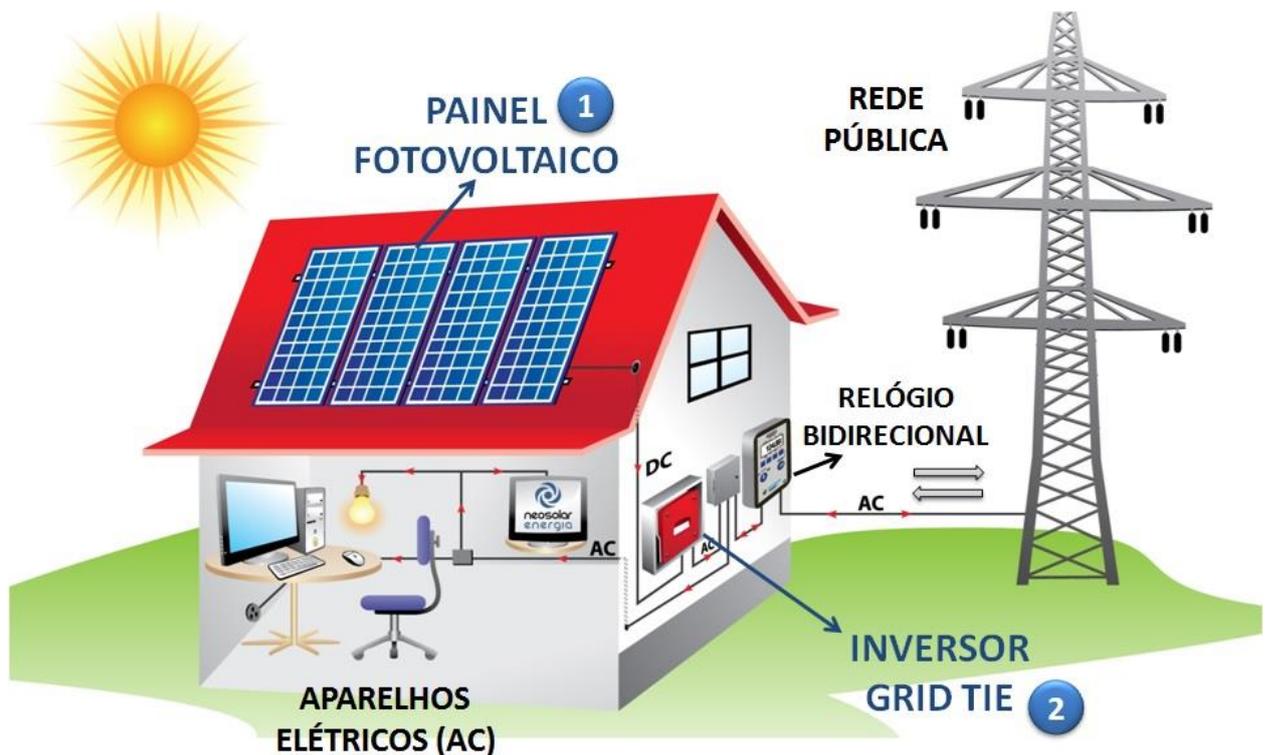


Figura 15– Esquema demonstrativo do Sistema Solar fotovoltaico conectado à rede.

Fonte: NEOSOLAR, 2016.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede possuem como principais vantagens a sua elevada produtividade, visto que toda a energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos é utilizada; a ausência de um conjunto de baterias (na maioria dos casos), diminuindo o custo da instalação do sistema e reduzindo o número de manutenções recorrentes e, por último; o inversor é capaz de evitar o fenômeno de ilhamento (SANTOS *et al.*, 2008). O ilhamento ocorre quando parte da rede elétrica é desconectada propositadamente ou acidentalmente do restante do sistema da concessionária, mas esta continua a ser energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a ela, formando um subsistema isolado (URBANETZ, 2010). Caso ocorra a ausência de energia elétrica da rede, o inversor desligará o sistema fotovoltaico, evitando a injeção de energia elétrica ao sistema elétrico e consequentemente, garantindo a segurança de operadores da rede elétrica em uma eventual manutenção durante tal período.

2.3.6.3. Resolução Normativa ANEEL N°482/2012 e N° 687/2015

Com a crescente utilização da geração distribuída na última década, surgiu a necessidade da elaboração de normas para garantir a qualidade e a segurança do Sistema Elétrico. Sendo assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu as condições gerais para o sistema de compensação de energia elétrica por meio da Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012. Publicada em 17 de abril de 2012, esta resolução define o Sistema de Compensação, ou também conhecido como *net metering*, como um arranjo no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou outra unidade consumidora de mesma titularidade. (ANEEL, 2012) (PINHO E GALDINO, 2014).

Sendo assim, durante o dia, a energia produzida atende o consumidor e a energia elétrica excedente produzida é injetada na rede. À noite, quando o sistema não produz energia, a unidade consumidora utiliza a energia do sistema centralizado. No final do mês, ao fechar o faturamento, a distribuidora de energia fatura a diferença negativa ou credita a diferença positiva, indicando um consumo maior ou uma geração maior respectivamente (GENERGIA, 2014). O sistema de compensação é representado esquematicamente na Figura 16.

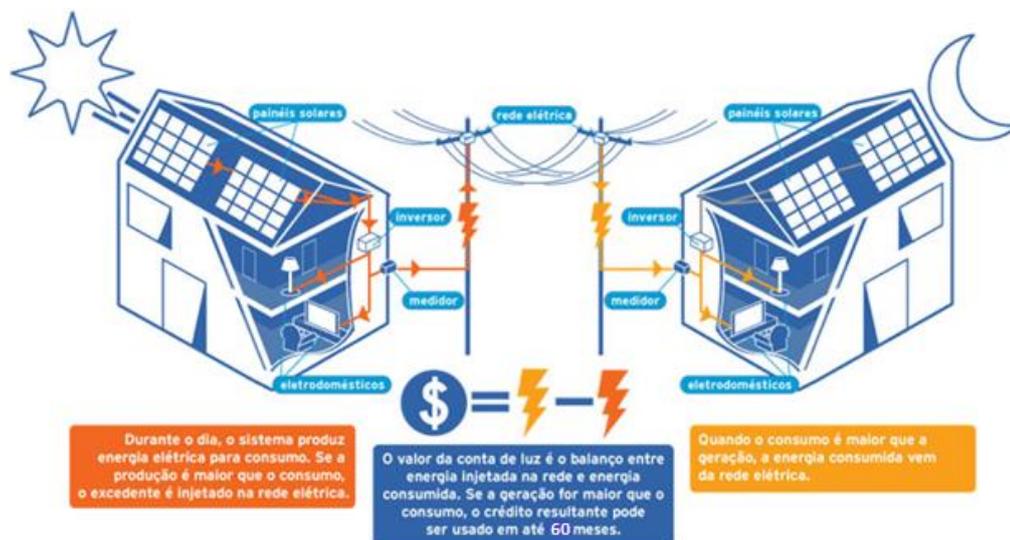


Figura 16– Esquema explicativo do Sistema de Compensação (*Net Metering*).

Fonte: Adaptado de GENERGIA, 2014.

A Resolução Normativa Aneel Nº 482/2012 define microgeração distribuída e minigeração distribuída como centrais geradoras de energia elétrica que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. O tamanho da instalação é o que as diferencia, de modo que, de acordo com a Resolução Normativa Aneel Nº 687/2015, entende-se por microgeração uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW e, por minigeração, uma central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e inferior ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou 5 MW para cogeração qualificada e demais fontes renováveis, incluindo a geração fotovoltaica.

Caso a unidade consumidora tenha produzido energia elétrica maior que o consumo, o excedente é injetado na rede elétrica e convertido em créditos que podem ser utilizados pelo consumidor em um prazo de 60 meses subsequentes a injeção, garantindo à adequação às sazonalidades de produção e consumo. Além disso, os créditos podem ser usados em outras unidades consumidoras do mesmo titular, possuidor do mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda, desde que as unidades sejam atendidas pela mesma distribuidora de energia (ENERGIA, 2014).

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão (URBANETZ, 2010). Sendo assim, eles obedecem a Resolução Normativa ANEEL Nº 482/2012, bem como a Resolução Normativa ANEEL Nº 687/2015, podendo atender ao Sistema de Compensação.

2.3.7 Componentes de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

2.3.7.1 Células Solares e Painéis Solares

As células fotovoltaicas são os dispositivos elementares dos sistemas fotovoltaicos, pois são elas as responsáveis por converter a energia solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Como já detalhado, sua estrutura é baseada em uma junção de materiais semicondutores do tipo P e do tipo N.

As associações de células fotovoltaicas formam um módulo fotovoltaico. A quantidade das células e conseqüentemente, o tamanho dos módulos apresentam uma grande variação no mercado (ONUUDI, 2013). Os módulos fotovoltaicos podem ser utilizados individualmente ou associados em série e/ou paralelo, de modo a formar um painel fotovoltaico e a obter maiores tensões e/ou correntes para gerar a energia requerida pela carga (BRITO E SILVA, 2006) (URBANETZ, 2010). A Figura 17 diferencia célula, módulo e painel fotovoltaico.



Figura 17– Célula, Módulo e Painel Fotovoltaico.

Fonte: URBANETZ, 2010.

Segundo Rüter (2004), os painéis fotovoltaicos são construídos e projetados para serem utilizados externamente, de tal forma a suportar as intempéries. Nessas condições os fabricantes garantem que os módulos fotovoltaicos funcionam de modo satisfatório por 20-25 anos e operam com uma eficiência de 80% da potência nominal após esse tempo (TOYAMA et al., 2014 apud RÜTHER, 2004).

Atualmente, quase 80% dos módulos fotovoltaicos no mundo são baseados em alguma variedade de silício (PORTAL SOLAR, 2016). Isso decorre devido a se tratar de um material abundante no planeta Terra, não tóxico e por possuir um processo de fabricação menos complexo e de menor custo quando comparado com outros materiais (VILLALVA e GAZOLI, 2013).

O Brasil é o país que detém as maiores jazidas mundiais de quartzo (MME, 2009), a matéria bruta para o silício. Estão localizadas principalmente nos estados da Bahia e de Minas Gerais. Apesar do enorme potencial, o país ainda não se familiarizou

com os processos de alta purificação, de tal forma que exporta o silício metalúrgico, com um índice de pureza muito baixo (ANUNCIACÃO, 2012). Alguns processos de alta purificação já vêm sendo estudados no Brasil e alguns resultados expressivos já foram observados. Em 2012, os professores Francisco das Chagas Marques e Paulo Roberto Mei, da Universidade Estadual de Campinas purificaram o silício até o nível de 99,9993 % (ANUNCIACÃO, 2012). Com estudos avançados e uma futura aplicação de processos purificadores, a tendência é que produção a nacional de módulos fotovoltaico leve a uma redução de custos nos sistemas fotovoltaicos (MANCILHA, 2013).

As células fotovoltaicas, segundo Rüter (2004), podem ser divididas em duas gerações: as lâminas cristalinas e as de filmes finos.

2.3.7.2 1º Geração – Células de Lâminas Cristalinas

Dentre as primeiras células solares que surgiram, pode-se destacar as Células de Silício Monocristalinas (m-Si) e as Células de Silício policristalinas (p-Si).

2.3.7.2.1 Célula de Silício Monocristalina (m-Si)

A célula de silício monocristalino (m-Si), representada na Figura 18, é a mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção a nível comercial. Elas se consolidaram no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade (BITTENCOURT, 2011). Seus módulos, apresentados na Figura 18, possuem uma alta eficiência na conversão da luz solar em eletricidade, podendo variar entre 17% e 22% (SAPA SOLAR, 2016). Essa elevada eficiência é explicada pela grande experiência de fabricação deste produto e pela alta pureza do material (PINHO E GALDINO, 2014). Em contrapartida ao bom rendimento, seu custo de produção é bastante elevado. Tais células são produzidas em fornos especiais que atingem até 1400 °C, consumindo uma intensa quantidade de energia e encarecendo o seu custo. As células de silício monocristalinas são relativamente espessas, compreendendo entre 300 a 400 μm . Segundo a Eletrobras (2010), células como essa possuem uma vida útil compreendida entre 20 e 40 anos.

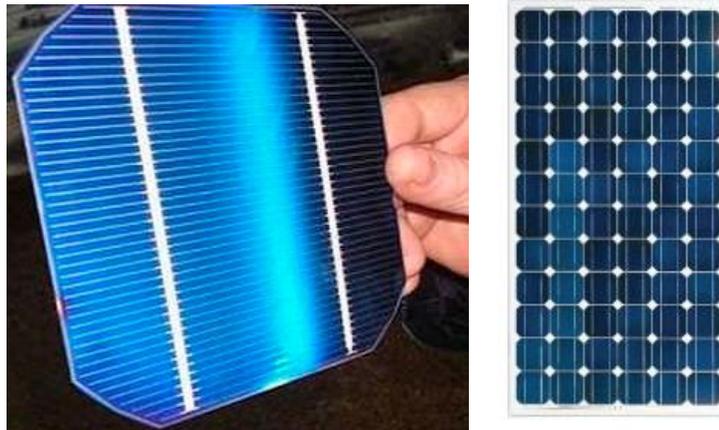


Figura 18– Célula e módulo de silício monocristalino.

Fonte: DIRECT INDUSTRY, 2016. MET RENOVÁVEIS, 2016.

2.3.7.2.2 Célula de Silício Policristalina (p-Si)

As células de silício policristalinas (p-Si), apresentadas na Figura 19, possuem uma eficiência menor quando comparadas as células monocristalinas. Seus módulos, que podem ser observados na Figura 19, possuem um rendimento na ordem de 13 a 16%, devido à imperfeição de seu cristal (SOLARVOLT, 2015). Sendo assim, seu custo é reduzido, pois necessitam de menos energia em seu processo de fabricação. Segundo a Eletrobras (2011), células como essa possuem uma vida útil compreendida entre 20 e 40 anos.

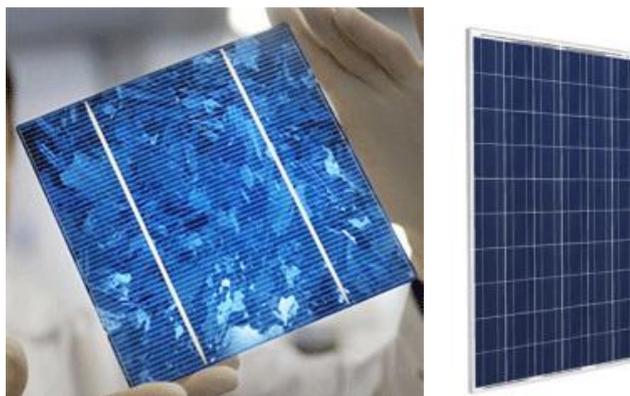


Figura 19– Célula e módulo de silício policristalino.

Fonte: Portaille Solaire, 2016. MET Renováveis, 2016.

As células de silício policristalino (p-Si) se diferem das células de silício monocristalino devido sua estrutura atômica, como pode ser observado na Figura 20.

