



Roberto Murad Dana

Planejando Cidades rumo à Economia de Zero Carbono

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental

Orientador: Prof. LUIZ FELIPE GUANAES REGO

Co-orientador: Prof. RAFAEL DA SILVA NUNES

Rio de Janeiro

Maio de 2018



Roberto Murad Dana

**Planejando Cidades rumo à Economia
de Zero Carbono**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Felipe Guanaes Rego

Orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. Rafael da Silva Nunes

Coorientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. Alcir de Faro Orlando

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Tacio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de maio de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Roberto Murad Dana

Graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 1974. Ingressou no Mestrado na PUC-Rio em 2014, na área de Engenharia Urbana e Ambiental. Concentrou sua pesquisa nas áreas de energias renováveis. Atua profissionalmente no desenvolvimento de mercado e comercialização de projetos de energia solar.

Ficha Catalográfica

Dana, Roberto Murad

Planejando cidades rumo à economia de zero carbono / Roberto Murad Dana ; orientador: Luiz Felipe Guanaes Rego ; co-orientador: Rafael da Silva Nunes. – 2018.

91 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental – Teses. 3. Energia renovável. 4. Energia solar. 5. Conversão fotovoltaica. 6. Geração distribuída. 7. Descarbonização. I. Rego, Luiz Felipe Guanaes. II. Nunes, Rafael da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

À minha esposa Marcia Bella que me estimulou e me apoiou incondicionalmente para realização deste trabalho.

Aos professores Luiz Felipe e Rafael, pela orientação, dedicação, envolvimento e confiança no meu trabalho.

Ao professor Celso Romanel pelo suporte de coordenação e administrativo durante o mestrado até chegar à conclusão deste trabalho.

À Deus, Fonte Criadora do Sol e da Terra, pela inspiração e por ter estado presente ao longo de toda a realização deste trabalho.

Resumo

Dana, Roberto; Rego, Luiz Felipe (Orientador); Nunes, Rafael (Co-orientador). **Planejando Cidades rumo à Economia de Zero Carbono**. Rio de Janeiro, 2018. 91p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O tema das mudanças climáticas é um dos maiores desafios globais por parte de governos nacionais e articulações internacionais, visando estabilizar as concentrações de Gases do Efeito Estufa (GEE) e evitar interferências antropogênicas perigosas sobre a atmosfera e o sistema climático global. De acordo com o “Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima” (IPCC), as principais causas das mudanças climáticas estão relacionadas as emissões liberadas pela queima dos combustíveis fósseis que compõem a matriz energética de muitos países industrializados, tornando-se necessária a limpeza do componente fóssil, particularmente do carbono. O Brasil está entre os dez países que mais emite GEE, apesar de possuir uma das matrizes energéticas com mais energias renováveis do mundo, assumiu em 2015 na convenção do clima em Paris o compromisso global de descarbonização da economia e de aumentar a participação de fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, na sua matriz energética. Valendo-se do alto potencial de irradiação solar no território brasileiro, o presente estudo aponta a geração distribuída de energia fotovoltaica como um dos caminhos para acelerar o ingresso do Brasil na economia de baixo carbono honrando o compromisso de mitigação dos GEE. Simulando cenários com base no ano de 2010 e usando o recurso de geoprocessamento, concluiu-se que com a instalação massiva de sistema fotovoltaico nos telhados dos domicílios brasileiros, é possível antecipar metas de mitigação dos GEE e gerar excedentes de emissões evitadas posicionando o Brasil como um importante protagonista na descarbonização da economia global até o final do século.

Palavras-chave

Energia renovável; Energia solar; Conversão fotovoltaica; Geração distribuída; Descarbonização; Gases do Efeito Estufa.

Extended Abstract

Dana, Roberto; Rego, Luiz Felipe (Advisor); Nunes, Rafael (Co-advisor)
Planning Cities Towards the Zero Carbon Economy. Rio de Janeiro, 2018. 91p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Since the last decades of the twentieth century, human society has been facing economic and environmental crisis, influencing each other, drawing attention of national governments, international and non-governmental organizations together with several sectors of civil society. The economic crisis recently experienced by several countries and aggravated by various pressures of a global population that reached 7.3 billion in 2015 with a projected growth for 2030 of 8.5 billion people, will require an increase of employment, food production, water supply, energy production and industry development. As far as the environment is concerned, there is sufficient agreement by the scientific community, attributing to industrial processes, the use of fossil fuels, deforestation and land use throughout the 19th and 20th centuries, several environmental impacts such as: cumulative discharge of waste contaminating the soil, rivers and oceans; overexploitation of natural resources often leading to the risk of their depletion; emission of polluting gases (particularly CO₂) causing global temperature rise, warming the atmosphere and oceans reducing snow and melting ice from the glacial regions, acidifying and raising the level of the oceans; use of agrochemicals and pesticides in agricultural activities contaminating soil and food; deforestation leading to severe ecological imbalances, biodiversity loss and changes in climate patterns. From this global context, several countries have been restructuring their laws and economies to stop the predatory exploitation of natural resources and implementing actions to clean up their energy matrix and decarbonize the economy reducing carbon emissions of fossil fuels sources responsible for the environment contamination.

Decarbonization of the economy requires a reengineering in its several sectors: power generation, agriculture, land use, industry, transportation and construction. This process takes place through an improvement of the energy matrix by the increase of new renewable energy sources such as wind, solar, biomass and biofuels in addition to the use of hydropower. These are measures that are beginning to be adopted worldwide, forging a new economy, also called the "green economy", aimed to restore ecological balance, contain the abusive exploitation of finite natural resources and reducing the survival risk of humans and other beings with the right to life on the planet.

At the national level, the present thesis aims to encourage the government to create policies and incentive programs of renewable energy sources to accelerate Brazil's entry into the zero-carbon economy, in accordance with the

Brazil commitment made in Paris on the 21st Conference of the Parties (COP 21) at the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (MMA, 2015) [1].

One of the main objectives of UNFCCC is to stabilize greenhouse gas concentrations in the atmosphere by preventing a dangerous anthropogenic interference in the climate system. This should be achieved within a time frame allowing the ecosystems to naturally adapt to climate change, ensuring that food production is not threatened and enabling economic development to proceed in a sustainable manner.

Currently, hydroelectric power with 68% of the country's electricity generation capacity plays an important role, as a clean source of energy serving as a great support in the dissemination and development of intermittent renewable sources such as wind and solar power when connected to the grid working in a cogeneration system. The cogeneration modality became available in Brazil after the National Electric Energy Agency(ANEEL) normative resolution Nr. 482 of 2012, where the consumer can generate his own electricity from renewable sources or qualified cogeneration and even supply the surplus to the distribution network of his locality. These are the so called distributed micro and mini generation of electric energy, innovations that can combine financial economy, social-environmental awareness and sustainability.

On the other hand, the expansion of hydroelectric power generation represents large socio-environmental impacts with interference in areas of environmental protection, indigenous occupations and quilombolas¹. In addition, hydroelectric projects need the financing of high investments required to make these projects feasible due to their size and because they are usually located far from consumer centers, requiring additional investments in transmission lines for the flow of electricity production. The result is that consumers are subject to high electricity prices to cover high investment costs and is still subject to tariff inflation depending on the supply level of water resources.

Brazil with its geographic location and territorial dimension, is favored by having a solar potential with high irradiance rates in almost all its territory, located in a region with a more vertical incidence of the solar rays and with the proximity of the equator line, causing little variation in the solar incidence throughout the year and having good levels of irradiation even in the winter.

Based on this context, three motivations guided this study to align and accelerate Brazil towards the decarbonization of the economy: 1-to take advantage of the abundant solar potential on the roofs of Brazilian households to generate electricity from a clean and renewable source; 2 - electricity consumers start to

¹ Quilombolas are slaves who have been refugees in quilombos, or descendants of black slaves with ancestors during the period of slavery, have fled from sugarcane mills, farms and small constructions where they carry out arduous work to produce small villages called quilombos.

generate and consume their own power, returning to the network the surplus via the compensation system; 3 - improve the energy matrix by increasing the share of renewable energy such as photovoltaic in substitution of the thermal sources of electricity generation.

Therefore, this thesis explores the potential of the use of solar energy in the national territory, through bulk insertion of the distributed generation of electric power by the application of the photovoltaic system installed on the roofs of households connected to the low voltage electrical network, aiming the acceleration and the improvement of the energy matrix by the bias of renewable energies.

The main objective of this thesis is to simulate the power generation in the national territory through distributed microgeneration of photovoltaic systems connected to the grid installed on the roofs of households in all Brazilian states, with the following specific objectives:

- Determine decarbonization - avoided CO₂ emissions - by the distributed microgeneration of photovoltaic energy connected to the grid according to the Clean Development Mechanism of United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).
- Determine the achievement/anticipation of Brazil's greenhouse gas (GHG) mitigation targets for the years 2025 and 2030 in line with the commitment made by Brazil at the 21st Conference of the Parties in Paris (COP 21).
- Determine the additional contribution of avoided emissions that exceed Brazil's GHG reduction targets and the potential for generating carbon credits for the international market

This thesis is organized in six chapters as described below:

The first chapter is an introduction and the second chapter presents the global and Brazilian Energetic and Climate Context.

The third chapter presents the concepts and fundamentals of the solar energy resource: Solar radiation, solar resource in Brazil, conversion of solar radiation into electricity, benefits and impacts of solar energy generation in electric power.

In the fourth chapter methodological procedures are described with the adoption of a geographic information system as a simulation tool. Assumptions and parameters are defined for the simulation of the solar potential on the roofs of households such as the average areas of roofs of houses and apartments and the percentage of useful roof area for the installation of photovoltaic panels. Other factors that are defined: 1. Efficiency factor of the conversion of solar into photovoltaic energy; 2. Loss factor in the photovoltaic conversion process; 3. CO₂

emission factors determined by the Clean Development Mechanism methodology, used to quantify the future contribution of greenhouse gas (GHG) reduction of a plant connected to the grid that will generate electricity using renewable energy.

The fifth chapter presents the following results:

1. The potential for the photovoltaic power in the roofs of Brazilian households connected to the grid, based on data from the 2010 Brazilian census, was 305,737 GW/year, representing more than twice the consumption of electric power of households in the year of 2010, confirming the vocation of Brazil to be a strong generator of renewable energy of solar source. Regarding the GHG mitigation potential, if the photovoltaic power generation occurred in the scenario of 2006, it would be 80 MtCO_{2e/year} avoided emissions; if it occurred in the scenario of the year 2011, it would be 75 MtCO_{2e/year} avoided emissions; if it occurred in the scenario of 2016, it would be 155 MtCO_{2e/year} avoided emissions;

2. Regarding Brazil's commitment of reduce GHG in the Paris Global Agreement:

2.1 In the 2006 scenario, the reduction target of 37% until 2025 would be reached in 2021 and would exceed 20%; the reduction target of 43% until 2030 would be achieved by 2023 and would exceed by 42%.

2.2 In the scenario of 2011, the reduction target of 37% until 2025 would only be reached in 2027, therefore 2 years later, but would recover the delay with the reduction target of 43% until 2030 in the same year of 2030 and exceed in 5% this goal.

2.3 In the 2016 scenario, the reduction target of 37% until 2025 would be reached in 2024 and would exceed 20%; the reduction target of 43% until 2030 would be achieved by 2025 and would exceed 60%.

3. Regarding the Additional Contribution to the Brazil GHG Mitigation Target (in the most recent scenario - base year 2016):

3.1 In relation to the reduction target of 37% until 2025, a surplus of 228 MtCO_{2e} of avoided emissions would be generated, equivalent to the generation of a potential 228 million carbon credits for the international market.

3.2 In relation to the reduction target of 43% until 2030, a surplus of 814 MtCO_{2e} of avoided emissions would be generated, equivalent to the generation of a potential of 814 million carbon credits for the international market.

The sixth chapter presents the following conclusions of this thesis:

With the simulation of three scenarios, based on the years 2006, 2011 and 2016 of photovoltaic power generation on the roofs of all Brazilian households connected to the grid, concludes that it would be possible to accelerate Brazil's

entry into the post-carbon era with the achievement and anticipation of its GHG reduction targets until 2030, in accordance with the commitment made by Brazil in the Global Agreement of Paris in 2015 and positioning itself as a major player in the decarbonization of the global economy besides contributing to the generation of carbon credits (that exceed its targets) for the international market.

Another conclusion is that it would significantly increase the share of renewable energy in the Brazilian grid, and therefore, it would also increase the resilience of the electric system, protecting populations from electrical interruptions and minimizing the use of thermal plants (conventional security systems based on diesel generators, one of the main responsible for increasing GHG emissions).

Keywords

Renewable energy; Solar Energy; Photovoltaic conversion; Distributed Energy; Decarbonization; Greenhouse Gases.

Sumário

1 . Introdução	18
1.1. Objetivo	20
1.2. Estrutura do trabalho	21
2 . Contexto Climático e Energético – Uma análise da situação global e brasileira	23
2.1. Confirmação da Tendência para as Energias Renováveis.	28
2.2. Geração Distribuída	30
2.3. Contexto Energético Brasil	34
2.3.1. Necessidade de aperfeiçoamento da Matriz Energética	34
2.3.2. Compromisso Brasil na COP 21- Acordo de Paris em 2015	36
2.3.3. Expansão da Matriz Elétrica com geração própria a partir de fontes renováveis	37
2.3.4. Geração Distribuída	38
3 .Conceitos Energéticos: uma fundamentação	41
3.1. Recurso Solar como Fonte de Energia Global	41
3.2. Radiação Solar	42
3.3. Otimização do aproveitamento Solar	45
3.4. Recurso Solar no Brasil	45
3.5. Conversão Direta da Radiação Solar em Energia Elétrica	47
3.6. Benefícios da Geração de Energia Elétrica por Fonte Solar	50
3.7. Impactos da Geração de Energia Elétrica por Fonte Solar	50
4 . Potencial energético solar no Brasil: Procedimentos metodológicos	52
4.1. Sistema de Informação Geográfico	53
4.2. Estimativa de domicílios integrados à rede elétrica	53
4.3. Determinação da Irradiação Solar por Estado e Setor censitário	54
4.4. Determinação da Cobertura Disponível e Área Útil dos Telhados	56
4.5. Atribuição do Fator de Eficiência na conversão Fotovoltaica	58
4.6. Determinação do Fator de Emissão de CO ₂ do sistema elétrico	59
4.6.1. Fator de Emissão de CO ₂ e anual – Ano Base 2016	61
4.6.2. Fator de Emissão de CO ₂ e anual – Ano Base 2011	61
4.6.3. Fator de Emissão de CO ₂ e anual – Ano Base 2006	62
4.7. Procedimentos Metodológicos Aplicados	63
4.7.1. Premissas Adotadas	64

5 . Dos resultados potenciais: os diferentes cenários na implementação da energia fotovoltaica no Brasil	65
5.1. Geração de Energia Fotovoltaica	65
5.2. Cálculo das Emissões Evitadas de Gases do Efeito Estufa	66
5.3. Contribuição de Mitigação de GEE - Acordo de Paris (COP 21)	68
5.3.1. Cenário Ano Base 2016 – % de Atingimento da Meta	69
5.3.2. Cenário Ano Base 2011 - % de Atingimento da Meta	71
5.3.3. Cenário Ano Base 2006 - % de Atingimento da Meta	72
6 . Conclusão do Estudo	73
6.1. Uma perspectiva estadual da microgeração ao invés de nacional	77
6.2. Considerações Finais - Acelerando o ingresso do Brasil na era pós-carbono	79
7 . Referências bibliográficas	82

Lista de Tabelas

Tabela 1.1- Cenários das Series Temporais simuladas de 1950 a 2100	26
Tabela 1.2 - Principais pontos da conferência de Paris na COP 21	27
Tabela 1.3 - Principais pontos da conferência de Marrakesh na COP 22	27
Tabela 1.4 - Principais pontos da conferência de Berlim na COP 23	28
Tabela 2.1 - Classificação das células fotovoltaicas	49
Tabela 2.2 - Eficiência máxima das tecnologias fotovoltaicas	49
Tabela 3.1- Fração de telhado disponível para aplicação de Painéis Fotovoltaicos Iniciativa de Pesquisas de 5 países	57
Tabela 3.2 - Dados da Margem de Construção e da Margem de Operação – Ano de 2016	61
Tabela 3.3 - Dados da Margem de Construção e da Margem de Operação - Ano de 2011	62
Tabela 3.4 - Dados da Margem de Construção e da Margem de Operação - Ano de 2006	62
Tabela 4.1- Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica em Domicílios Conectados à Rede por Estado	65
Tabela 4.2 - Relação entre Potencial Fotovoltaica no Brasil x Consumo de Energia	66
Tabela 4.3 - Fator de Emissão de CO _{2e} por Ano Base 2016, 2011 e 2006	66
Tabela 4.4 - Emissões Evitadas de GEE (tCO _{2e} /ano) por Estado - Ano Base 2016, 2011, 2006	67
Tabela 4.5 - Emissões Evitadas de GEE (Mt CO _{2e} /ano) Brasil - Ano Base 2016, 2011, 2006	68
Tabela 4.6 - Evolução das Emissões de GEE até 2014	69
Tabela 4.7 - Metas Globais de Redução de GEE para 2025 e 2030	69
Tabela 4.8 - Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV na Base 2016)	70

Tabela 4.9 - Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV na Base 2011)	71
Tabela 4.10 - Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV na Base 2006)	72
Tabela 5.1 - Contribuição Excedente as Metas Brasil de Mitigação de GEE	74
Tabela 5.2- Estados Priorizados para atingir a Meta de 2025	77
Tabela 5.3 - Estados Priorizados para atingir a Meta de 2030	78
Tabela 5.4 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável N° 7 da Agenda de 2030 da ONU	81
Tabela 5.5 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável N° 13 da Agenda de 2030 da ONU	81

Lista de Figuras

Figura 1 - Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil.	19
Figura 1.1 - Emissões globais de GEE por setor econômico (ref. 2010).	23
Figura 1.2 - Emissões de GEE por tipo de Gás (ref. ano 2010).	24
Figura 1.3 - Mudanças de Temperatura da Superfície Terrestre e Oceânica de 1850 a 2012.	25
Figura 1.4 - Séries temporais simuladas de 1950 a 2100 para a temperatura média.	26
Figura 1.5 - Capacidade Global das Energias Renováveis	28
Figura 1.6 - Capacidade de Geração Global de Energia Renovável a nível Regional.	29
Figura 1.7 - Distribuição Global de Energia Renovável a nível Regional	29
Figura 1.8 - Geração Energia Renovável Distribuída – Alemanha, Austrália, EUA.	30
Figura 1.9 - Penetração de Energia renovável distribuída conectada à rede.	31
Figura 1.10 - Participação das Energia Renováveis na Europa, 2014.	32
Figura 1.11 - Participação das Energias Renováveis no consumo de energia na UE, 2014.	33
Figura 1.12 - Participação da geração termelétrica no total da geração de energia elétrica.	34
Figura 1.13 - Evolução da participação das fontes primárias na geração de energia elétrica (1990-2014).	35
Figura 1.14 - Emissões de CO ₂ do Setor de Energia por segmento de atividade (1990-2014).	36
Figura 1.15 - Redução da temperatura até o limite de 2° C..	36
Figura 1.16 - Contribuição Nacionalmente Determinada.	37
Figura 1.17 - Conexões de GD por tipo de fonte de geração.	39