Enquanto a monocristalina é formada pela mesma rede cristalina, a estrutura da policristalina está associada a vários monocristais (ONUUDI, 2013).

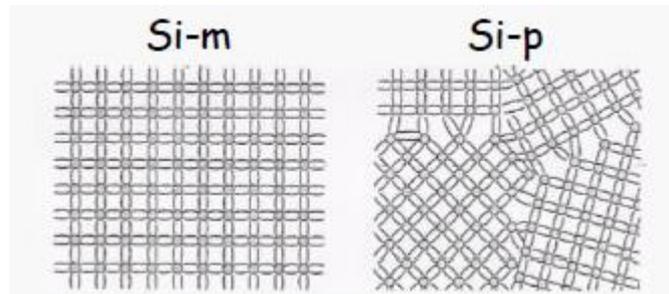


Figura 20– Estrutura atômica das células de silício mono e policristalino.

Fonte: ONUUDI, 2013.

2.3.7.3 2ª Geração – Célula de Filmes Finos

As células da segunda geração, ou de Filmes Finos, são atrativas devido a possuírem uma série de vantagens em relação às cristalinas, tais como a menor quantidade de matéria prima para a sua fabricação; um menor custo de sua produção, visto que utilizam fornos a uma temperatura entre 200 e 500 °C em contraste aos 1500 °C utilizados pelas células da primeira geração; e uma menor complexidade de produção. Tal tecnologia acaba sendo prejudicada no mercado devido a sua baixa eficiência e a toxicidade de alguns elementos que a compõe.

Tais células que se utilizam da tecnologia de filmes finos possuem uma espessura na ordem de 1 μm . Tal tecnologia possibilita a flexibilidade do painel solar, pois baseia-se na deposição de materiais semicondutores em suportes de vidro, polímeros, alumínio, aço (MANCILHA, 2013). Entre as mais comuns estão as Células de Silício Amorfo, as Células de Telureto de Cádmio, as Células de Disseleneto de Cobre-Índio e as Células de Disseleto de Cobre-Índio-Gálio.

2.3.7.3.1 Célula de Silício Amorfo (a-Si)

Apesar das células de silício amorfo (a-Si) ter um custo reduzido, a sua eficiência é muito baixa quando comparada às tecnologias apresentadas anteriormente. A eficiência de seus módulos varia entre 8% e 10% (RÜTHER, 2004). Essa tecnologia possui uma boa resposta sob iluminação artificial e sob radiação difusa. Por sua aparência estética mais atraente, associado aos seus painéis flexíveis,

inquebráveis, mais leves e semitransparentes, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil (BITTENCOURT, 2011). Uma boa exemplificação é mostrada na Figura 21, a qual pode ser observada painéis solares fotovoltaicos de silício amorfo fabricado diretamente sobre as telhas de vidro curvas.



Figura 21– À esquerda, painel solar fotovoltaico de silício amorfo e à direita, painéis solares fotovoltaicos de silício amorfo fabricado diretamente sobre telhas de vidro curvas.

Fonte: MET RENOVÁVEIS, 2016. RÜTHER, 1999.

Está cada dia mais comum à utilização de painéis de silício amorfo na integração à envoltória de edificações como, por exemplo, na fachada ventilada fotovoltaica no escritório da FEMSA em Monterrei, no México, e na fachada ventilada fotovoltaica no escritório sede da Onyx solar localizada em Ávila, na Espanha. Deste modo, os painéis possuem dupla funcionalidade, pois geram eletricidade e também servem como elemento arquitetônico de vedação (SANTOS *et al.*, 2008). Ambos os projetos podem ser vistos na Figura 22.

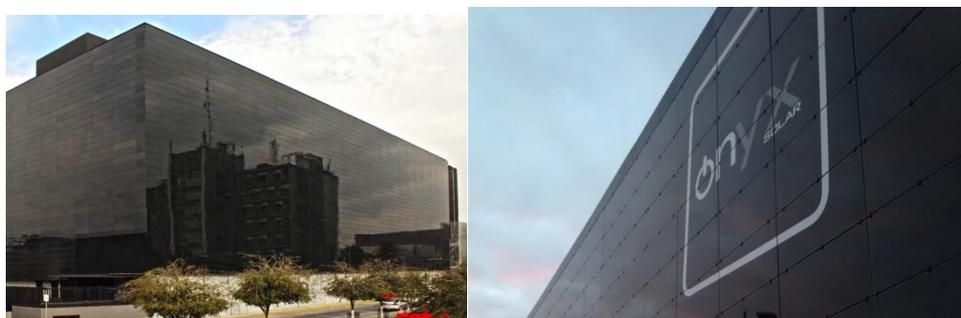


Figura 22 – Integração de placas solares à edificações. À esquerda, fachada ventilada fotovoltaica no escritório sede da FEMSA em Monterrei, México. À direita, fachada ventilada fotovoltaica no escritório da Onyx Solar em Ávila, Espanha.

Fonte: GEODESIGN, 2016. INNOVASPAIN, 2016.

As células de silício amorfo se diferem das outras células de silício devido ao seu alto grau de desordem em sua estrutura, em quais as posições, as distâncias interatômicas e as direções das ligações apresentam dispersão com relação às da estrutura cristalina ordenada (ONUDI, 2013). Segundo a Eletrobras (2011), células como essa possuem uma vida útil compreendida entre 15 e 25 anos.

2.3.7.3.2 Célula de Telureto de Cádmio (CdTe)

As células de Telureto de Cádmio (CdTe) são formadas por uma estrutura homogênea de Cádmio e Telúrio. Assim como as células de silício amorfo, seus custos de produção são atrativamente baixos para a produção em grande escala (RÜTHER, 1999) (BITTENCOURT, 2011). Seus módulos apresentam uma eficiência de cerca de 8% e um potencial considerável para a redução de custos quando produzida em massa (MONTEIRO, 2014). Contudo, as células de Telureto de Cádmio apresentam um risco ao meio ambiente, pois o Cádmio é altamente tóxico.

2.3.7.3.3 Célula de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS)

As células de disseleneto de cobre-índio (CIS) são formadas por três elementos distintos: selênio, cobre e índio. Estas células apresentam uma excelente eficiência na absorção, baixa deterioração e boa estabilidade quando sujeitas à incidência luminosa (MONTEIRO, 2014). Seus módulos possuem uma eficiência entre 7,5% e 9,5% e caso produzidas em massa, podem obter baixos custos de investimento.

2.3.7.3.4 Célula de Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio(CIGS)

As células de disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) são formadas por selênio, cobre e uma ligação índio-gálio. Tais células permitem obter um bom desempenho quando comparadas com as CIS, podendo chegar aos 12% de eficiência em seus módulos (MONTEIRO, 2014).

De maneira comparativa, é possível observar na Figura 23 a eficiência dos módulos em função dos tipos de células apresentados. É importante ressaltar que a

eficiência dos módulos fotovoltaicos será sempre menor do que as suas próprias células individualmente.

Tecnologia	Eficiência Comercial
Silício Monocristalino	17% - 22%
Silício Policristalino	13% - 16%
Silício Amorfo	6% - 10%
Telureto de cádmio	8%
Disseleto de cobre-índio	7,5% - 9,5%
Disseleto de cobre-índio-gálio	12%

Figura 23– Eficiência dos módulos em função das células utilizadas.

Fonte: Aatoria própria, 2017.

2.3.7.4 Medidores Eletrônicos

O medidor de energia elétrica é um equipamento que possui como funcionalidade medir o consumo de energia elétrica (kWh) gasto em um determinado período de tempo. Atualmente existem diversos modelos no mercado e entre eles destacam-se o analógico e o eletrônico.

A Resolução Normativa ANEEL N° 687/2015 prevê a medição bidirecional de energia elétrica como o principal sistema de medição de energia, com a utilização de medidores eletrônicos, em sistemas de minigeração e microgeração distribuídas para a viabilização do sistema de compensação. Essa medição permite que a energia consumida e a energia injetada na rede de distribuição sejam registradas separadamente por um medidor bidirecional, o qual pode ser visto na Figura 24 (PINHO E GALDINO, 2014). O sistema esquemático de medição bidirecional com um medidor bidirecional é mostrado na Figura 25.

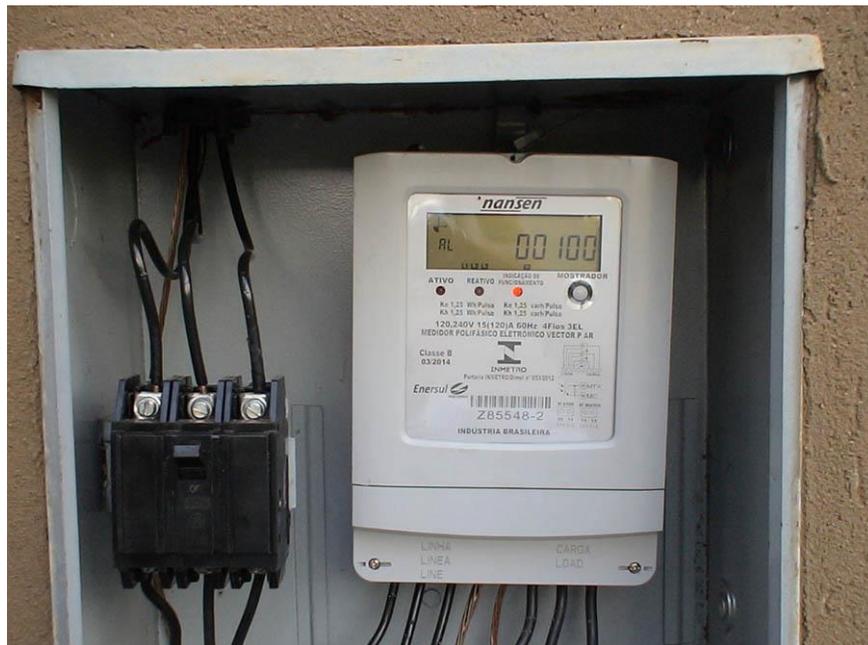


Figura 24—Medidor Eletrônico Bidirecional.

Fonte: SUNENERGY, 2016.

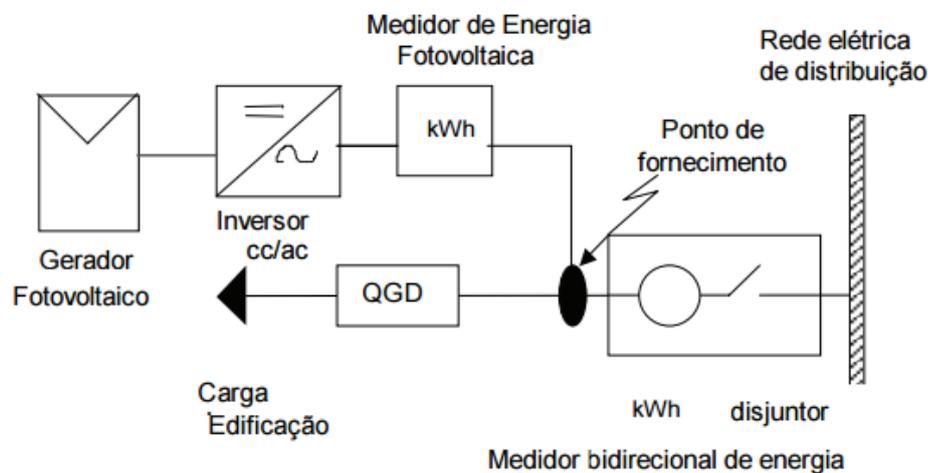


Figura 25 – Sistema de Medição Bidirecional com a utilização de um medidor bidirecional.

Fonte: ZILLES, 2002.

Segundo a ANEEL (2016), a distribuidora é responsável por adquirir e instalar o sistema de medição, sem custos para a unidade consumidora no caso de microgeração distribuída. Já no caso da minigeração distribuída, o consumidor é responsável por ressarcir a distribuidora pelos custos de adequação do sistema de medição.

2.3.7.5 Inversores

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (PINHO E GALDINO, 2014). No caso dos Sistemas Fotovoltaicos Isolados, a energia acumulada nas baterias se direciona ao inversor, o qual transforma a tensão CC em uma onda senoidal sem nenhuma referência externa e em seguida, alimenta as cargas conectadas ao sistema. Já para os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, a tensão de corrente alternada de saída do inversor deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas a serem alimentadas, sendo compatível com a forma de onda da rede de distribuição, pois o excedente é injetado na rede elétrica pelo sistema de compensação (PINHO E GALDINO, 2014).

Um inversor ideal deve possuir alta eficiência de conversão, alta confiabilidade e baixa manutenção, boa regulação na tensão de saída, forma de onda senoidal com baixo conteúdo harmônico, baixa emissão de ruído audível, baixa emissão de interferência eletromagnética, garantir segurança tanto para as pessoas quanto para a instalação e uma possuir uma garantia de fábrica de pelo menos dois anos (PINHO E GALDINO, 2014).

Uma das funções mais importantes dos inversores é a capacidade de se desconectar da rede de distribuição elétrica. O inversor desliga-se quando não há a presença de energia elétrica na rede de distribuição, seja por uma contingência ou por uma manutenção programada pela distribuidora. Tal ação evita o fenômeno de ilhamento. Dessa forma, a energia gerada pelos módulos não é injetada na rede, de forma a evitar possíveis acidentes.

3. ANÁLISE DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE CURITIBA

O objetivo deste capítulo é comparar o potencial fotovoltaico da cidade de Curitiba com o estado do Paraná, com outros estados brasileiros e com a Europa através do Atlas Fotovoltaico do Estado do Paraná, que foi elaborado com os mesmos critérios utilizados pela Comissão Europeia, o qual é composto por um conjunto de mapas com valores de Irradiação e de Produtividade Estimada Total Anual, Média Diária Sazonal e Média Diária Mensal. Por meio desta comparação pretende-se evidenciar o potencial fotovoltaico em Curitiba.

3.1 COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE CURITIBA COM O ESTADO DO PARANÁ

As perspectivas e oportunidades de aproveitamento do potencial econômico relacionado com a exploração comercial dos recursos energéticos da radiação solar estão relacionados a dois aspectos: desenvolvimento de tecnologia competitiva de conversão e armazenamento dessa energia e informações seguras e da política energética do país.

Para elaboração do Atlas Fotovoltaico do estado do Paraná foram considerados os mesmos critérios utilizados pela Comissão Europeia tais como: potência do sistema de 1 kWp, taxa de desempenho de 75 %, irradiância em condições padrão de teste de 1.000 W/m², inclinação do sistema fotovoltaico igual a latitude da localidade pesquisada, e orientação do sistema fotovoltaico para o norte verdadeiro (norte geográfico) em função do Paraná encontrar-se no hemisfério sul. Para as regiões do hemisfério norte, como a Europa, a orientação dos módulos deve estar direcionada para o sul geográfico (TIEPOLO, 2015).

A Figura 26 mostra o mapa fotovoltaico do Estado do Paraná – total anual para o plano inclinado.