Figura 1.18 - Evolução dos Sistemas Fotovoltaicos de Micro e Mini geração Distribuída e Unidades Consumidoras Beneficiadas.	39
Figura 1.19 - Unidades Consumidoras Beneficiadas por Sistemas Fotovoltaicos por Classe de Consumo.	40
Figura 2.1 - Recursos de Energias Globais.	41
Figura 2.2 - Irradiação Solar Global.	42
Figura 2.3 - Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol.	43
Figura 2.4 - Espalhamento dos raios solares em diferentes superfícies.	44
Figura 2.5 - Efeito da inclinação dos raios solares na radiação recebida por unidade de área.	44
Figura 2.6 - Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos.	45
Figura 2.7- Mapa da irradiação solar no plano inclinado.	46
Figura 2.8 - Camadas de um módulo fotovoltaico típico.	47
Figura 2.9 - Principais componentes por tipo de sistema fotovoltaico.	48
Figura 3.1 - Cenários Anos Base (2006, 2011 e 2016) de Simulação de Geração de Energia Fotovoltaica.	52
Figura 3.2 - Mapa de Irradiação Solar Global Diária no plano Inclinado incidindo sobre superfície com Inclinação igual à latitude do local.	55
Figura 3.3 - Percentagem de residências de acordo com a variação de área do plano de solo.	57
Figura 3.4 - Evolução da eficiência dos painéis solares.	58
Figura 3.5 - Diagrama de Sankey de perdas de um sistema fotovoltaico conectado à rede.	59
Figura 3.6 - Metodologia de estimativa de potencial fotovoltaica nos domicílios e quantificação da redução de emissão dos Gases do Efeito Estufa.	63
Figura 4.1 - Antecipação das Metas para o cenário do Ano Base 2016.	70

Figura 4.2 - Antecipação das Metas para o cenário do Ano Base 2011.	71
Figura 4.3 - Antecipação das Metas para o cenário do Ano Base 2006.	72
Figura 5.1- Atingimento das Metas para 2025 e 2030 do Acordo de Paris.	73
Figura 5.2 - Resultado da antecipação das Metas de Redução de GEE.	74
Figura 5.3 - Emissões Evitadas de GEE nos anos 2006, 2011 e 2016 (Mt CO _{2e} /ano).	75
Figura 5.4 - Fatores de Emissão de CO _{2e} - Anos Base de 2006, 2011 e 2016.	75
Figura 5.5 - Evolução do Fator de Emissão de CO _{2e} do SIN.	76
Figura 5.6 - Evolução da geração térmica convencional do SIN.	76
Figura 5.7 - Emissões Evitadas de Estados Priorizados para atingir a Meta Brasil de 2025.	78
Figura 5.8 - Emissões Evitadas de Estados Priorizados para atingir a Meta Brasil de 2030.	79

Lista de Abreviaturas e Siglas

SIGLA UTILIZADA	NOME COMPLETO
ABSOLAR	A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AND	Autoridade Nacional Designada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BM	Build margin
CH4	Metano
COP	Conferência das Partes
CO	Monóxido de Carbono
CO2	Dióxido de carbono ou gás carbônico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EU	European Union
EUA	Estados Unidos da América
GCF	Green Climate Fund
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Gigawatt
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NOx	Óxidos de Nitrogênio
N2O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OM	Operation margin
QGIS	Quantum Geographic Information System
RCP	Representative Concentration Pathways
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
SIG	Sistema de Informação Geográfico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SO2	Dióxido de Enxofre
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
UE	União Europeia
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

1. Introdução

Desde as últimas décadas do século XX, a sociedade humana vem enfrentando crises tanto da economia como do meio ambiente se influenciando mutuamente, chamando a atenção de governos nacionais, articulações internacionais, organizações não governamentais e vários setores da sociedade civil. A crise econômica recentemente experimentada por vários países e, agravada por várias pressões de uma população global que atingiu o patamar de 7.3 bilhões em 2015 com um crescimento projetado para 8.5 bilhões em 2030, necessitará ser atendida para um aumento de demanda de geração de emprego, produção de alimentos, provisão de recursos hídricos, produção de energia e desenvolvimento da indústria. Quanto ao meio ambiente, existe acordo suficiente por parte da comunidade científica atribuindo aos processos industriais, ao uso de combustíveis fósseis, ao desmatamento e usos da terra ao longo dos séculos 19 e 20, diversos impactos ambientais tais como: o despejo cumulativo de resíduos que contaminam o solo, rios e oceanos; a superexploração de recursos naturais muitas vezes levados até o risco de seu esgotamento; a emissão de gases poluentes (particularmente de CO₂) causando a elevação da temperatura global, aquecendo a atmosfera e oceanos, diminuindo a neve e derretendo o gelo das regiões glaciais, acidificando e aumentando o nível dos oceanos; o uso de agrotóxicos e pesticidas na atividade agrícola contaminando o solo e os alimentos; o desmatamento de florestas levando a graves desequilíbrios ecológicos, perdas de biodiversidade e alterações dos padrões climáticos.

A partir desse contexto global, vários países vêm reestruturando suas leis e economias visando conter a exploração predatória de recursos naturais e implementando medidas de limpeza de suas matrizes energéticas para descarbonizar a economia e reduzir as emissões de carbono diminuindo as fontes de combustíveis fósseis² responsáveis pela contaminação do meio ambiente.

A descarbonização da economia requer uma reengenharia em diversos setores - na extração de matérias primas, agricultura, indústrias e no setor de serviços. Esse processo se dá por meio de um aperfeiçoamento da matriz energética com o incremento das novas fontes de energia renováveis como a eólica, solar, biomassa e biocombustíveis além do uso da energia de fonte hidráulica. Essas medidas estão ajudando a forjar uma nova economia verde e descarbonizada possibilitando conter a escassez de recursos naturais, restaurar o equilíbrio ecológico e reduzir o risco de sobrevivência da espécie humana e a de outros os seres com direito a vida no planeta.

² Combustíveis fósseis são combustíveis formados por meio de processos naturais, como a decomposição de organismos mortos soterrados. Os combustíveis fósseis contêm alta quantidade de carbono, usados para alimentar a combustão. São usados como combustíveis, o carvão mineral, gás natural e o petróleo.

No âmbito nacional, o presente trabalho visa o incentivo por parte do governo de criação de políticas e programas de incentivo de uso das energias renováveis de fonte solar para acelerar o ingresso do Brasil na economia de zero carbono, conforme compromisso assumido pelo Brasil no Acordo de Paris na 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (MMA, 2015) [1]. Um dos principais objetivos da UNFCCC é estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, evitando a interferência antropogênica perigosa no sistema climático. Isto deve ser alcançado dentro de um prazo que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente às mudanças climáticas, assegurando que a produção de alimentos não seja ameaçada permitindo que o desenvolvimento econômico prossiga de maneira sustentável.

Atualmente a energia hidráulica com cerca de 68% da capacidade de geração elétrica no país (Figura 1) têm um importante papel, por constituir-se uma fonte de energia limpa servindo de grande suporte na disseminação e desenvolvimento das fontes renováveis intermitentes como a eólica e a solar, quando conectadas a rede elétrica num sistema de cogeração. A modalidade de cogeração, se tornou disponível no Brasil a partir da Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482 de 2012, onde o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (sistema de compensação). Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem se aliar a economia financeira, consciência socioambiental e sustentabilidade.

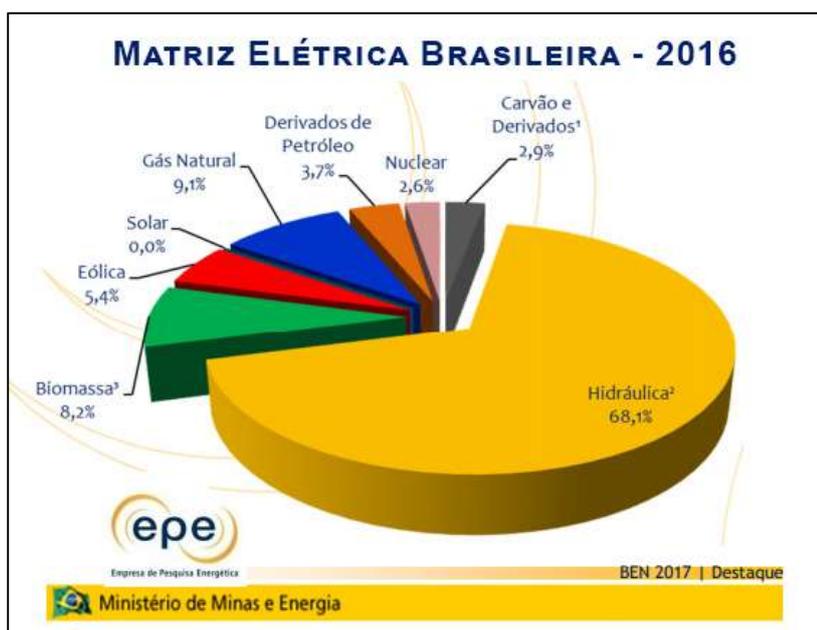


Figura 1.1 - Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil.

Fonte: EPE(2017) [2]

Por outro lado, a expansão da geração de energia por hidrelétricas representa grandes impactos socioambientais com interferência em áreas de proteção ambiental, de ocupações indígenas e de quilombolas³. Adicionalmente, projetos hidrelétricos requerem financiamento de elevados investimentos necessários para a viabilização desses empreendimentos por sua dimensão e porque normalmente se situam a grande distância dos grandes centros de consumo, necessitando de investimentos adicionais em linhas de transmissão para escoamento da produção de eletricidade. A resultante no lado do consumo é que o consumidor fica sujeito a preços elevados da energia elétrica para cobrir custos dos altos investimentos, ficando ainda sujeitos a inflações tarifárias em função do nível de oferta da fonte hídrica.