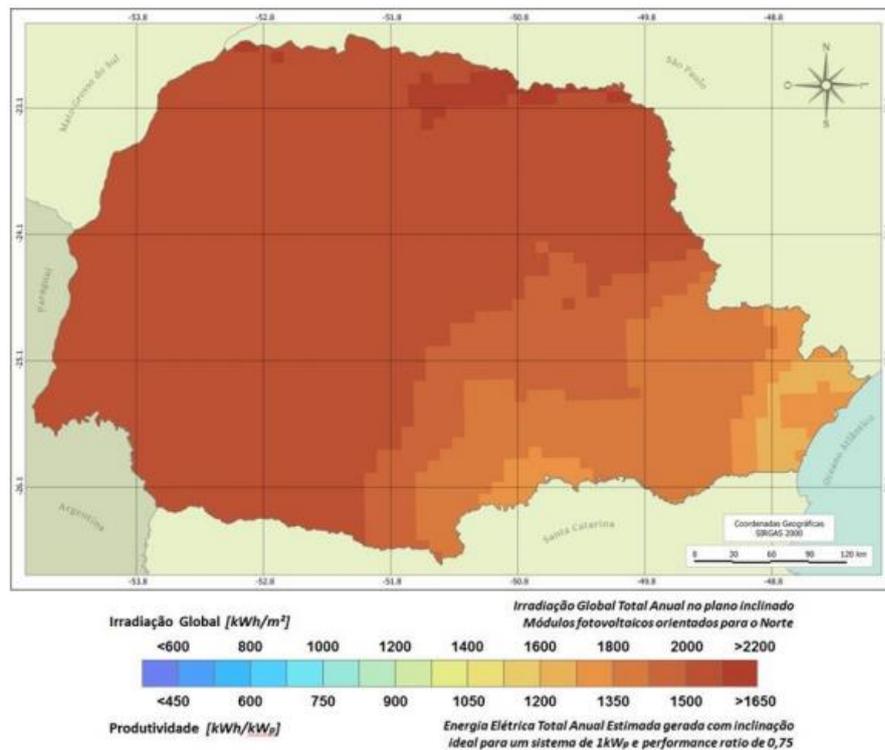


Figura 26 – Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná – Total Anual (Plano Inclinado).

Fonte: TIEPOLO (2015).

A Tabela 01 apresenta os valores de irradiação e de produtividade gerada estimada Total Média Anual no Paraná e na cidade de Curitiba. A cidade de Curitiba apresenta uma Média Total Anual de Irradiação e Produtividade Estimada de 1.829 kWh/m².ano e 1.372 kWh/kWp.ano respectivamente, o que indica irradiação total média anual inferior em 7,91% comparado ao estado do Paraná (TIEPOLO, 2015).

Tabela 01– Valores de Irradiação no plano inclinado e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no estado do Paraná e na cidade de Curitiba.

Região	Irradiação Total (H_{TOT}) Média Anual em kWh/m ² .ano	Produtividade Total Média Anual Estimada em kWh/kWp.ano, para SFVCR com inclinação igual a latitude, orientação norte e TD 75%	Diferença percentual da média obtida na cidade de Curitiba em relação a média obtida no estado do Paraná
Estado do Paraná	1986	1490	
Cidade de Curitiba	1829	1372	-7,91%

Fonte: Adaptado de TIEPOLO (2015).

Através da Figura 27 e Figura 28, é possível observar que o estado do Paraná possui potencial heterogêneo de produção de energia elétrica ao longo do ano, de forma a apresentar variações de irradiação mês a mês.

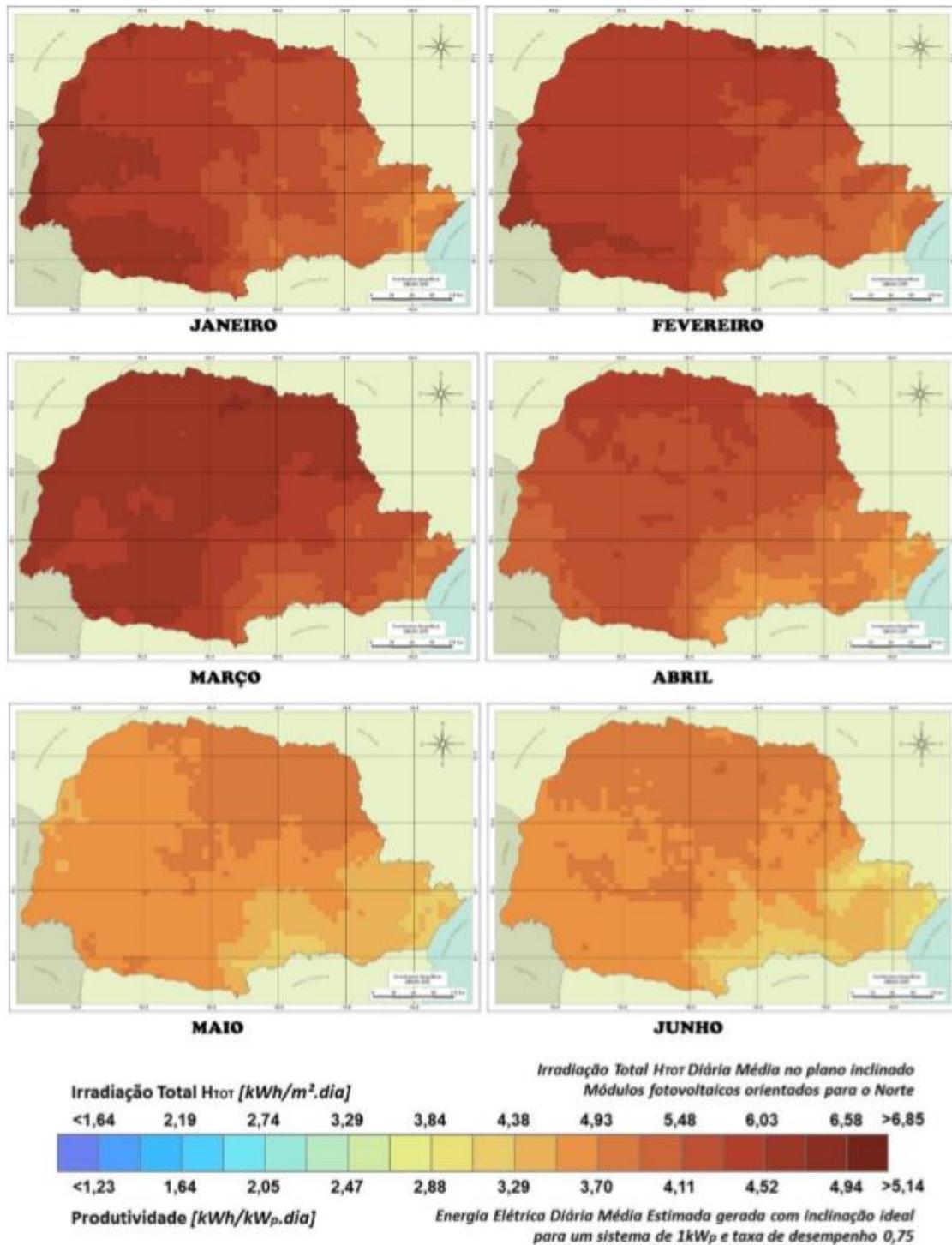


Figura 27 – Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) - Janeiro a Junho.

Fonte: TIEPOLO (2015).

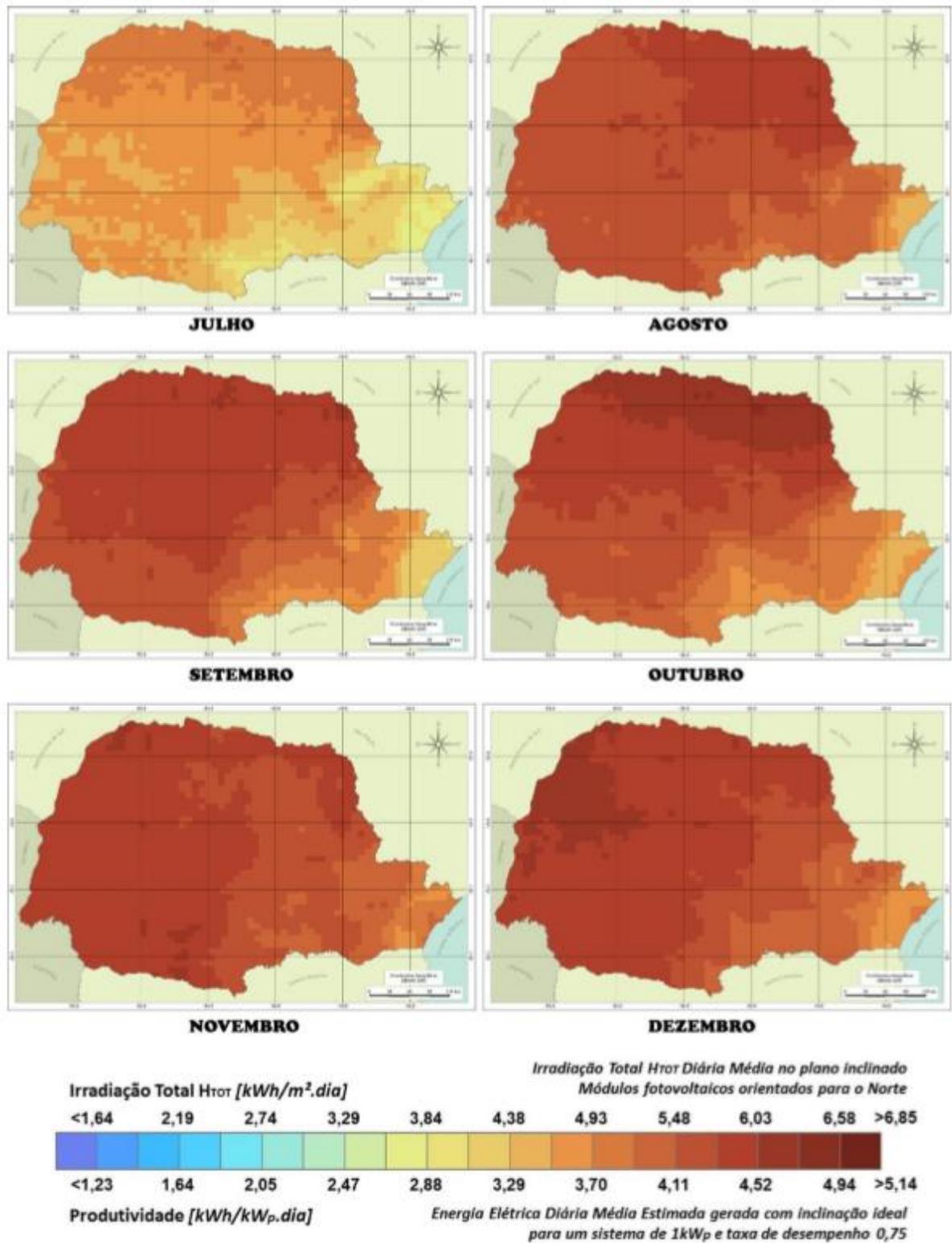


Figura 28– Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná - Média Diária Mensal (Plano Inclinado) - Julho a Dezembro.

Fonte: TIEPOLO (2015).

3.2 COMPARAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DA CIDADE DE CURITIBA COM OUTROS ESTADOS DO BRASIL

A Figura 29 representa o Mapa Fotovoltaico Brasileiro – Total Anual com o padrão de cores e escala com os mesmos critérios utilizados pela Comissão Europeia na elaboração dos mapas europeus, e com a divisão dos estados de acordo com dados do IBGE – 2009.

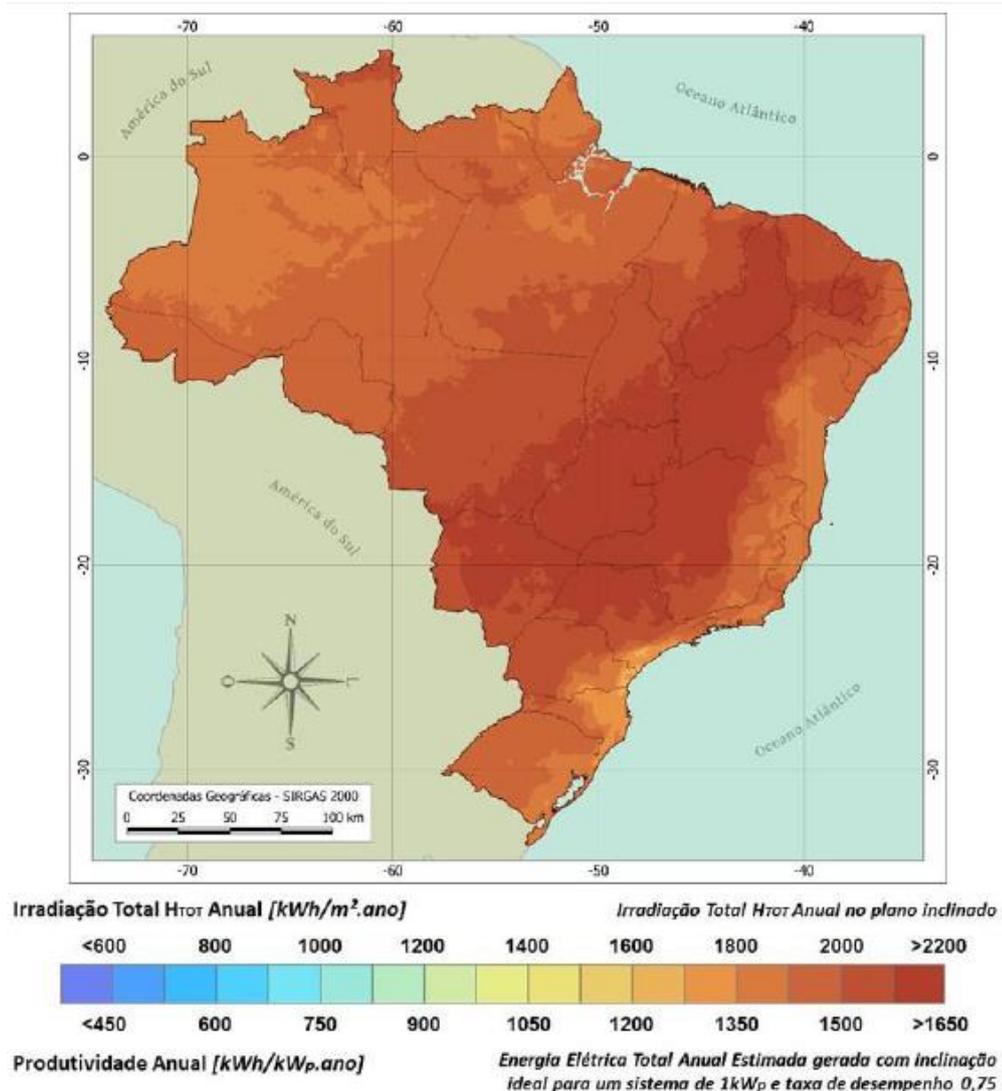


Figura 29– Mapa Fotovoltaico Brasileiro - Total Anual.

Fonte: TIEPOLO (2015).

A Irradiação e Produtividade Total Anual Média obtida na cidade de Curitiba é 8,6% inferior a média obtida no Brasil. A Tabela 02 indica a diferença em percentual

da média obtida em Curitiba com a média apresentada em cada um dos estados brasileiros (TIEPOLO, 2015).

Tabela 02 - Valores de Irradiação e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no plano inclinado encontrados nos estados e no Brasil para uma TD 75%.

Região	Irradiação Total Média Anual em kWh/m ² .ano	Valor de Produtividade Total Anual no Plano Inclinado (kWh/kWp.ano)	Diferença percentual da média obtida na cidade de Curitiba em relação a média obtida no Brasil
Acre	1933	1450	-5,38%
Alagoas	1970	1478	-7,16%
Amapá	1903	1427	-3,87%
Amazonas	1898	1423	-3,61%
Bahia	2055	1541	-10,98%
Ceará	2079	1559	-12,01%
Distrito Federal	2156	1617	-15,16%
Espírito Santo	1888	1416	-3,12%
Goiás	2150	1613	-14,93%
Maranhão	2016	1512	-9,27%
Mato Grosso	2047	1535	-10,64%
Mato Grosso do Sul	2103	1577	-13,02%
Minas Gerais	2077	1558	-11,94%
Pará	1961	1471	-6,73%
Paraíba	2068	1551	-11,55%
Paraná	1986	149	-7,91%
Pernambuco	2040	1530	-10,34%
Piauí	2141	1606	-14,57%
Rio de Janeiro	1912	1434	-4,33%
Rio Grande do Norte	2054	1540	-10,93%
Rio Grande do Sul	1927	1445	-5,07%
Rondônia	1954	1466	-6,40%
Roraima	1961	1471	-6,73%
Santa Catarina	1852	1389	-1,23%
São Paulo	2053	154	-10,91%
Sergipe	1965	1474	-6,92%
Tocantins	2086	1564	-12,30%
BRASIL	2001	1501	-8,60%
Curitiba	1829	1372	

Fonte: Adaptado de TIEPOLO (2015).

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE CURITIBA COM A EUROPA

A Figura 30 representa o Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e o Mapa Fotovoltaico da Europa (valores anuais), ambos elaborados com as mesmas premissas e escala de cores, exceto pela orientação dos módulos fotovoltaicos, que no Paraná por estarem no hemisfério Sul são orientados para o Norte geográfico, enquanto que os módulos instalados na Europa por estarem no hemisfério Norte são orientados para o Sul geográfico (TIEPOLO, 2015).

A comparação entre a cidade de Curitiba e a Europa deve-se ao fato de que atualmente a Europa é a região com a maior capacidade instalada global de SFVCR, além disso, entre os cinco países com maior capacidade instalada *per capita*, quatro estão localizados na Europa: Alemanha, Itália, Bélgica e Grécia (REN21, 2015).

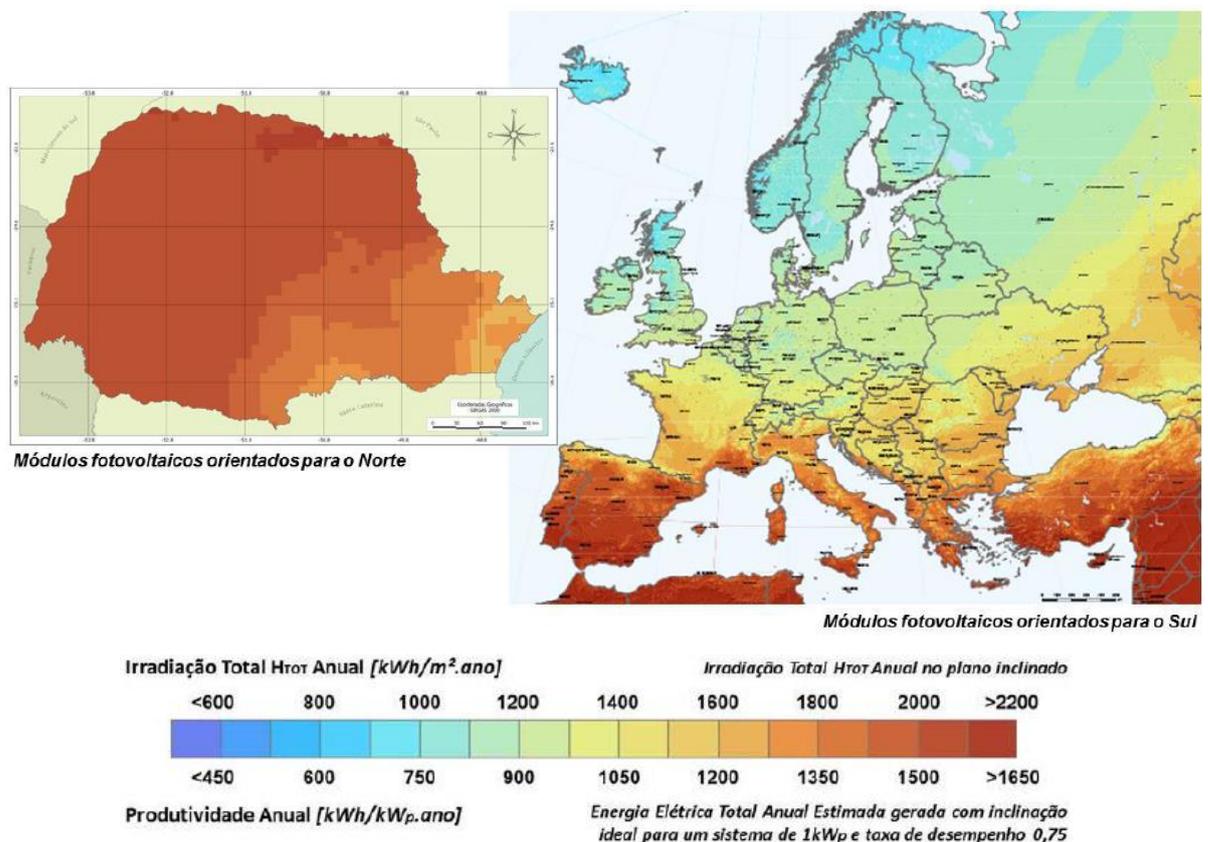


Figura 30– Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e Mapa Fotovoltaico da Europa - Total Anual.

Fonte: TIEPOLO (2015).

A Tabela 03 indica que a média anual de irradiação total e produtividade no plano inclinado na cidade de Curitiba é maior do que a da Alemanha, Itália e Bélgica em 46,23%, 4,51% e 47,78%, respectivamente. Além disso, a média anual de irradiação total e produtividade no plano inclinado na cidade de Curitiba é inferior a apenas 6 dos 33 países europeus analisados, dois deles localizados no mediterrâneo.

Tabela 03 – Valores de Irradiação e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no plano inclinado encontrada nos países da Europa e na cidade de Curitiba, para TD 75%.

Região	Irradiação Total Média Anual em kWh/m ² .ano	Valor de Produtividade Total Anual no Plano Inclinado (kWh/kWp.ano)	Diferença percentual da média obtida na cidade de Curitiba em relação a média obtida no país europeu
Chipre	2217	1663	-17,50%
Malta	2155	1617	-15,14%
Portugal	1996	1497	-8,36%
Espanha	1948	1461	-6,10%
Grécia	1897	1423	-3,58%
Turquia	1873	1405	-2,35%
Itália	1750	1313	4,51%
Macedônia	1696	1272	7,85%
Bulgária	1631	1223	12,16%
Croácia	1570	1178	16,48%
Montenegro	1563	1172	17,04%
Sérvia	1531	1148	19,48%
França	1513	1135	20,88%
Romênia	1496	1122	22,27%
Hungria	1490	1117	22,78%
Eslovênia	1444	1083	26,67%
Eslováquia	1333	1000	37,21%
Áustria	1325	994	38,03%
República Tcheca	1256	942	45,63%

Tabela 03 – Continuação - Valores de Irradiação Total e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no plano inclinado encontrada nos países da Europa e na cidade de Curitiba, para TD 75%.

Polônia	1252	939	46,10%
Alemanha	1251	938	46,23%
Luxemburgo	1243	932	47,17%
Holanda	1242	931	47,31%
Bélgica	1238	928	47,78%
Dinamarca	1211	908	51,06%
Lituânia	1183	887	54,64%
Letônia	1175	881	55,69%
Irlanda	1174	880	55,84%
Reino Unido	1153	865	58,62%
Estônia	1151	864	58,86%
Suécia	1084	813	68,74%
Finlândia	1054	790	73,59%
Islândia	949	712	92,72%
Cidade de Curitiba	1829	1372	

Fonte: Adaptado de TIEPOLO, 2015.

Os dados apresentados neste capítulo indicam o grande potencial fotovoltaico da cidade de Curitiba, principalmente quando comparado com países da Europa.

4. ESTUDO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM ESTAÇÕES-TUBO E TERMINAIS DE CURITIBA

4.1 PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA – TRANSPORTE COLETIVO

A cidade de Curitiba destacou-se no cenário nacional e internacional como ‘cidade modelo’ devido ao processo de planejamento urbano adotado. O Plano diretor Urbano de 1966 priorizou o crescimento linear da cidade baseado em um sistema em que o transporte coletivo orientasse o aumento da população. Fundamentado em um conceito que relaciona o uso do solo, o sistema viário e o transporte público, o uso de vias estruturais exclusivas aos ônibus, denominadas de canaletas, serviram como eixos base de transporte e propiciaram uma maior velocidade à mobilidade urbana.

Além das canaletas, com o objetivo principal de agilizar a operação de embarque e desembarque nos transportes coletivos, surgiram as plataformas elevadas e abrigadas permitindo o acesso controlado e o embarque rápido e seguro (RESOURCES, 2016). Tais estações foram denominadas de estações-tubo, que mais tarde viriam a tornar-se um ícone da cidade curitibana. Com um sistema de pré-pagamento da tarifa, além de uma integração com transferências entre rotas sem mudanças de custo, a ideia de um sistema de ônibus de alta capacidade provendo um serviço rápido e eficiente ficou conhecida como *Bus Rapid Transit* (BRT). Atualmente o sistema existe em mais de 200 cidades ao redor do mundo e tem se tornado uma das escolhas mais viáveis e confiáveis para qualificar a mobilidade urbana em 38 países (WRIcidades, 2014).

O sistema de transporte público de Curitiba é baseado em seis grandes eixos que cortam a cidade nos sentidos Norte, Sul, Leste, Oeste, eixo Boqueirão e eixo Linha Verde com aproximadamente 72 km de canaletas, como pode ser observado na Figura 31. Ao longo de tais vias exclusivas são encontrados os terminais, onde é permitida a integração físico-tarifária entre as linhas expressas, interbairros, diretas e alimentadores. As linhas expressas correspondem aos ônibus que se utilizam das canaletas. As linhas interbairros são as que ligam os diversos bairros e terminais sem passar pela área central. As linhas diretas são linhas complementares as duas já citadas. Por fim, os alimentadores, interligam os terminais de integração aos bairros

arredores. Somado às linhas convencionais, o sistema de transporte urbano de Curitiba cobre toda a área do município e Região Metropolitana (LOMBARDO *et al.*, 2012).



Figura 31 –Eixos do Sistema de Transporte Público de Curitiba.

Fonte: URBS, 2017.

O grande diferencial do transporte curitibano é dispor de tarifa integrada, permitindo deslocamentos para toda a cidade pagando apenas uma passagem, o que caracteriza a Rede Integrada de transporte (RIT). Cada pessoa pode compor seu próprio percurso, já que o sistema é integrado por meio de terminais e estações-tubo (LOMBARDO *et al.*, 2012), podendo ter como destino um dos 13 municípios participantes da integração (URBS, 2017). O RIT foi esquematizado em um diagrama e pode ser observado na Figura 32 juntamente com os terminais de integração, os quais estão representados por círculos. O estudo da viabilidade técnica de implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede será analisado nas linhas expressas, bem como nos terminais existentes na cidade de Curitiba.

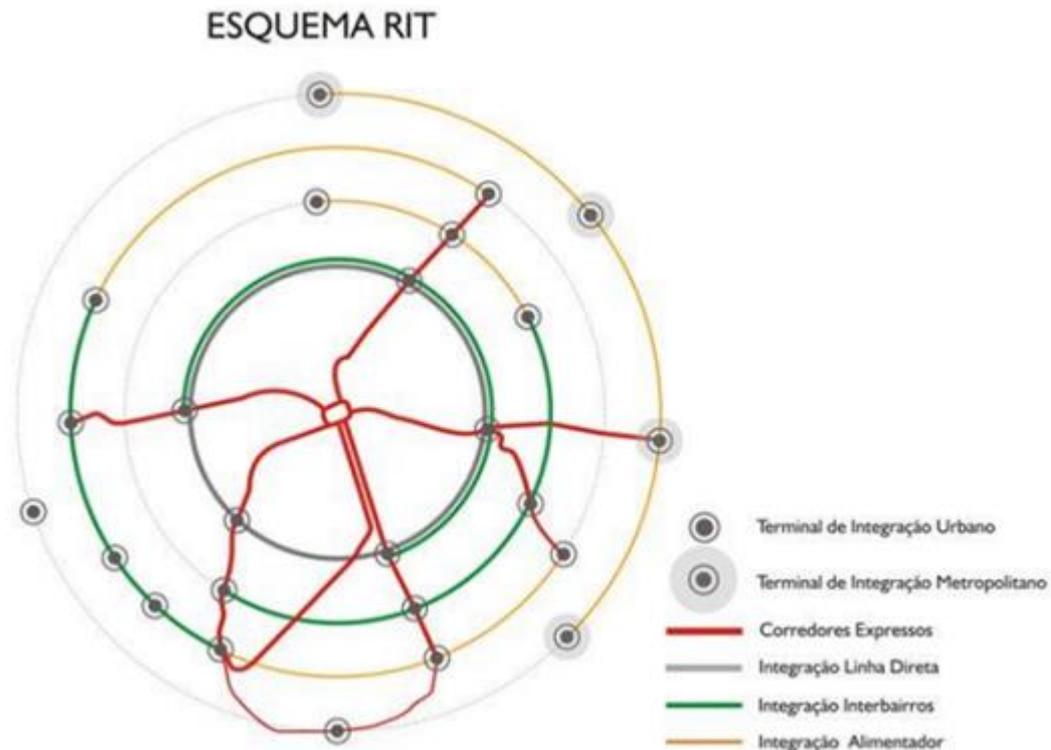


Figura 32 – Esquema da Rede Integrada de Transporte em Curitiba e Região Metropolitana.
 Fonte: URBS, 2017.

4.1.1 Terminais

Como citado, o moderno e eficiente sistema de transporte público da cidade de Curitiba é considerado um modelo de desenvolvimento para outras cidades do país e do mundo.

Os terminais são em tese estruturas urbanas que viabilizam o câmbio entre os diversos modais de transportes (expressas, alimentadores, linhas diretas e interbairros), e também promovem a estruturação dos bairros, pois concentram uma grande demanda de passageiros em seus espaços como exemplificado na Figura 33 e, conseqüentemente, criam uma gama diversificada de serviços e atividades em seus entornos.