O Brasil com sua localização geográfica e dimensão territorial é favorecido por possuir um potencial solar com elevados índices de irradiação em quase todo seu território, situado numa região com incidência mais vertical dos raios solares e com a proximidade à linha do equador, fazendo com que haja pouca variação na incidência solar ao longo do ano e possuindo bons níveis de irradiação até mesmo no inverno.

Baseado nesse contexto, três motivações nortearam esse estudo para alinhar e acelerar o Brasil rumo a descarbonização da economia: 1- aproveitar o abundante potencial solar nos telhados dos domicílios brasileiros para gerar eletricidade de fonte renovável e limpa; 2- consumidores da rede elétrica passam a gerar e consumir sua própria energia, retornando para a rede o excedente via sistema de compensação; 3- aperfeiçoar a matriz energética aumentando a participação de energias renováveis, como a fotovoltaica, em substituição as fontes térmica de geração de eletricidade.

Portanto, esse estudo explora o potencial de aproveitamento da energia solar no território nacional, através de sua inserção em massa da geração distribuída de energia elétrica pela aplicação do sistema fotovoltaico nos telhados de domicílios e conectado à rede elétrica de baixa tensão, visando a aceleração da descarbonização e o aperfeiçoamento da matriz energética pelo viés das energias renováveis.

1.1. Objetivo

O principal objetivo dessa dissertação é simular a geração de energia no território nacional, pela microgeração distribuída de sistemas fotovoltaicos

³ Quilombolas são escravos refugiados em quilombos, ou descendentes de escravos negros cujos antepassados no período da escravidão fugiram dos engenhos de cana-de-açúcar, fazendas e pequenas propriedades onde executavam diversos trabalhos braçais para formar pequenos vilarejos chamados de quilombos.

conectados à rede e instalados nos telhados dos domicílios em todos os estados brasileiros, com os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a descarbonização - emissões de CO₂ evitadas - pela microgeração distribuída de energia fotovoltaica conectada à rede, de acordo com mecanismo de Desenvolvimento Limpo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.
- Determinar o atingimento/antecipação das metas Brasil de mitigação dos gases do efeito estufa para os anos 2025 e 2030 conforme o compromisso assumido pelo Brasil na 21^a Conferência das Partes em Paris.
- Determinar a contribuição adicional de emissões evitadas que excedem as metas Brasil de redução dos GEE e o potencial de geração de créditos de carbono para o mercado internacional.

1.2.

Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, conforme descrito a seguir:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução com objetivo do trabalho e o segundo capítulo apresenta o Contexto Climático e energético global e do Brasil.

No terceiro capítulo são apresentados os conceitos e fundamentos do recurso energético solar: Radiação solar, recurso solar no Brasil, conversão da radiação solar em energia elétrica, benefícios e impactos da geração de energia solar em energia elétrica.

No quarto capítulo são descritos os procedimentos metodológicos com a adoção de um sistema de informação geográfico como ferramenta de simulação. São definidos premissas e parâmetros para a simulação do potencial solar sobre os telhados dos domicílios como as áreas médias dos telhados de casas e apartamentos e o percentual aproveitável de área útil dos telhados para instalação dos painéis fotovoltaicos. Outros fatores que são definidos: 1. Fator de eficiência da conversão da energia solar em fotovoltaica; 2. Fator de perda na conversão fotovoltaica; 3. Fatores de emissões de CO₂ determinado pela metodologia do Mecanismo do Desenvolvimento Limpo, utilizado para quantificar a contribuição futura de redução de Gases do Efeito Estufa (GEE) de uma usina conectada à rede que vai gerar energia elétrica utilizando energia renovável.

No quinto capítulo são apresentados os resultados: 1. Dos potenciais de geração de energia fotovoltaica distribuída nos telhados dos domicílios brasileiros com os respectivos potenciais de mitigação dos gases do efeito estufa; 2. O atingimento e antecipação das metas de redução de gases do efeito estufa comprometido pelo Brasil para os anos de 2025 e 2030 no Acordo de Paris; 3. A

contribuição de emissões evitadas que excedem a meta Brasil de 2030 de mitigação dos GEE para o mercado internacional de carbono.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões e as considerações finais desse estudo.

2. Contexto Climático e Energético – Uma análise da situação global e brasileira

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) [3] no seu 5º relatório, o aquecimento global é uma realidade, sendo parte dele decorrente da ação humana nos diversos setores da economia acumulando altas concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, bloqueando o calor emitido pelo sol e retendo-o na superfície terrestre, com o consequente aumento das temperaturas.

Conforme apresentado no gráfico da Figura 1.1, pode-se perceber que no contexto mundial das atividades econômicas que produzem os gases do efeito estufa, o setor que vem em primeiro lugar representando 25% do total das emissões é o da geração de eletricidade e produção de calor proveniente da queima de carvão, gás natural e petróleo. A agricultura, silvicultura e usos da terra ocupam o segundo lugar com 24% das emissões decorrente do cultivo de culturas, pecuária e desmatamento. Já a indústria reúne 21% das emissões devido a queima de combustíveis fósseis, as emissões químicas, metalúrgicas, processos de transformação mineral e emissões de atividades de gestão de resíduos.

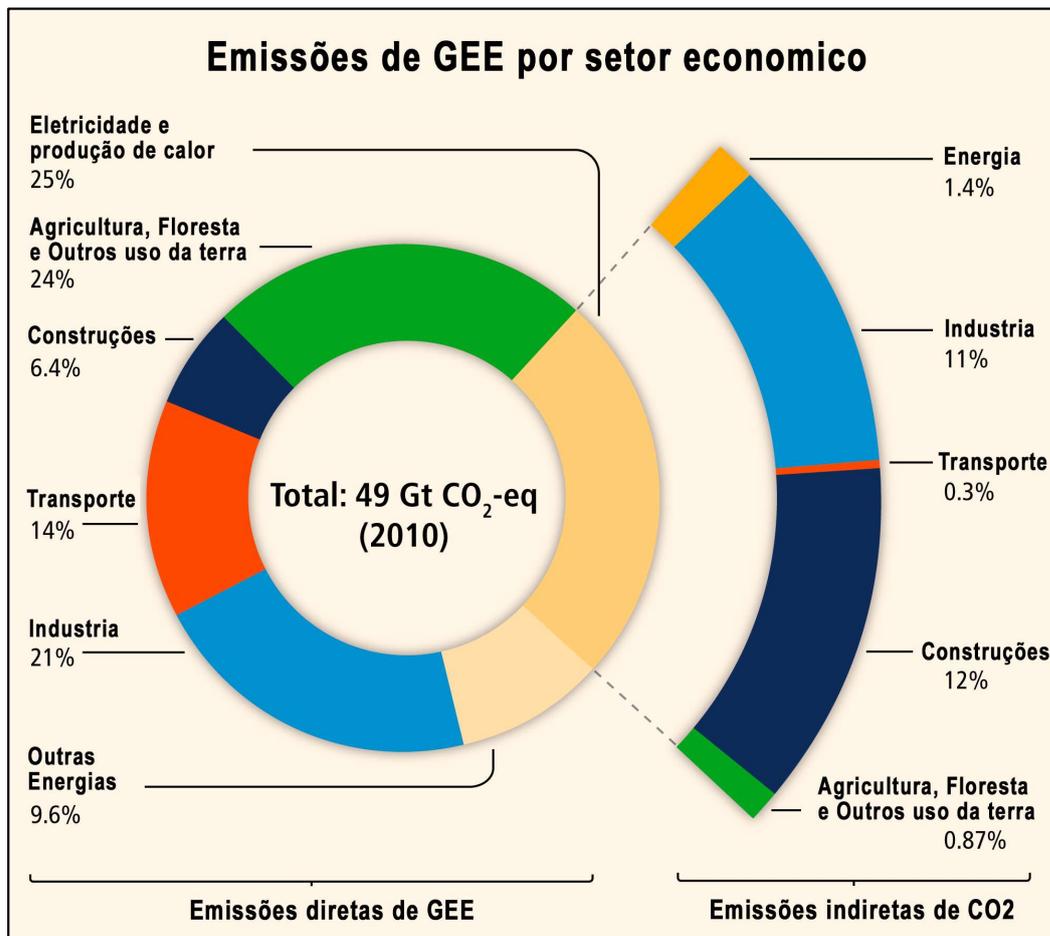


Figura 2.1 - Emissões globais de GEE por setor econômico (ref. 2010).

Fonte: IPCC (2014) [3b].

As emissões de 14% causadas pelos transportes rodoviários, ferroviários, aéreos e marítimos, são devidas à queima de combustíveis fósseis, sendo que cerca de 95% da energia de transporte do mundo vem dos combustíveis à base de petróleo, em grande parte a gasolina e o diesel. No setor de outras energias que não estão diretamente associadas à produção de eletricidade ou aquecimento, como a extração de combustíveis, refino e processamento, as emissões totalizam 9,6% das emissões mundiais. As construções ficam com 6,4% das emissões globais de gases do efeito estufa devida à geração local de energia e à queima de combustíveis nas cozinhas nas casas e aquecimento dos prédios (Figura 1.1).

Conforme apresentado no gráfico da Figura 1.2, as emissões de CO₂ representam cerca de 65% das emissões globais de Gases do Efeito Estufa (GEE).