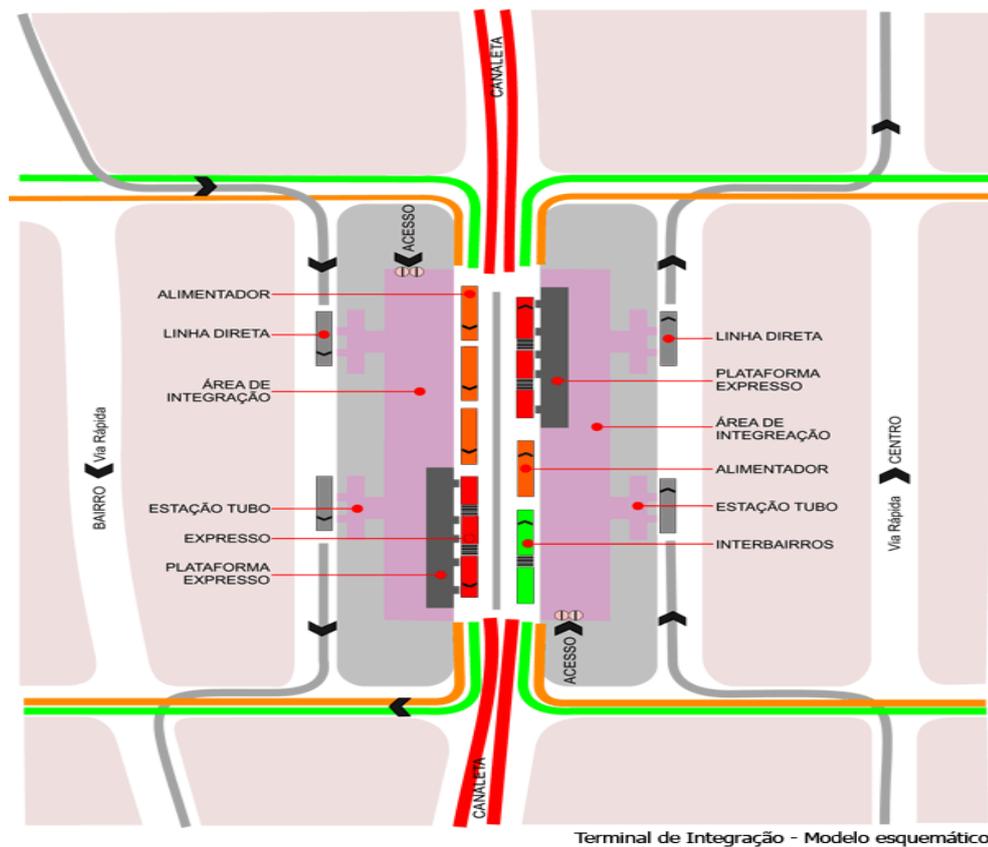


Figura 33 – Terminal de Integração – Modelo esquemático.

Fonte: URBS, 2017.

Por possuírem uma área coberta para instalação dos painéis muito superior as das estações-tubo, os terminais possuem uma maior capacidade de geração. Dessa forma, tais instalações são de grande importância para esse estudo.

Atualmente a cidade de Curitiba conta com um total de 21 terminais (URBS, 2017). Já que cada terminal possui suas próprias características construtivas, apenas um terminal foi escolhido para o desenvolvimento do projeto padrão e posterior estudo de caso. A análise contida neste trabalho foi desenvolvida para o terminal Santa Cândida, o qual está representado na Figura 34.

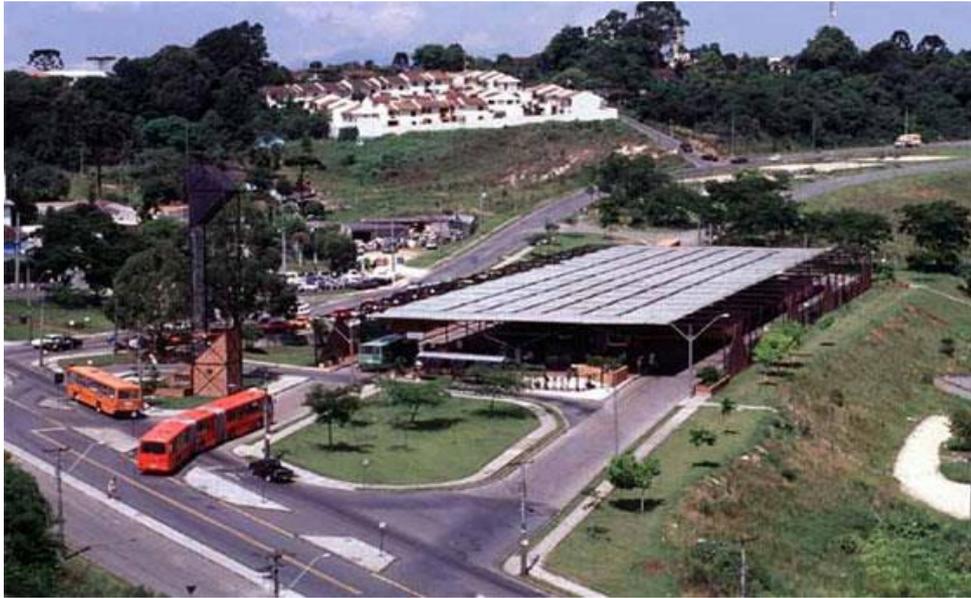


Figura 34 – Terminal Santa Cândida.

Fonte: URBS, 2017.

4.1.2 Estações-Tubo

As estações-tubo são pontos de parada de ônibus em forma de tubo, reconhecidas mundialmente como solução eficaz para o transporte público da cidade, como mostra a Figura 35. Com seu *design* moderno, as estações-tubo são vistas como parte da identidade da capital paranaense, característica importante para o auxílio na disseminação das ideias de desenvolvimento sustentável em Curitiba.



Figura 35 – Estação-tubo Museu Oscar Niemeyer.

Fonte: URBS, 2017.

Atualmente a cidade conta com uma totalidade de 342 estações-tubo. Após contato com a URBS descobriu-se que existem cinco tipos estruturais principais de estações-tubo espalhadas pela cidade. Dessa forma, foram obtidas as características construtivas de tais estações. Para o escopo do presente estudo, serão consideradas apenas 189 estações-tubo, as quais pertencem as linhas expressas. Dessa maneira, elas podem ser divididas basicamente em cinco tipos: estação-tubo tipo 01, estação-tubo tipo 02, estação-tubo tipo 03, estação-tubo tipo 04 e estação-tubo tipo 05.

4.1.2.1 Estação-tubo TIPO 01

De acordo com as especificações técnicas, a estação-tubo tipo 01, esquematizada na Figura 36, destinada ao embarque e desembarque de passageiros dos ônibus biarticulados, consiste numa plataforma elevada, com uma área coberta e fechada, para a espera e embarque de passageiros, ladeada por duas áreas externas, para o desembarque de passageiros. Tem diâmetro de 2.756 mm e comprimento total de 15.101 mm, sendo 7.201 mm na área coberta e 7.900 mm na área descoberta (URBS, 2017).

A área total coberta da ESTAÇÃO-TUBO TIPO 01 é de 13,68 m². Atualmente existem 144 estações-tubo deste tipo espalhado pela capital paranaense.



Figura 36 – Planta Estação Tipo 01.

Fonte: URBS, 2017.

4.1.2.2 Estação-tubo TIPO 02

De acordo com as especificações técnicas, a estação-tubo tipo 02, esquematizada na Figura 37, destinada ao embarque e desembarque de passageiros dos ônibus biarticulados, consiste numa plataforma elevada, com uma área coberta e fechada, para a espera e embarque de passageiros, ladeada por duas áreas externas, para o desembarque de passageiros. Tem diâmetro de 2.756 mm e comprimento total de 15.101 mm, sendo 10.051 mm na área coberta e 5.050 mm na área descoberta (URBS, 2017).

A área total coberta da ESTAÇÃO-TUBO TIPO 02 é de 19,10 m². Tal tipo de estação pode ser encontrado em 36 locais de Curitiba.



Figura 37 – Planta Estação Tipo 02.

Fonte: URBS, 2017.

4.1.2.3 Estação-tubo TIPO 03

Segundo as especificações técnicas da estação-tubo tipo 03, esquematizada na Figura 38, destinada ao embarque e desembarque de passageiros dos ônibus biarticulados, consiste numa plataforma elevada, com uma área coberta e fechada, para a espera, desembarque e embarque de passageiros, ladeada por duas áreas externas, para o desembarque de passageiros. Sua configuração permite a parada simultânea ou não de dois ônibus de linhas distintas, possibilitando a integração entre corredores. Tem diâmetro de 2.756 mm e comprimento total de 30.776 mm, sendo 22.876 mm na área coberta e 7.900 mm na área descoberta (URBS, 2017).

A área total coberta da ESTAÇÃO-TUBO TIPO 03 é de 43,46 m². Atualmente existem apenas 2 estações deste tipo.

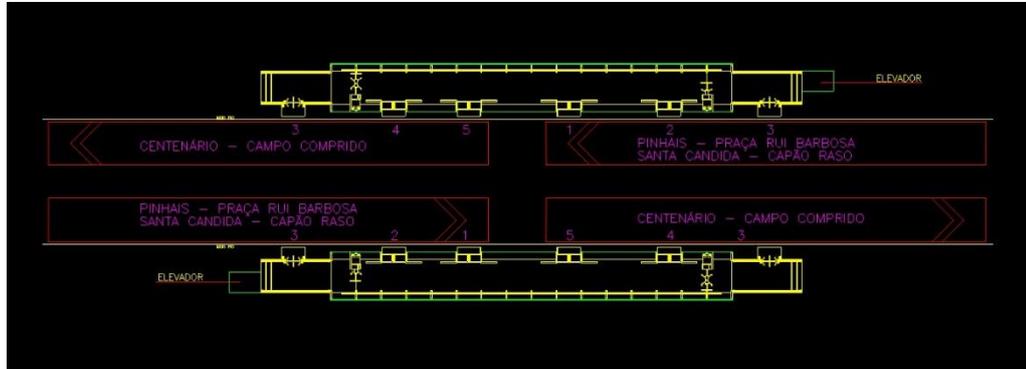


Figura 38 – Planta Estação Tipo 03.

Fonte: URBS, 2017.

4.1.2.4 Estação-tubo TIPO 04

Conforme as especificações técnicas fornecidas da estação-tubo tipo 04, esquematizada na Figura 39, a estação é constituída por dois módulos tubulares acoplados em paralelo, formando uma plataforma elevada coberta, destinada a espera, embarque e desembarque de passageiros dos ônibus biarticulados. É constituída por dois módulos tubulares com diâmetro de 2.756 mm e comprimento total de 25.726 mm cada (URBS, 2017).

A área total coberta da ESTAÇÃO-TUBO TIPO 04 é de 122,69 m². Tal estação pode ser encontrada em 5 locais de Curitiba.

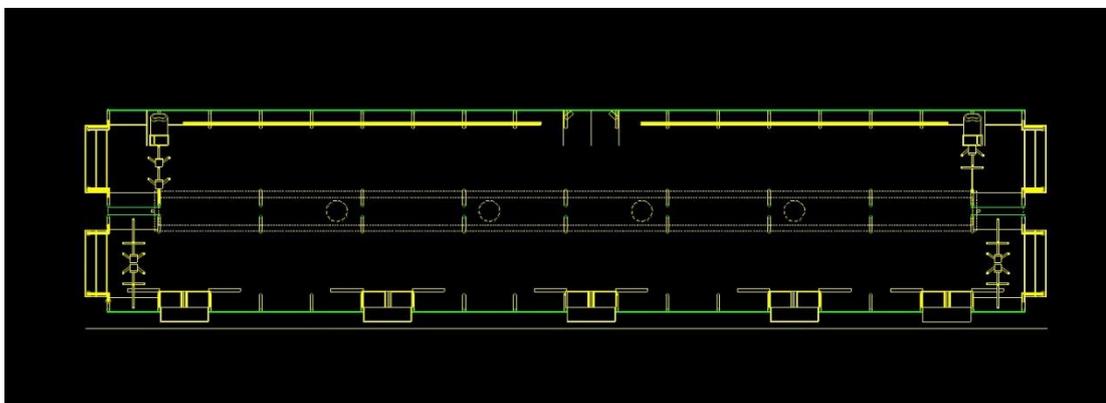


Figura 39 – Planta Estação Tipo 04.

Fonte: URBS, 2017.

4.1.2.5 Estação-tubo TIPO 05

De acordo com as especificações técnicas fornecidas pelas URBS a estação-tubo tipo 05, esquematizada na Figura 40, é constituída por três módulos tubulares fechados e cobertos, sendo a plataforma de espera e embarque formada pelo acoplamento em paralelo de dois módulos e a plataforma de desembarque por um módulo independente. É constituída por três módulos tubulares com diâmetro de 2.756 mm e comprimento total de 25.726 mm, cada (embarque e desembarque) (URBS, 2017).

A área total coberta da ESTAÇÃO-TUBO TIPO 05 é de 187,272 m². Existem apenas duas estações com esse tipo na capital paranaense.

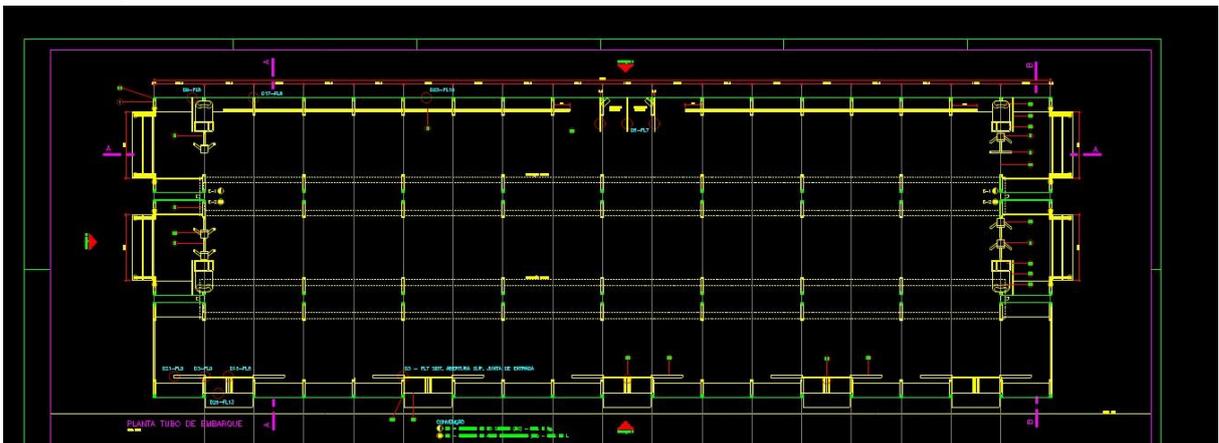


Figura 40 – Planta Estação Tipo 05.

Fonte: URBS, 2017.

4.2 Projetos preliminares– Viabilidade Técnica

Para a realização dos projetos preliminares da implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram escolhidos um terminal e uma estação-tubo da cidade de Curitiba. Preocupou-se em selecionar o terminal e as estações-tubo em que não haja nenhum tipo de construção ou barreira em seus arredores em que possa bloquear os raios solares de atingirem os painéis fotovoltaicos.

Os projetos preliminares utilizaram a média total anual de irradiação no plano inclinado na latitude já apresentado no Capítulo 03 – Análise do Potencial Fotovoltaico

de Curitiba - para a realização do cálculo médio gerado anual de energia elétrica por tipo de instalação. Para chegar nesses valores, foi necessário realizar um levantamento das características construtivas da estação-tubo e terminal considerado, determinando o percentual de cobertura útil para a implantação dos painéis fotovoltaicos. O dimensionamento, a tipologia das células a serem utilizadas, a inclinação e a orientação dos módulos fotovoltaicos, bem como o valor estimado de energia elétrica gerada por tipo de estação-tubo e pelo terminal considerado será apresentada nos próximos tópicos.

4.2.1 Premissas

Por se tratarem de projetos padrões, foram delimitados projetos genéricos às estações-tubos e aos terminais, apesar de compreender que cada qual possui as suas particularidades. Dessa forma, premissas foram adotadas aos projetos preliminares.

Para tais projetos utilizou-se a média total anual de irradiação na cidade de Curitiba de acordo com os dados de irradiação no plano inclinado (TIEPOLO, 2015). Como já observado no Capítulo 3 – Análise do Potencial Fotovoltaico de Curitiba, o valor médio anual de irradiação e de produtividade no plano inclinado é de 1.829 kWh/m².ano e 1.372 kWh/kWp respectivamente, na cidade de Curitiba. Foi considerado o máximo aproveitamento da radiação solar, ou seja, não foi levado em consideração o sombreamento que possa ocorrer na estação devido a proximidade nas estações-tubo e nos terminais.

Para os terminais, considerou-se que todos possuem sua área de cobertura plana, ou seja, com muito pouca ou nenhuma inclinação existente. Além disso, desconsiderou-se qualquer outro tipo de arquitetura além do terraço plano cimentado existente nas localidades estudadas.

Para o projeto nas estações-tubo, utilizou-se como base as pesquisas realizadas por Gasparin et al. (2016). Como este trabalho preza por manter a arquitetura e design das estações-tubo, a utilização de valores reais de inclinação destas estruturas para o dimensionamento e análise de valores se faz necessária. Segundo Gasparin et al. (2016), foi utilizada a ferramenta SAM (*System Advisor Model*) para a simulação de um sistema fotovoltaico residencial de 1500 W_p em

diferentes cidades do Brasil, compreendendo a inclinação do painel fotovoltaico entre 0 e 90° e ângulo de azimute em todas as direções.

Os resultados indicam que para uma gama relativamente ampla de inclinações e orientações dos sistemas fotovoltaicos o resultado final de produtividade difere em apenas 1% de um sistema posicionado idealmente, ou seja, orientado para o norte geográfico e inclinação igual a latitude local, consideradas as condições ideais de geração ao longo do ano (GASPARIN *et al.*, 2016).

De acordo com as Especificações Técnicas fornecidas pelas URBS, foi identificado que a inclinação inicial de curvatura das estações-tubo é de 21,2° até a curvatura de inclinação nula, ou seja, o centro da estrutura côncava, sendo este ângulo o máximo obtido.

A Figura 41 apresenta a energia anual normalizada sob análise da influência da orientação do SFVCR na produção anual de energia elétrica na cidade de Curitiba, de acordo com resultados alcançados por Gasparin *et al.* (2016).

A simulação foi feita variando o ângulo de inclinação entre 0 e 90°, com um maior refinamento nas latitudes que compreendem o Brasil, ou seja, 0 a 35°. A variação do ângulo azimutal compreendeu os 360°, a definição de azimute da superfície foi baseada no norte geográfico, onde 0° indica o norte com deslocamento positivo para a direção leste (GASPARIN *et al.*, 2016).

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte								Leste	
0	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135	
0	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
5	0.89	0.90	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.90
10	0.86	0.88	0.93	0.94	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.95	0.93	0.91	0.87	0.87
15	0.82	0.86	0.92	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.90	0.84	0.84
20	0.78	0.82	0.91	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.88	0.80	0.80
25	0.73	0.79	0.90	0.94	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.96	0.94	0.90	0.86	0.77	0.77
30	0.67	0.75	0.88	0.93	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.89	0.84	0.73	0.73
35	0.62	0.71	0.86	0.91	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92	0.87	0.81	0.68	0.68
40	0.57	0.67	0.84	0.89	0.94	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97	0.95	0.94	0.92	0.90	0.85	0.79	0.64	0.64
50	0.48	0.59	0.78	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89	0.87	0.85	0.79	0.73	0.56	0.56
60	0.41	0.52	0.72	0.79	0.83	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.84	0.82	0.80	0.78	0.73	0.67	0.49	0.49
70	0.33	0.45	0.65	0.72	0.76	0.77	0.78	0.78	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.72	0.70	0.66	0.60	0.43	0.43
80	0.28	0.39	0.58	0.64	0.67	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.58	0.53	0.38	0.38
90	0.24	0.35	0.51	0.56	0.58	0.58	0.58	0.57	0.56	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54	0.53	0.51	0.47	0.33	0.33

Figura 41 – Energia anual normalizada do SFVCR sob diversos ângulos de orientação em Curitiba – Paraná.

Fonte: Adaptado de Gasparin *et al.* (2016).

Em função do eixo das estações-tubo assumirem os mais variados desvios em relação ao norte geográfico, adotou-se neste trabalho um desvio azimutal entre 180° Sul e 135° Leste, com a faixa de variação angular de inclinação variando entre 0 e 25° devido a curvatura das chapas de aço que cobrem as estações-tubo que apresentam uma variação que vai de 21,2° até a inclinação nula.

De acordo com Gasparin *et al.* (2016) a energia elétrica anual normalizada desta faixa de valores situa-se entre 1,00 e 0,73. Com isto, adotou-se o índice da pior condição para geração de energia elétrica nas estações-tubo para estas condições, ou seja, 0,73. Este índice será utilizado para estimar a geração de energia elétrica nas estações-tubo com base nos valores de produtividade da cidade de Curitiba conforme Tiepolo (2015), para assim obter-se um valor mais factual deste potencial de geração.

Para os projetos, não foi considerado qualquer tipo de possibilidade de vandalismo nos patrimônios públicos, de tal forma a não delimitar alguma proteção física necessária aos sistemas fotovoltaicos.

Por fim, considerou-se a injeção da energia elétrica total gerada por meio dos painéis fotovoltaicos à rede pública, pelo simples motivo de não ter o acesso às contas públicas referentes ao consumo mensal de energia elétrica das estações-tubo e terminais para um dimensionamento mais apropriado.

4.2.2 Projeto Preliminar no Terminal Santa Cândida

Para a realização deste estudo foi escolhido o terminal Santa Cândida, demonstrado na Figura 42, pois o mesmo conta com uma grande área coberta, isto é, uma grande área para instalação dos painéis fotovoltaicos, e também por estar localizado em uma região com poucos edifícios e livre de sombreamento, situado na Avenida Paraná, esquina com a rua Calixto de Jesus, bairro Santa Cândida, nas coordenadas geográficas latitude 25°22'37.44"S e longitude 49°13'27.69"O.



Figura 42—Terminal do Santa Cândida.

Fonte: URBS, 2017.

4.2.2.1 Tipologia Seleccionada e Orientação dos Painéis

O tipo de célula escolhida foi a de silício monocristalino (m-Si), consolidadas no mercado por sua extrema robustez e confiabilidade, além de apresentar eficiência elevada em comparação as demais do mercado, que em alguns painéis alcançam valores superiores a 21%. A combinação destas características torna os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino a melhor opção para a máxima geração de energia solar nos terminais.

No que diz respeito a orientação dos painéis, serão consideradas condições ideais, isto é, inclinação de acordo com a latitude local (no caso de Curitiba 25°S) e orientação para o norte geográfico. Se tratando de estudo preliminar, alguns aspectos como as características construtivas do local de instalação dos módulos e possíveis interferências das edificações próximas foram desconsideradas.

Para a seleção do modelo do painel utilizou-se como critério o fornecedor que apresenta o painel com maior eficiência, calculada de acordo com o STC (*Standard Test Conditions*). As especificações técnicas do painel escolhido encontram-se na Tabela 4.

Tabela 04– Características do módulo de silício monocristalino.

Fornecedor	Modelo	Potência Nominal (W)	Eficiência (%)	Dimensional (m)	Área do Módulo (m ²)
(1) SunPower	SPR-327NE-WHT-D	327	21,3	1,535 x 1,002 x 0,046	1,538

Fonte: Adaptado de POSHARP, 2017.

4.2.2.2 Levantamento das Dimensões da Cobertura

Baseado nos dados aproximados da ferramenta Google Maps obteve-se as dimensões da cobertura do terminal Santa Cândida, conforme Figura 43.

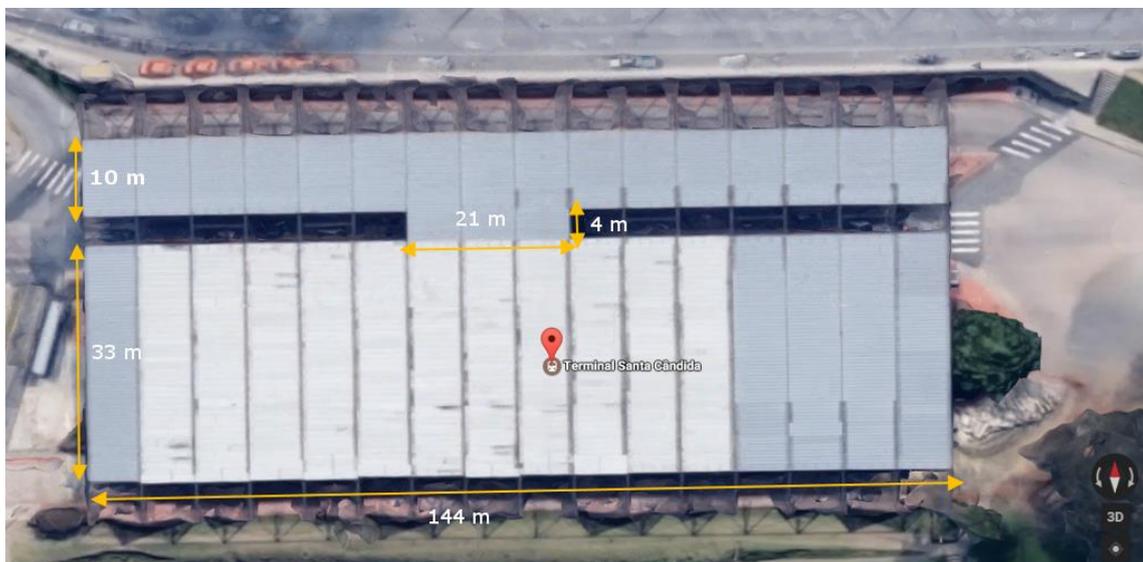


Figura 43 – Vista Superior do Terminal do Santa Cândida.

Fonte: Adaptado do Google Maps, 2017.

4.2.2.3 Cálculo de Radiação e Geração de Energia Fotovoltaica

Após o levantamento das dimensões da cobertura é possível prever a quantidade de painéis que podem ser instalados no terminal, para isto levou-se em consideração o espaçamento mínimo entre estes. De acordo com Pinho e Galdino (2016) a Equação 1 pode ser utilizada para calcular este espaçamento de maneira a evitar o efeito de sombreamento que os painéis podem causar uns nos outros, entre uma fileira e outra.

$$d = Fe(hob - hi) \quad (01)$$

Onde:

d = distância mínima entre os painéis (m);

F_e = fator de espaçamento obtido pela curva da Figura 45;

h_{ob} = altura maior de instalação do painel de acordo com Figura 46 (0,65 m);

h_i = altura menor de instalação do painel (considerado que será instalado rente a cobertura, portanto $h_i = 0$ m).

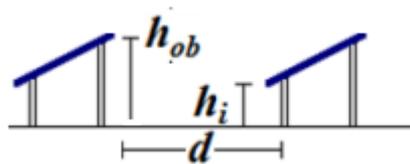


Figura 44 – Ilustração para definição de espaçamento mínimo entre painéis.

Fonte: Adaptado de PINHO E GALDINO, 2014.

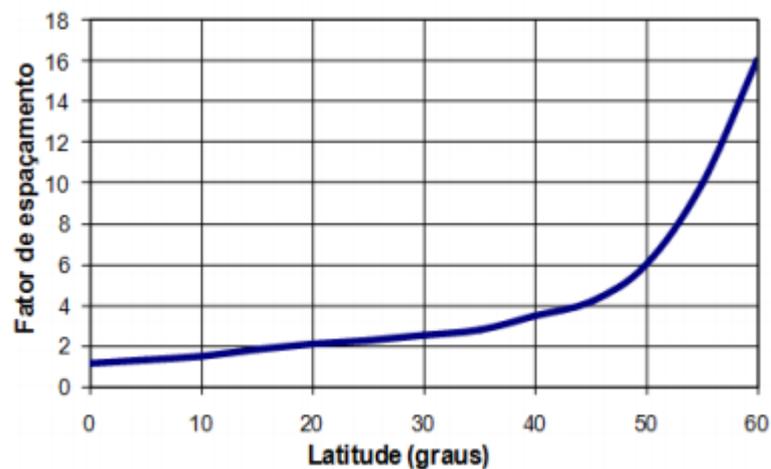


Figura 45 – Fator de espaçamento versus latitude do local do painel fotovoltaico.

Fonte: PINHO E GALDINO, 2014.

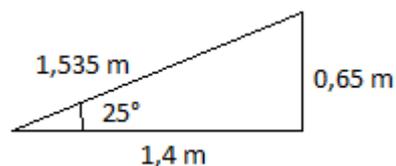


Figura 46 – Cálculo da altura de instalação dos painéis.

Fonte: Autoria própria.

Como a latitude do terminal Santa Cândida é em torno de 25° de forma a ser observada na Figura 46, de acordo com a Figura 45 o fator de espaçamento (F_e) é de aproximadamente 2. Desta maneira, chega-se a uma distância entre as fileiras com os módulos de 1,3 m.

Após o cálculo da distância mínima entre os painéis, sabendo as dimensões do módulo (Tabela 04) e considerando um espaço de 2 m nas bordas da cobertura, chega-se ao número de 672 módulos que cabem na cobertura do terminal.

Sabendo o número de módulos que podem ser instalados e a potência nominal de acordo com a Tabela 04, obtém-se o valor da potência total do SFVCR neste terminal, conforme Tabela 05.

Tabela 05– Potências estimadas do SFVCR de acordo com o fornecedor selecionado.

Fornecedor	Modelo	Potência nominal (W)	Número de módulos	Pfv (kWp)
(1) SunPower	SPR-327NE-WHT-D	327	672	219,744

Fonte: Adaptado de POSHARP, 2017.