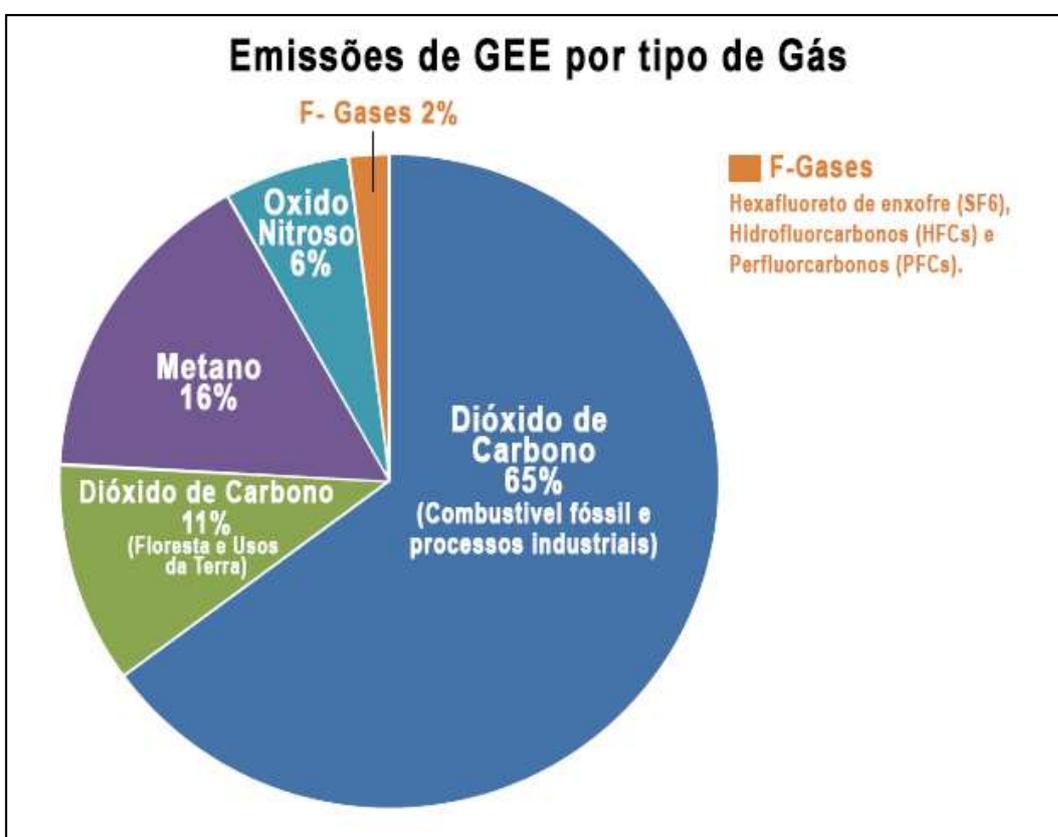


Figura 2.2 - Emissões de GEE por tipo de Gás (ref. ano 2010).

Fonte: Adaptado de IPCC (2014) [3a]

A maioria das emissões de CO₂ provém do uso e da produção de energia, com a queima de combustíveis fósseis representando dois terços das emissões globais de CO₂. Uma proporção significativa das emissões do transporte, agricultura e da mudança de uso da terra e silvicultura envolvem consumo de combustível fóssil, de modo que a porcentagem de emissões de energia é maior do que o gráfico implica. Esses fatores são os responsáveis pelo aquecimento dos oceanos, fusão de geleiras, redução da cobertura de neve, elevação do nível médio

dos mares e por alguns eventos climáticos extremos desde a segunda metade do século 20.

Conforme análise do 5º Relatório da Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) [3], desde 1850 no início da era industrial até 2012, o aquecimento médio foi de cerca de 0,85°C (Figura 1.3) sendo que mais de 66% dele aconteceu depois de 1950.



Figura 2.3 - Mudanças de Temperatura da Superfície Terrestre e Oceânica de 1850 a 2012.

Fonte: Adaptado de IPCC (2013) - Fig. SPM.1 [4].

Tomando-se como ponto de partida o ano de 1950, os cientistas simularam quatro cenários representativos de concentração de GEE denominados RCP⁴ (Figura 1.4) para a temperatura média anual global de 1950 a 2100. O cenário

⁴ RCP (Representative Concentration Pathway) - cada RCP define uma trajetória de emissões específica e subsequente de forçamento radiativo (uma medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio de entrada e saída de energia no sistema Terra-atmosfera, medida em watts por quadrado metro): RCP 8.5 - 8.5 Wm² em 2100; RCP 6.0 - 6.0 Wm² após 2100; RCP 4.5 - 4.5 Wm² após 2100; RCP 2.6 - 3 Wm² antes de 2100 declinando para 2.6 em 2100. Fonte: Moss et.al. 2010.

mais otimista prevê que o aumento da temperatura terrestre poderia variar entre 0,3 °C e 1,7 °C de 2010 até 2100, além do 0,85 °C que nosso planeta já aqueceu desde o ano 1850 se aproximando assim dos 2° C (Tabela 1.1).

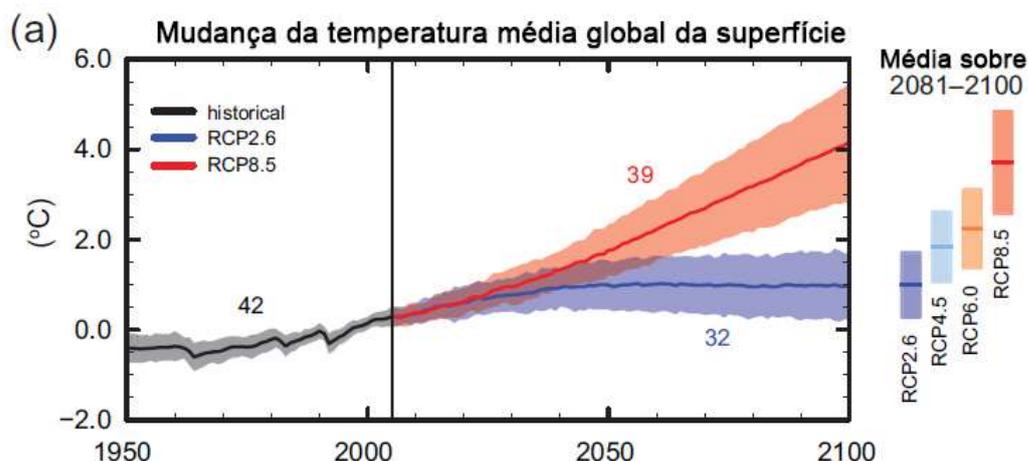


Figura 2.4 - Séries temporais simuladas de 1950 a 2100 para a temperatura média.
Fonte: 5º Relatório do IPCC - Fig. SPM.7 [5].

Tabela 2.1- Cenários das Series Temporais simuladas de 1950 a 2100

Cenários das Series Temporais Simuladas		
Cenários	Aumento da Temperatura	Elevação do Nível do Mar
RCP2.6	Entre 0,3 °C e 1,7 °C	Entre 26 e 55 cm
RCP4.5	Entre 1,1 °C e 2,6 °C	Entre 32 e 63 cm
RCP6.0	Entre 1,4 °C e 3,1 °C	Entre 33 e 63 cm
RCP8.5	Entre 2,6 °C e 4,8 °C	Entre 45 e 82 cm

Fonte: Elaboração própria a partir do 5º Relatório do IPCC [5a].

Uma ação mais rápida, mais ampla e mais profunda é necessária para descarbonizar a energia com a implantação massiva de tecnologias que estejam prontas para o mercado hoje, embora a economia e o mercado como conhecemos, não são suficientes para conter as mudanças climáticas, pois existem vários motivos pelos quais não existam soluções rápidas.

Um deles é como a compensação entre política energética e investimentos que tem que entregar não só sustentabilidade, mas acessibilidade a energia com a respectiva segurança de abastecimento. Outras razões são escala e a defasagem entre as ações que a mudança se dá que dependem de políticas de incentivos para que a indústria e a economia possam funcionar em sintonia. A infraestrutura energética é dependente de capital e costuma durar várias décadas, de modo que a

infraestrutura e investimentos hoje existentes definem o caminho para as próximas décadas. Outra razão e talvez a mais crítica a nível global, é a complexidade para se chegar a um acordo entre os atores representados pelas nações representadas nas 3 últimas convenções do clima da UNFCCC de Paris (COP 21), de Marrakesh (COP 22) e de Berlim (COP 23). Neste sentido, torna-se importante elencar minimamente os principais pontos definidos em cada uma destas conferências. Estas questões estão apresentadas na Tabela 1.2, Tabela 1.3 e Tabela 1.4 a seguir.

Tabela 2.2 - Principais pontos da conferência de Paris na COP 21

Conferencia de Paris na COP 21 em 2015
Reafirmar o objetivo de limitar o aumento da temperatura global bem abaixo de 2 graus Celsius, ao mesmo tempo fazer esforços para limitar o aumento até 1,5° C e abrange o período a partir de 2020;
Estabelecer compromissos vinculativos de todas as partes (195 países signatários) para fazerem "Contribuições Pretendidas, Determinadas em Nível Nacional " (NDCs). Os países devem informar regularmente sobre (a cada 5 anos) as suas emissões e os "progressos realizados na implementação e realização" dos seus NDCs, e submeter-se
Reafirmar as obrigações vinculativas dos países desenvolvidos no âmbito da UNFCCC para apoiarem os esforços dos países em desenvolvimento.
Estender o objetivo de mobilizar US\$ 100 bilhões por ano em 2020 até 2025, com um novo objetivo maior a ser definido para o período posterior a 2025;
Estender um mecanismo para enfrentar "perdas e danos" resultantes das mudanças climáticas;
O objetivo a longo prazo da neutralidade dos gases de efeito estufa é a segunda metade do século em algum momento após 2050, mas antes de 2100.

Fonte: Elaboração própria a partir de UNFCCC (2015) [16a].

Tabela 2.3 - Principais pontos da conferência de Marrakesh na COP 22

Conferencia de Marrakesh na COP 22 em 2016
O objetivo principal foi estender o prazo marcando para 2018 como a data de finalização do "manual de instruções" do Acordo de Paris na COP 21 e obter a ratificação dos países signatários a se comprometer com um futuro de energia limpa, apesar da ameaça de uma retirada dos EUA.
Ficou acordado que entre 2025 e 2030 seria mantido um Fundo Verde para o Clima (GCF)[1] com US\$100 bilhões por ano para financiar projetos sustentáveis como ajuda aos países mais pobres para que consigam implementar políticas de redução de desmatamento e poluição.

Fonte: Elaboração própria a partir de ONUBR (2016) [18]

Tabela 2.4 - Principais pontos da conferência de Berlim na COP 23

Conferencia de Berlim na COP 23 em 2017
200 países reafirmaram o acordo de Paris mesmo com a saída dos EUA.
Países ricos devem reportar com 2 anos de antecedência quanto dinheiro vão fornecer e em que prazos, e até 2020 informar suas ações em nível doméstico, quando entrará em vigor o Acordo de Paris.
Os países deverão prestar contas na próxima cúpula sobre como aumentarão a ambição de seus compromissos de redução de emissões nacionais.

Fonte: Elaboração própria a partir de AGÊNCIA BRASIL (2017) [18a]

2.1.

Confirmação da Tendência para as Energias Renováveis.

De acordo com dados divulgados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2017), a capacidade global de geração de energia renovável aumentou 161 GW em 2016, tornando o ano mais forte de novas adições de capacidade, numa estimativa global de que no final de 2016 a capacidade de geração de energia renovável do mundo atingiu 2.006 GW (Figura 1.5), com destaque para a energia solar mostrando um crescimento particularmente forte.

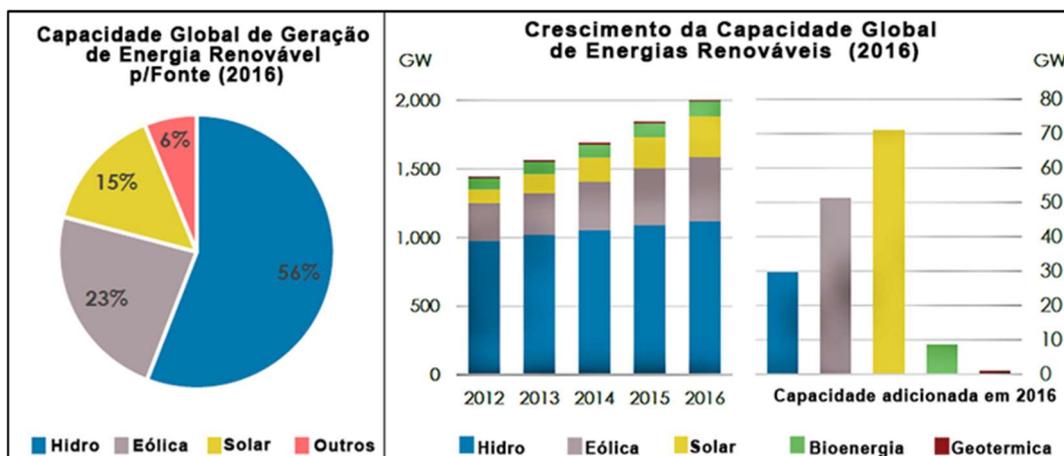


Figura 2.5 - Capacidade Global das Energias Renováveis

Fonte: IRENA (2017) [6].

A energia solar ocupou o primeiro lugar, com um aumento de capacidade de 71 GW (+ 32%). Os acréscimos na capacidade instalada em renováveis atingiram novos recordes históricos em 2016. O solar fotovoltaico contribuiu com cerca de 47% da capacidade adicional, seguido pela energia eólica com 34% e pela energia hidroelétrica com 15,5%. A Ásia atingiu uma capacidade de geração de energia renovável de 812 GW (Figura 1.6) com 41% da capacidade de geração global (Figura 1.7) e o mais rápido crescimento, com uma taxa de 13,1% de crescimento na capacidade renovável. A América do Norte ultrapassou Europa na expansão da capacidade, com um aumento de 24 GW (Figura 1.6) em comparação com um aumento de 21 GW da Europa. O outro desenvolvimento notável foi a

instalação de 4.1 GW (Figura 1.6) de capacidade de energia renovável na África, dando-lhe um segundo lugar no crescimento com uma taxa de 13,1% em 2016.

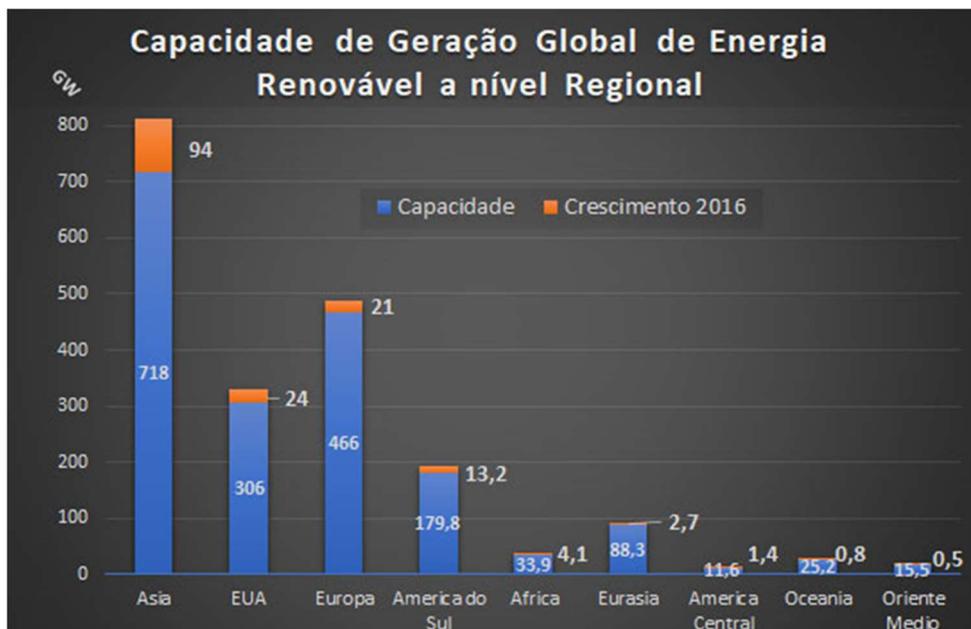


Figura 2.6 - Capacidade de Geração Global de Energia Renovável a nível Regional. Fonte: IRENA (2017) [6a].

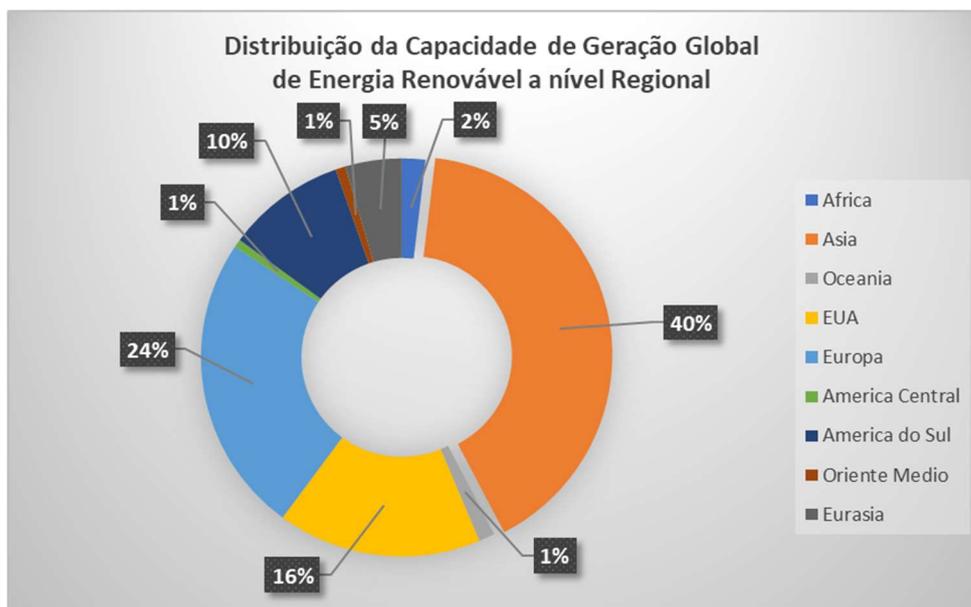


Figura 2.7 - Distribuição Global de Energia Renovável a nível Regional. Fonte: IRENA, (2017) [6b].

A transição energética e a tendência para as energias renováveis está claramente acontecendo, porém necessita acelerar para atingir as metas do Acordo de Paris⁵. O investimento continua a ser fortemente focado nas energias eólica e

⁵ A principal meta é limitar o aumento da temperatura global bem abaixo de 2° C, ao mesmo tempo fazer esforços para limitar o aumento até 1,5° C mitigando as emissões de GEE e abranger o período a partir de 2020.

solar fotovoltaica, no entanto, todas as tecnologias de energia renovável precisam de ser utilizadas para manter o aquecimento global muito abaixo dos 2° C.

2.2. Geração Distribuída

Sistemas de energia renovável distribuída ou microgeração distribuída, espalhados pelo mundo, estão desempenhando um papel cada vez mais importante para fornecer serviços de energia elétrica conectadas a rede elétrica, com destaque para os mercados de energia solar fotovoltaica distribuída para uso doméstico e empresas. Alemanha, Estados Unidos e Austrália lideram com instalações de geração distribuída de energia solar (Figura 1.8).