A produtividade total média anual estimada em Curitiba, para SFVCR com inclinação igual a latitude, orientação norte e TD de 75% em um sistema de 1kWp é de 1.372 kWh/kWp.ano. Portanto, para um sistema de 219,744 kWp, a produtividade média anual estimada será de 3.014,88 MWh.

Presumindo-se que os demais 20 terminais tenham área similar ao terminal Santa Cândida, a produtividade média total anual para todos os 21 terminais de Curitiba será de 63.312,64 MWh, e uma potência total de aproximadamente 4,4 MW.

4.2.3 Projeto Preliminar na Estação-tubo Marechal Floriano

Para um esboço do projeto foi escolhida a estação-tubo Marechal Floriano, localizada na Linha Verde. A motivação para a escolha desta estação foi devido sua localização privilegiada, pois a Linha Verde está localizada em uma área praticamente livre de sombreamento, o que pode ser observado na Figura 47.



Figura 47 – Vista aérea da Linha Verde.

Fonte: CURITIBA NOTÍCIAS, 2017.

4.2.3.1 Tipologia Selecionada

A tipologia escolhida para instalação nas estações-tubo foi a célula de silício amorfo flexível (a-Si). Como já descrito no Capítulo 2 – Referencial Teórico, essa tecnologia possui uma boa resposta sob iluminação artificial e sob radiação difusa. Por sua aparência estética mais atraente, associado aos seus painéis flexíveis e mais leves, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil (BITTENCOURT, 2011). Sendo assim, esta tecnologia adapta-se ao design curvo da cobertura das estações-tubo e é menos vulnerável ao vandalismo, pois os painéis que utilizam as células de silício amorfo são mais difíceis de serem quebrados do que os que utilizam as células da primeira geração.

Apesar da desvantagem de apresentar eficiência mais baixa quando comparada às tecnologias de silício cristalino, o projeto implantado no estacionamento da Eletrosul é um exemplo de sucesso da aplicação da célula de silício amorfo no Brasil. Desde 2009 está em operação uma planta-piloto fotovoltaica, demonstrada na Figura 48, em frente à sede da Eletrosul, em Florianópolis. Sobre a cobertura, que tem 228 metros quadrados de área, foram instalados 88 módulos de silício amorfo de 136 Wp, totalizando uma capacidade de 12 kilowatts-pico (kWp). A energia gerada atende parte do consumo do edifício-sede. Estima-se que a energia elétrica gerada seja equivalente ao consumo anual de 6,4 residências da Região Sul do Brasil.



Figura 48– Aplicação da tecnologia da célula de silício amorfo.

Fonte: ELETROSUL, 2017.

4.2.3.2 Levantamento da Área de Cobertura

Segundo as especificações técnicas dos cinco tipos de estações tubo repassadas pela URBS, a cobertura destas são de chapa de aço inox ASTM-AISI-304 polido, isto porque chapas de aço apresentam resistência a corrosão e impacto, além disso moldam-se de acordo com a estrutura na qual são utilizadas, neste caso adaptam-se ao formato curvo da cobertura da estação tubo. Na Figura 49 é possível observar a vista da cobertura de duas estações tubo localizadas na Linha Verde.



Figura 49 – Vista superior de duas estações da Linha Verde.

Fonte: CONSTRUÇÃO MERCADO, 2017.

Com isto, é possível calcular a área útil para instalação dos painéis fotovoltaicos, que devem ser sobrepostos a estas chapas de alumínio de maneira que toda a área da cobertura possa ser aproveitada. Na Tabela 06 está descrita a área útil para cada tipo de estação tubo, o que varia de cada tipo de estação tubo é a quantidade de chapas de aço inox.

Tabela 06 – Área útil estações tubo.

Tipo da Estação Tubo	Quantidade de chapas de aço inox	Comprimento (m)	Largura(m)	Área Útil (m ²)
Tipo 01	4	2,89	1,2	13,872
Tipo 02	6	2,89	1,2	20,808
Tipo 03	16	2,89	1,2	55,488
Tipo 04	36	2,89	1,2	124,848
Tipo 05	54	2,89	1,2	187,272

Fonte: Adaptado das especificações técnicas da URBS.

4.2.3.3 Cálculo de Radiação e Geração de Energia Fotovoltaica

Foram escolhidos para o projeto preliminar das estações-tubo módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR do modelo PVL-136-B (136 Wp). Os módulos serão sobrepostos sobre a superfície curva com inclinação variada das

chapas de aço que cobrem as estações. As características destes módulos podem ser observadas na Tabela 07.

Tabela 07 – Característica do módulo de silício amorfo flexível.

Fornecedor	Modelo	Potência Nominal (W)	Eficiência (%)	Dimensional (m)	Área do Módulo (m ²)
UNI-SOLAR	PVL-136	136	12,35	5,486 × 0,394 × 0.004	2,161

Fonte: Adaptado de POSHARP, 2017.

Os módulos serão dispostos de acordo com suas dimensões de maneira a cobrir toda a área da cobertura. A partir do número de módulos, multiplica-se este valor por sua potência nominal, conforme Equação 01.

Tabela 08 – Potências estimadas para a dimensão do módulo.

Fornecedor	TIPO 01		TIPO 02		TIPO 03		TIPO 04		TIPO 05	
	Nº de módulos	Pfv (kWp)								
UNI-SOLAR	6	0,816	9	1,224	25	3,400	57	7,775	86	11,696

Fonte: Adaptado de UNI-SOLAR, 2017.

Para determinar o potencial de geração de energia elétrica anual de um SFVCR utilizou-se o valor de produtividade total anual no plano inclinado para a cidade de Curitiba que apresenta um valor de 1.372 kWh/kWp.ano para um sistema de 1kWp, sendo este valor corrigido para as potências informadas na Tabela 08. O índice de 0,73 também foi utilizado (pior cenário para geração de energia elétrica nas estações-tubo em função das diferentes orientações e inclinações apresentadas pelas mesmas), fazendo um nova correção da produtividade, e conseqüentemente no valor final de energia elétrica a ser gerada em cada tipo de estação-tubo, conforme é mostrado na Tabela 09.

Tabela 09 – Energia elétrica gerada estimada por tipo de estação-tubo - valores anuais.

	TIPO 01	TIPO 02	TIPO 03	TIPO 04	TIPO 05
Fornecedor	Energia (MWh)				
UNI-SOLAR	0,817	1,225	3,405	7,787	11,714

Fonte: Autoria própria.

A esquematização do projeto preliminar do sistema fotovoltaico conectado à rede na estação-tubo Marechal Floriano pode ser observada na Figura 50.



Figura 50 – Esboço do Projeto da Estação-tubo Marechal Floriano.
Fonte: Adaptado de SANTOS (2017).

A Tabela 10 apresenta a estimativa dos valores de energia elétrica anual gerada para um cenário no qual a implantação dos SFVCR ocorra em todas as estações-tubo existentes nas linhas expressas.

Tabela 10 – Energia anual gerada estimada para caso 100% das instalações nas estações-tubo forem concretizadas.

Estação-tubo	Capacidade (kWp)	Energia gerada estimada (MWh)	Quantidade de estações	Energia anual geral estimada (MWh)
TIPO 01	0,81	0,81	144	117,64
TIPO 02	1,22	1,22	36	44,10
TIPO 03	3,40	3,40	2	6,80
TIPO 04	7,77	7,78	5	38,93
TIPO 05	11,69	11,71	2	23,42
TOTAL:				230,90

Fonte: Autoria própria, 2017.

Somando a produtividade média total anual para todos os 21 terminais de Curitiba (63.312,64 MWh) com a das 189 estações da linha expressa (230,906 MWh) chega-se a uma produtividade média total anual de 63.543,54 MWh, o que representou

1,34% do consumo de energia elétrica de toda cidade de Curitiba no ano de 2015, que foi de 4.733.290 MWh (IPARDES, 2016).

A cidade de Curitiba é atendida pela concessionária de energia elétrica Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e a tarifa cobrada referente à energia elétrica utilizada em terminais e estações-tubo pertence à classe de Serviços públicos, concernente ao Subgrupo B3 – Atendimento a Demais Classes. O valor da tarifa correspondente é de R\$ 0,64543 por kWh consumido, como pode ser observado na Figura 51. Já se apresentam inclusos neste valor os tributos federais (PIS – Programas de Integração Social e Formação do Patrimônio do Servido Público – e COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social), além dos estaduais (ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços).

CONVENCIONAL	Resolução ANEEL N° 2.096, de 21 de junho de 2016	
☐		
☐		
Tarifa em R\$/kWh	Resolução	com Impostos:
☐	ANEEL(*)	ICMS e PIS/COFINS
☐		
B3 - Demais Classes	0,42147	0,64543
☐	☐	☐
Vigência em 24/06/2016	☐	☐

Figura 51 – Tarifa cobrada pela COPEL concernente ao Subgrupo B3 – Serviços Públicos
Fonte: COPEL, 2016.

Os Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede realizados sob os terminais renderiam uma economia anual estimada à prefeitura de R\$ 40.863.877,24, enquanto que nas estações-tubos das linhas expressas, o valor economizado seria de aproximadamente R\$ 149.033,65, totalizando R\$ 41.012.910,089. Essa quantia significativa poderia ser investida em outros setores municipais básicos, tais como a melhoria da educação e da saúde pública, ou até mesmo para incentivos na área de pesquisas em energias renováveis para a contribuição de futuras melhorias na cidade e na qualidade de vida aos cidadãos curitibanos.

5. CONCLUSÃO

A expectativa de crescimento populacional aliado ao crescimento significativo da renda per capita para os próximos anos faz com que a demanda de energia elétrica aumente e, conseqüentemente, induza uma readequação no cenário energético brasileiro. Assim sendo, fontes alternativas de energia renováveis e limpas vêm se popularizando frente às tradicionais, com destaque a geração solar fotovoltaica. O crescimento exponencial mundial da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, principalmente a partir de 2007, fez com que os custos dos mesmos abajassem de tal forma a viabilizar a implantação em território brasileiro. Curitiba, reconhecida internacionalmente como cidade-modelo, têm condições plenas de promover a sustentabilidade, inovando e implantando sistemas fotovoltaicos conectados à rede em seus terminais e estações-tubo.

A cidade de Curitiba apresenta um elevado potencial para geração de energia elétrica através de um SFVCR. Fato constatado por meio da comparação do potencial fotovoltaico da cidade de Curitiba com o estado do Paraná, com outros estados brasileiros e com a Europa através do Atlas Fotovoltaico Brasileiro, que foi elaborado com os mesmos critérios utilizados pela Comissão Européia, o qual é composto por um conjunto de mapas com valores de Irradiação e de Produtividade Estimada Total Anual, Média Diária Sazonal e Média Diária Mensal. A cidade de Curitiba, apesar de ser conhecida pelos dias nebulosos e chuvosos, apresenta uma média total anual de irradiação e produtividade estimada de 1.829 kWh/m².ano e 1.372 kWh/kWp.ano respectivamente, o que representa irradiação total média anual inferior em 7,91% comparado a média do estado do Paraná e 8,6% inferior a média obtida no Brasil. Tratando-se de Europa, que atualmente é a região com maior capacidade instalada global de SFVCR, a média anual de irradiação total e produtividade no plano inclinado na cidade de Curitiba é inferior a apenas 6 dos 33 países europeus considerados neste trabalho. Sendo que a média anual de irradiação total e produtividade no plano inclinado na cidade de Curitiba é maior do que a da Alemanha, Itália e Bélgica em 46,23%, 4,51% e 47,78%, respectivamente. Dessa forma, conclui-se que a capital paranaense possui um ótimo potencial de geração de energia solar.

Sabendo deste cenário, foi escolhido o terminal de integração Santa Cândida e a estação-tubo Marechal Floriano para realização de um projeto preliminar de um SFVCR. A escolha da estação deu-se devido à localização ser praticamente livre de sombreamento em ambas as unidades e ao terminal ter a maior área comparado aos outros terminais para instalação dos painéis fotovoltaicos. Os projetos foram baseados na média total anual de irradiação na cidade de Curitiba e para os terminais considerou-se que todos possuem sua área de terraço plana, ou seja, sem nenhuma inclinação existente. A tipologia escolhida para o terminal foi a célula de silício monocristalino (m-Si) devido sua maior eficiência na geração. No que diz respeito à orientação dos painéis no terminal, foram consideradas condições ideais, isto é, inclinação de acordo com a latitude local e orientação para o norte verdadeiro, com desvio azimutal zero. A tipologia escolhida para instalação na estação-tubo foi a célula de silício amorfo flexível (a-Si), por apresentar um bom desempenho mediante radiação difusa e por moldar-se a curvatura da estação-tubo, não havendo preocupação com a orientação dos módulos e com o sombreamento causado entre estes como é o caso da utilização das células de silício cristalino.

Devido à diferença de área útil para a instalação de sistemas fotovoltaicos entre os terminais de integração, não se pode considerar um terminal padrão. Dessa maneira, realizou-se o estudo sobre o terminal Santa Cândida e, de maneira análoga, generaliza-se a viabilidade aos outros terminais. Mais que as estações-tubo, os terminais possuem uma potencialidade maior devido ao seu espaço disponível para a instalação do sistema.

Contudo, com a implantação dos SFVCR, a cidade de Curitiba teria uma geração alternativa de energia com uma produtividade média total anual de 63.543,54 MWh de forma a complementar o seu planejamento energético. Além desse benefício, a economia por ano seria de aproximadamente R\$ 41.012.910,089 e garantiria maiores recursos para a melhoria da qualidade de vida curitibana. O projeto realizado reafirmaria a capital paranaense como uma cidade sustentável no cenário internacional e serviria de exemplo as outras cidades brasileiras, indicando a importância da geração de energia elétrica com menores impactos ambientais com a conscientização da preservação de nosso meio ambiente para as gerações futuras.

Por fim, prova-se ser viável tecnicamente a implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em terminais e estações-tubo na cidade de Curitiba.