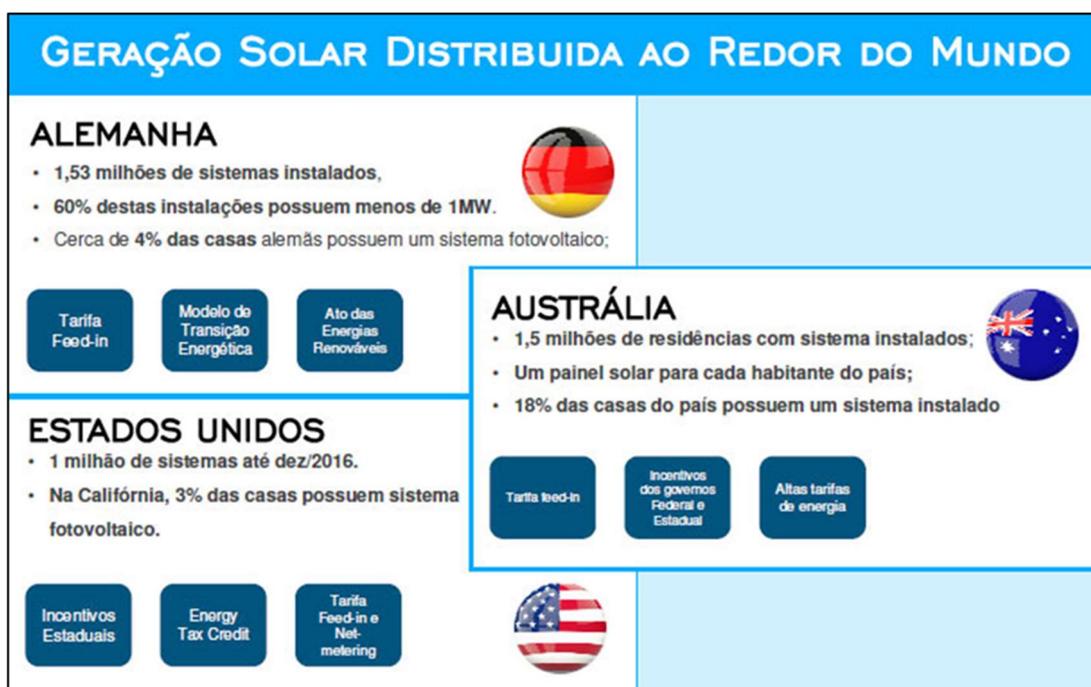


Figura 2.8 - Geração Energia Renovável Distribuída – Alemanha, Austrália, EUA.

Fontes: Adaptado de BSW-Solar, (2016) [7]; SEIA, (2015) [8]; Sun Wiz, (2015) [9].

Outros países em desenvolvimento também acompanham a tendência como o México, Peru, Quênia e Bangladesch (Figura 1.9).

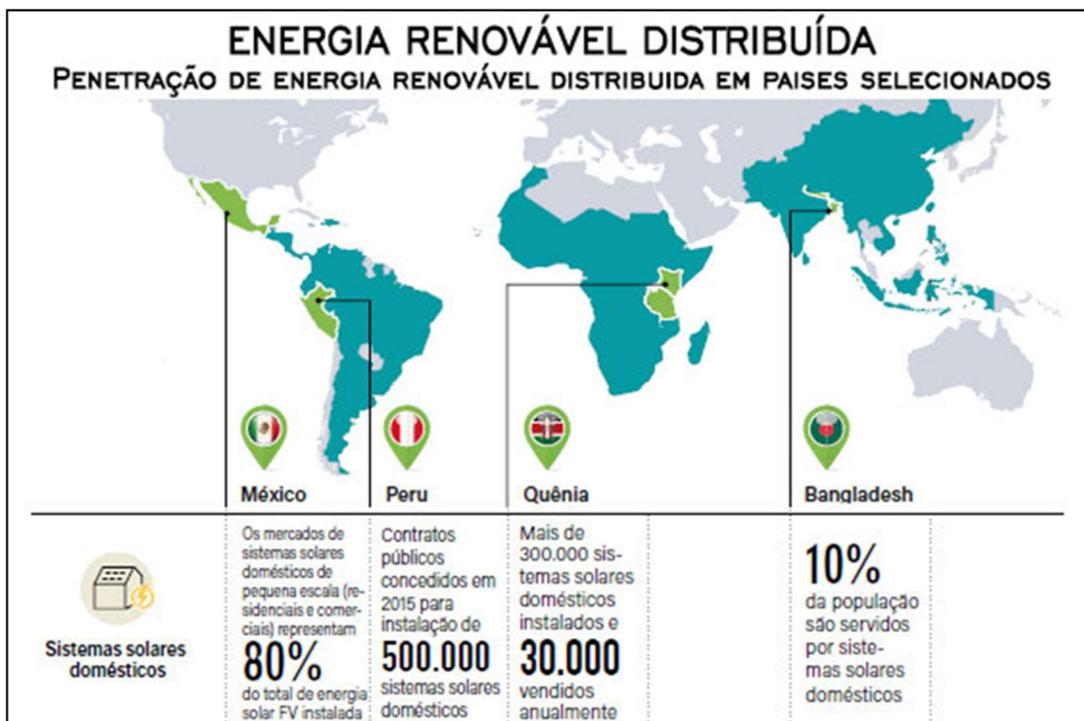


Figura 2.9 - Penetração de Energia renovável distribuída conectada à rede.
Fonte: REN 21 (2016) [10]

A geração distribuída⁶ de energia renovável tomou impulso na UE após o compromisso de migração para energia renovável, conhecido como acordo UE 20-20-20 [11], vinculando seus membros através de uma legislação para garantir que a UE atinja seus objetivos de clima e energia para o ano 2020. Esse pacote definiu três alvos principais:

- 20% de redução nas emissões de gases de efeito estufa (nos níveis do ano 1990)
- 20% da energia da UE a partir de energias renováveis
- 20% de melhoria na eficiência energética

O amadurecimento das tecnologias renováveis e a introdução de esquemas tarifários “feed-in”⁷ pelos governos dos países membros da UE possibilitou a expansão dos planos de eletricidade com fontes de energia renovável de menor escala e descentralizadas, com a microgeração distribuída por painéis solares em telhados residenciais e comerciais ou em comunidades combinando a geração de aquecimento solar e energia derivada de lixo doméstico. Dezesete países

⁶ O termo é usado atualmente principalmente para abordagens relativas ao meio ambiente visando a redução das emissões de carbono ou redução de custos. No Brasil a microgeração de energia distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW) que utilize fontes de energia renovável, como a energia solar fotovoltaica.

⁷ A tarifa de “feed-in” funciona garantindo um pagamento “premium” de longo prazo da eletricidade gerada a partir de fontes renováveis e alimentando a rede. O Governo estabelece o nível da tarifa a ser paga por cada tecnologia renovável e estabelecida no contrato.

europeus⁸ adotaram um sistema tarifário de “feed-in” com sucesso considerável. Muitas empresas, grandes e pequenas, também puderam gerar grande parte de sua própria eletricidade através de tecnologias renováveis no próprio local.

Em 2014, a participação da energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia na UE atingiu 16,0% (Figura 1.10).

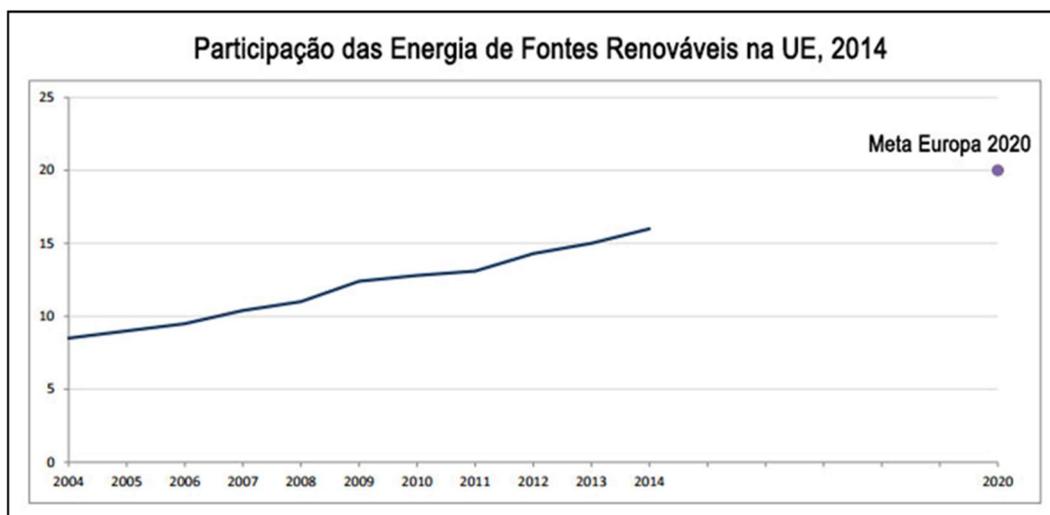


Figura 2.10 - Participação das Energia Renováveis na Europa, 2014.

Fonte: Comissão Europeia (2016) [12].

Cada Estado-Membro da UE tem o seu próprio objetivo dentro do objetivo global da Europa 2020 (Figura 1.11) [12a]. Os objetivos nacionais levam em consideração diferentes pontos de partida dos Estados-Membros, potencial de energia renovável e desempenho econômico. Dos 28 Estados-Membros da UE, um terço já atingiu o nível necessário para atingir os seus objetivos nacionais 2020: Bulgária, República Checa, Estónia, Croácia, Itália, Lituânia, Romênia, Finlândia e Suécia.