A aplicação dos conceitos de geração distribuída, com o foco na geração de energia solar fotovoltaica em Estações-tubo e Terminais de Integração, instalações pertencentes a um órgão público indireto da Prefeitura de Curitiba - URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S/A - e que tem sua imagem atrelada à identidade e ao desenvolvimento urbano da cidade, traria entre outros benefícios a fundamentação da aplicação de conceitos sustentáveis em todas as escalas da população curitibana. A presente monografia buscou manter o *design* das estações-tubo, porém as possíveis variações térmicas que podem vir a ser ocasionadas pela instalação dos SFVCR nessas estações não foram consideradas. Para uma possível continuação desta pesquisa sugere-se o estudo das possíveis alterações térmicas ocasionadas pela implantação dos SFVCR nas estações-tubo e prováveis medidas contra essas alterações para garantir assim o seu conforto térmico. Além disso, o estudo da viabilidade econômico-financeira para a implantação dos SFVCR em terminais e estações-tubo se faz necessária para a consideração da implantação de tais sistemas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10899**: Energia solar fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT. **NBR 11704**: Energia solar fotovoltaica – Classificação. Rio de Janeiro, 2008.
- AGENEAL. Agência Municipal de Energia de Almada. **Energias renováveis**. 2016. Disponível em: <<http://www.ageneal.pt/content01.asp?BTreeID=00/01&treeID=00/01&newsID=8>>. Acesso em: 15 ago. 2016.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil – 2ª Edição**. ANEEL, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/atlas2005.zip>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- _____. **Resolução Normativa ANEEL Nº 482/2012**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2016.
- _____. **Resolução Normativa ANEEL Nº 687/2015**. 2015a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2016.
- _____. **ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída**. 2015b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90>. Acesso em: 31 ago. 2016.
- _____. **Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2016.
- ANUNCIACÃO, Silvio. Grupo purifica silício para a fabricação de células solares. **Jornal da Unicamp**. Campinas, n.530, 2012. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/530/grupo-purifica-silicio-para-fabricacao-de-celulas-solares>>. Acesso em: 11 set. 2016.
- BEJERANO, P. G. **China substitui a Alemanha como primeiro país em tecnologia fotovoltaica**. 2016. Disponível em: <<http://br.blogthinkbig.com/2016/03/04/china-substitui-a-alemanha-como-primeiro-pais-em-tecnologia-fotovoltaica/>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- BLANCO, M. Conheça a megaobra do BRT da Linha Verde de Curitiba. 2012. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/136/artigo281244-1.aspx>>. Acesso em: 25 fev. 2017.
- BITTENCOURT, F. T. **Estudo Comparativo do Aproveitamento da Energia Solar Fotovoltaica em Relação à Rede de Distribuição na Eletrificação Rural do Estado de Tocantins**. 53f. Monografia (Pós Graduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2011.

BORTOLETO, Elaine Mundim. **A Implantação de grandes hidrelétricas: Desenvolvimento, discurso e impactos.** Geografares, Vitória - ES, n. 2, 2001.

BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** São Paulo: Prentice Hall, 2004.

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. **Energia Fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade.** 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/i1.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2016.

BUCUSSI, A. A. **Introdução ao conceito de energia.** Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2007.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão.** 2010. Disponível em: <www.cgEE.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=6392>. Acesso em 05 mai. 2016.

COLOMBO, Fabrício. **A Energia no Mundo.** 2013. Disponível em: <<http://f1colombo-geografando.blogspot.com.br/2013/06/8a-energia-no-mundo.html>>. Acesso em: 11 set. 2016.

CURITIBANOTÍCIAS. 2011. Disponível em: <<http://curitibanoticias.xpg.uol.com.br/localcuritibaurbanizacao-da-br-luciano-ducci-da-inicio-as-obras-da-linha-verde-norte.html>>. Acesso em: 25 fev. 2017.

DECICINO, Ronaldo. **Desenvolvimento Sustentável: Como surgiu esse conceito?** 2008. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/desenvolvimento-sustentavel-2-como-surgiu-esse-conceito.htm>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

DIRECT INDUSTRY. **Célula Solar Fotovoltaica Monocristalina.** 2016. Disponível em: <<http://www.directindustry.es/prod/maharishi-solar-technology/product-54437-358101.html>> Acesso em: 10 ago. 2016.

ELETROBRAS. **As Energias Solar e Eólica no Brasil.** 2010. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/afermartins/casasolar2011>>. Acesso em: 31 jul. 2016.

ELETROBRAS ELETROSUL. **Expertise.** 2017. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/ampnbsp/expertise>>. Acesso em: 25 fev. 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Aspectos Fundamentais de Planejamento Energético.** EPE, 2005. Disponível em <<http://docplayer.com.br/9698097-Adene-no-13-2005-aspectos-fundamentais-de-planejamento-energetico-diretor-de-estudos-economicos-e-energeticos-diretor.html>>. Acesso em: 13 mai. 2016.

_____. **Aspectos Fundamentais de Planejamento Energético.** EPE, 2005. Disponível em <<http://docplayer.com.br/9698097-Adene-no-13-2005-aspectos>>

[fundamentais-de-planejamento-energetico-diretor-de-estudos-economicos-e-energeticos-diretor.html](#)>. Acesso em: 13 mai. 2016 *apud* TIEPOLO, G. M. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. 228f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015.

_____. **Plano Nacional de Energia 2030**. EPE, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2016.

_____. **Balanco Energético Nacional 2013**: Ano base 2012. EPE, 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em 10 mai. 2016.

_____. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**: Ano base 2014. EPE, 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em 30 abr. 2016.

_____. **Balanco Energético Nacional 2016**: Ano base 2015. EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em 18 set. 2016.

ESTENDER, A. C.; PITTA, T. T. M. Conceito de desenvolvimento sustentável. **Revista Terceiro Setor**, v.2, n.1, p. 22-28, 2008.

FAPESP – FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Um futuro com energia sustentável**: iluminando o caminho. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

GAVARD, François M. P. **Do impasse ao consenso**: Um breve histórico do conceito de desenvolvimento sustentável. UFSM, Santa Maria –RS, 2009.

GAPARIN, F. P.; KREZINGER, A. **Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, 2016.

GELLER, H. S. **Revolução Energética**: Políticas para um futuro sustentável. 338f. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Internunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GENERGIA. Autoprodução: Vale a pena produzir sua própria energia? 2014. Disponível em: <<http://www.genergia.com.br/noticias/consumo-de-energia-e-autoproducao-vale-pena-produzir-sua-propria-energia/>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

GEODESIGN. **Instalações Autônomas de Vidro FV**. 2016. Disponível em: <http://vidrofv.geodesign.com.br/Pages/Proj_Auto_VFV.html>. Acesso em: 10 ago. 2016.

GLENN, J.C.; GORDON, T.J.; FLORESCU, E. “**Futures studies around the World**”, In: 2011 State of the future, Washington, EUA, The millennium project, Global futures studies & research, cap. 7, 2011. Disponível em <<http://www.millenniumproject.org/millennium/2011SOF.html>>. Acesso em: 12 mai. 2016.

GOLDEMBERG, José; MOREIRA, José Roberto. Política energética no Brasil. **Estudos Avançados 19**. São Paulo, p. 215-228, 2005.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados 21**. São Paulo, p. 7-20, 2007.(-)

GOLDEMBERG, José. Energia e Sustentabilidade. **Revista Cultura e extensão USP**. Universidade de São Paulo, São Paulo, n. 14, p 33-43, nov. 2015.

HADDAD, Jamil. **Energia elétrica**: Conceitos, qualidade e tarifação. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, Rio de Janeiro, 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

INNOVASPAIN. **Mucho más que vidrio**: fotovoltaica de Onyx Solar se extiende por el mundo. 2016. Disponível em: <<http://www.innovaspain.com/mucho-mas-vidrio-la-apuesta-fotovoltaica-onyx-solar-se-extiende-mundo/>>. Acesso em 12 ago. 2016.

IPARDES. **Perfil Avançado do Município de Curitiba**. 2016. Disponível em :< http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=5&btOk=ok>. Acesso em 13 abr. 2017.

IZIDORO, E. S.; SILVA, H. N. S.; SOARES, R. Painel Solar: uma alternativa para a geração de energia. **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v.1, p. 81-84, 2010.

KRANNICH. **A Krannich Project constrói uma instalação solar de 1,4 MW na Alemanha**. 2015. Disponível em: <<http://pt.krannich-solar.com/pt/empresa/noticias/artigo/article/a-krannich-project-constroiu-uma-instalacao-solar-de-1-4mw-na-alemanha.html>>. Acesso em: 09 set. 2016.

LAGE, E. S; PROCESSI, L. D. **Panorama do setor de energia eólica**. 2013. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2926/1/RB%2039%20Panorama%20do%20setor%20de%20energia%20e%C3%B3lica_P.pdf>. Acesso em: 02 Ago. 2016.(-)

LOMBARDO, A.; CARDOSO, O. R. e SOBREIRA P. E. Mobilidade e Sistema de Transporte Coletivo. **Revista Eletrônica OPET -Administração e Ciências Contábeis**, n.7, 2012.

MANCILHA, K. C. **Aplicação de Energia Fotovoltaica para prédios administrativos e áreas industriais**. 83f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

MELO, F. C. **Projeto e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica de Baixa Tensão em Conformidade com a Resolução Normativa 482 da ANEEL**. 159f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

MET RENOVÁVEIS. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2016. Disponível em: <<http://www.met.pt/servicos/esquemafoto.jpg>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 37 – Perfil do Quartz**. 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P27_RT37_Perfil_do_Quartz_o.pdf/3ea3802c-8da9-4012-a246-c722d750de1f>. Acesso em: 11 set. 2016.

_____. **Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. MME, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em 20 abr. 2016.

_____. **Resenha Energética Brasileira**. Exercício de 2015. Brasília, 2016. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+\(PDF\)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;jsessionid=B415252F7145EC1BD6596B2C8137D1B8.srv155?version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;jsessionid=B415252F7145EC1BD6596B2C8137D1B8.srv155?version=1.0)>. Acesso em: 03 ago 2016.

MONTEIRO, J. A. M. **Produção Fotovoltaica: Legislação, tarifas, tecnologia necessária e viabilidade econômica para a produção numa perspectiva de chave na mão**. 153f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal, 2014.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Cosmicopia**. 2012. Disponível em: <http://helios.gsfc.nasa.gov/qa_sun.html>. Acesso em: 19 set. 2016 *apud* PINHO E GALDINO. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em 29 jul. 2016.

NEOSOLAR. **Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e seus Componentes**. 2016. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em 02 ago. 2016.

ONU DI. Organização das Nações para o Desenvolvimento Industrial. **Programa de capacitação em energias renováveis – Energia Solar Fotovoltaica**. 2013. Disponível em: <<http://www.renenergyobservatory.org/br/programa-de-capacitacao.html>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

PAC. Programa de Aceleração de Crescimento. **Brasil inaugura parque eólico do maior complexo da América Latina**. 2015. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/noticia/48d35480>>. Acesso em: 02 ago. 2016.(--)

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. “**Atlas Brasileiro de Energia Solar**”, São José dos Campos, 1ª Edição, p. 34, 2006, Disponível online em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>, Acessado em: 15 de Agosto 2016.

PINHO E GALDINO. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em 29 jul. 2016.

PORTAL BRASIL. **Brasil é o quarto país em que energia eólica mais cresce no mundo**. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-e-um-dos-principais-geradores-de-energia-eolica-do-mundo#wrapper>>. Acesso em: 02 ago. 2016.(--)

PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. 2016. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 11 set. 2016.

PORTAIL SOLAIRE. **Le photovoltaïque - Cellules**. 2016. Disponível em: <<http://www.portail-solaire.com/Cellules.html>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

REN21 – **Renewables 2016 Global Status Report**. Paris, 2016. Disponível em: <<http://www.ren21.net/>>. Acesso em: 29 jul. 2016.

RESOURCES. **Curitiba e sua Rede Integrada de Transporte**. 2016. Disponível em: <<http://siteresources.worldbank.org/INTURBANTRANSPORT/Resources/2ceneviv.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

RÜTHER, Ricardo. **Panorama atual da utilização da Energia Solar Fotovoltaica e o Trabalho do Labsolar nesta área**. LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC: LABSOLAR, 1999.

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

SANTOS, I. P.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Energia Solar Fotovoltaica como Fonte Complementar de Energia Elétrica para residências na busca da sustentabilidade**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Fortaleza, 2008. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2008/artigos/A1613.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

SANTOS, C. **Por uma Curitiba melhor**. Fanny. 2017. Disponível em: <<http://cristianosantospv.com.br/nos-bairros/regional-portao/fanny-2/>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

SAPA SOLAR. **Photovoltaics, a promising solution**. Disponível em: <<http://www.sapa-solar.com/photovoltaics-solution.html>>. Acesso em: 30 abr. 2016.

SEMAR. Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Novos Investimentos para o estado do Piauí**. 2016. Disponível em: <<http://www.semar.pi.gov.br/noticia.php?id=2652>>. Acesso em: 13 mai. 2016.

SOUZA, L. G. M; OLIVEIRA C.; MENEZES, O. L. Energia através do Sol. **Renergy**, Fortaleza (CE), n. 2, p. 45, set/out 2010.

SUNENERGY. **Legislação**. 2016. Disponível em: <<http://www.sunenergy.eco.br/legislacao.php?menu=legislacao>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

TCU. Tribunal de Contas da União. Acórdão Nº 2211/2008. Processo TCU Nº 025.619/2007-2. **Auditoria Operacional. Energia Elétrica. Perdas. Recomendações**. Relatório de Auditoria. Órgão: Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel. Disponível em: <http://www.tcu.gov.br/Consultas/Juris/Docs/judoc%5CAcord%5C20100929%5CAC_2378_34_10_P.doc>. Acesso em 12 mai. 2016.

TIEPOLO, G. M.; CANGIOLIERI, O. Fontes renováveis de energia – Tendências e perspectivas para o planejamento energético emergente no Brasil. **Revista SODEBRAS**, v. 7, n. 77, mai. 2012a.

TIEPOLO, G. M; CASTAGNA, A. G.; CANGIOLIERI, O.; BETINI, R. C. **Fontes Renováveis de Energia e a Influência no Planejamento Energético**. VIII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Curitiba, 2012.

TIEPOLO, G. M.; CANGIOLIERI, O.; URBANETZ, J. Inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica do estado do Paraná: Análise do Potencial Produtivo. **Revista SODEBRAS**, v. 8, n. 87, mar. 2013.

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

TIEPOLO, G. M.; CANGIOLIERI, O.; URBANETZ, J. **Estudo do Potencial de Participação das Fontes Renováveis de Energia na Matriz Elétrica do Estado do Paraná**. XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianópolis, 2014b.

TIEPOLO, G. M. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. 228f. Tese

(Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015.

TOYAMA, A. H; NEVES, N; ALMEIDA, N. G. **Estudo De viabilidade econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de energia para diferentes regiões no estado do Paraná.** 113f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

URBANETZ, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de distribuição urbanas:** sua influência na qualidade de energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

URBS – Urbanização de Curitiba. Disponível em: <<https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/>>. Outras informações coletadas via reuniões com a empresa. Acesso em: 20 fev. 2017.

VAN BELLEN, H. M. In: TIEPOLO, G. M., 2015. **Indicadores de Sustentabilidade. Uma análise comparativa.** Rio de Janeiro, Editora FGV, 2ª edição, 2006.

VILLALVA, Marcelo Gradella. GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica.** São Paulo, Editora Érica, 2013.

WEG. Catálogo: Automação – Inversores Automáticos SIW. 2016. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-inversores-solares-siw-50049414-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2016.

WRlidades. **BRT – Bus Rapid Transit.** 2014. Disponível em: <<http://wricidades.org/BRT>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

WWF. *World Wide Fund For Nature.* **Além de grandes hidrelétricas:** Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. Disponível em: <http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_su_mario_para_tomadores_de_decisao.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2016.

ZILLES, R. OLIVEIRA, S. H. Sistema de Geração de Energia Elétrica com Células Fotovoltaicas Integradas em edificações. **Téchne.** São Paulo: v. 63, p. 69-71, 2002.