⁸ Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Checoslováquia, Dinamarca, Espanha, Estónia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Noruega, Portugal

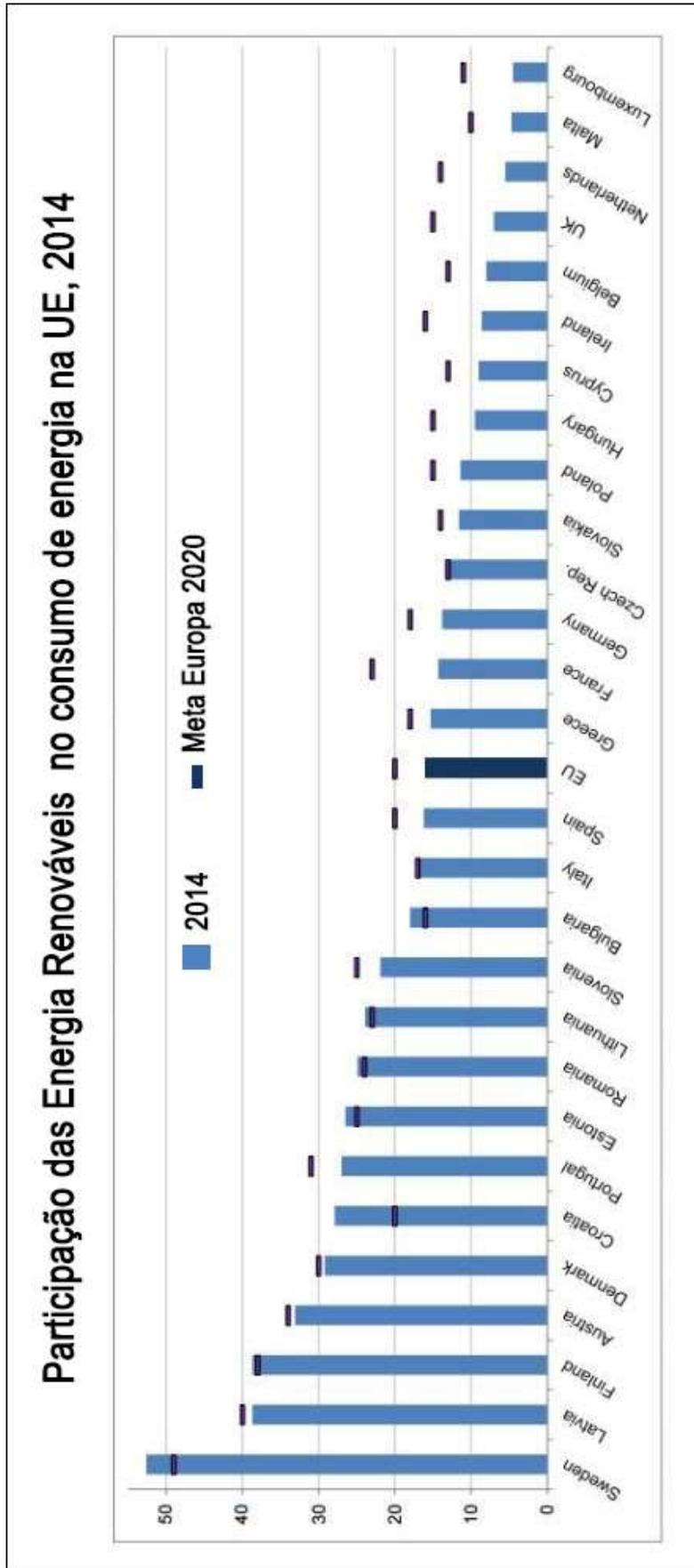


Figura 1.11 – Participação das Energia Renováveis no consumo de energia na UE, 2014
Fonte: Eurostat (2014)

Figura 2.11 - Participação das Energias Renováveis no consumo de energia na UE, 2014.
Fonte: Eurostat (2014) [12b]

Dentre os países que ainda estão muito longe de atingirem suas metas para 2020, está o Reino Unido. Como consequência foi desenvolvido um estudo em 2007 pela Dra. Brenda Boardman, do Oxford University's Environmental Change Institute (BOARDMAN, 2007) [13] para desenvolver uma estratégia de longo prazo até 2050 para chegar abaixo dos 20% de redução das emissões de carbono no setor doméstico. Com o resultado do estudo descobriu-se que cada casa precisaria de tecnologias renováveis instaladas para gerar eletricidade e/ou aquecimento, representando aproximadamente 25 milhões de instalações necessárias nos próximos 42 anos a uma taxa de 600 mil instalações por ano.

2.3. Contexto Energético Brasil

2.3.1. Necessidade de aperfeiçoamento da Matriz Energética

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2017 (EPE, 2017) [2a], a principal fonte na matriz elétrica brasileira são as usinas hidrelétricas com 68% de participação e que nos últimos anos tem se mostrado um fator de preocupação por causa da dependência hídrica perante aos desafios enfrentados pelas mudanças climáticas de redução de disponibilidade de recursos hídricos. A previsão de acordo com o Balanço Hídrico 2010-2040 (Martins, 2015) [14] é de aumento dos eventos de cheias e inundações na região Sul e de eventos de seca nas regiões Norte-Nordeste. Por causa dessa carência hídrica nas regiões Norte e Nordeste, o ciclo de geração hidrelétrica fica suscetível a flutuações do clima, com a vulnerabilidade do potencial hidrelétrico não ser capaz de atender a demanda futura, com consequências de aumento de tarifas, apagões e escassez hídrica e de energia. Um exemplo que pode ser dado em relação a este cenário refere-se ao evento ocorrido entre os anos de 2014 a 2016 face ao baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas voltados para o abastecimento humano no país. Foi necessário compensar a geração do sistema elétrico com as Termelétricas (Figura 1.12).

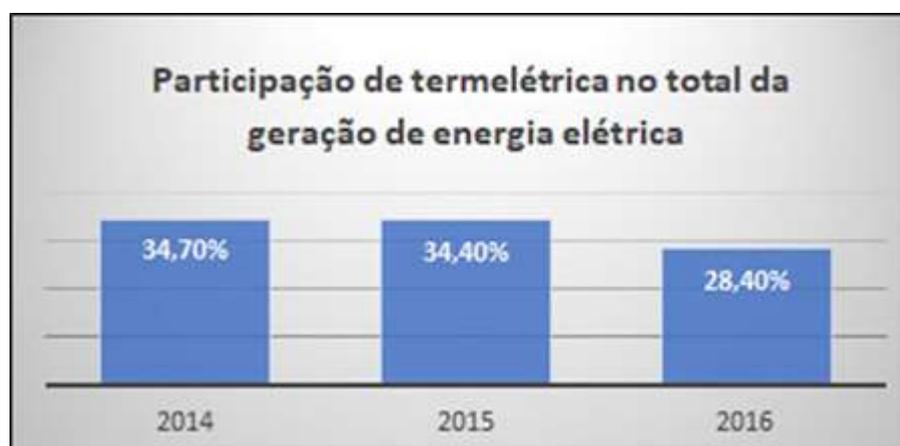


Figura 2.12 - Participação da geração termelétrica no total da geração de energia elétrica.
Fonte: EPE (2017) [2b]

Como consequência a ANEEL introduziu um sistema de três bandeiras tarifárias: verde, amarela e vermelha indicando se a energia custa mais ou menos, em função das condições de geração de eletricidade determinadas pelo nível de escassez dos reservatórios hídricos.

Além do aumento de custo das tarifas, houve o aumento das emissões de poluentes provenientes das termelétricas, devido à queima dos combustíveis fósseis. A Figura 1.13 mostra a queda da geração de energia em hidrelétricas e o aumento da geração em termelétricas. É possível notar que o crescimento da geração termelétrica se iniciou bem antes da crise dos reservatórios das hidrelétricas, iniciada em 2013.

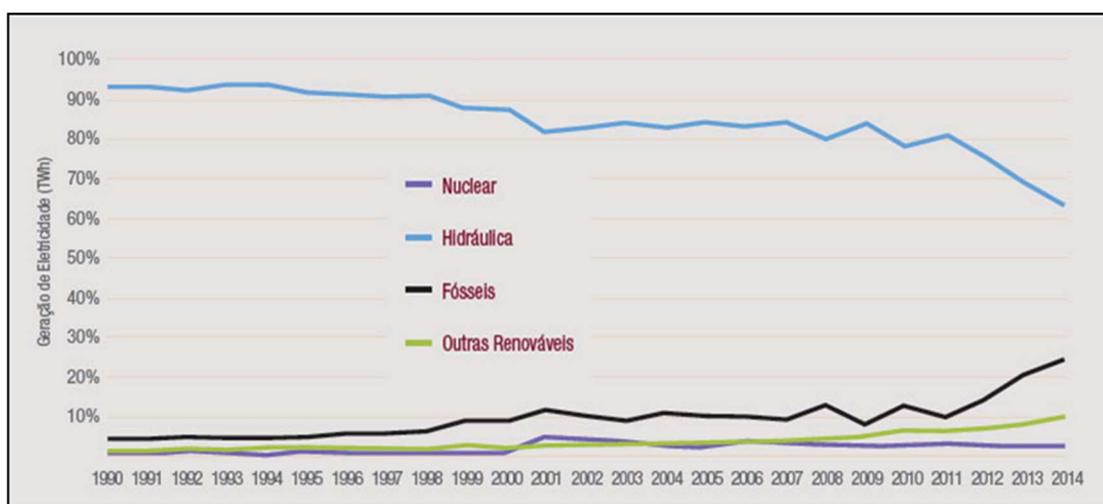


Figura 2.13 - Evolução da participação das fontes primárias na geração de energia elétrica (1990-2014).

Fonte: SEEG (2016) [15].

As emissões pela geração de energia elétrica mais que dobraram entre 2011 e 2014 saltando de 30,2 para 82,0 milhões de tCO_{2e}⁹ (Figura 1.14).

⁹ CO_{2e}. ou CO_{2eq}. significa “equivalente de dióxido de carbono”, uma medida internacionalmente padronizada de quantidade de gases de efeito estufa (GEE) como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano. A equivalência leva em conta o potencial de aquecimento global dos gases envolvidos e calcula quanto de CO₂ seria emitido se todos os GEEs fossem emitidos como esse gás. As emissões são medidas em toneladas métricas de CO_{2e} por ano, ou através de múltiplos como milhões de toneladas (MtCO_{2e}) ou bilhões de toneladas (GtCO_{2e}). O dióxido de carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas do GEE pelo seu potencial de aquecimento global. Por exemplo, o potencial de aquecimento global do gás metano é 21 vezes maior do que o potencial do CO₂. Então, diz-se que o CO₂ equivalente do metano é igual a 21.

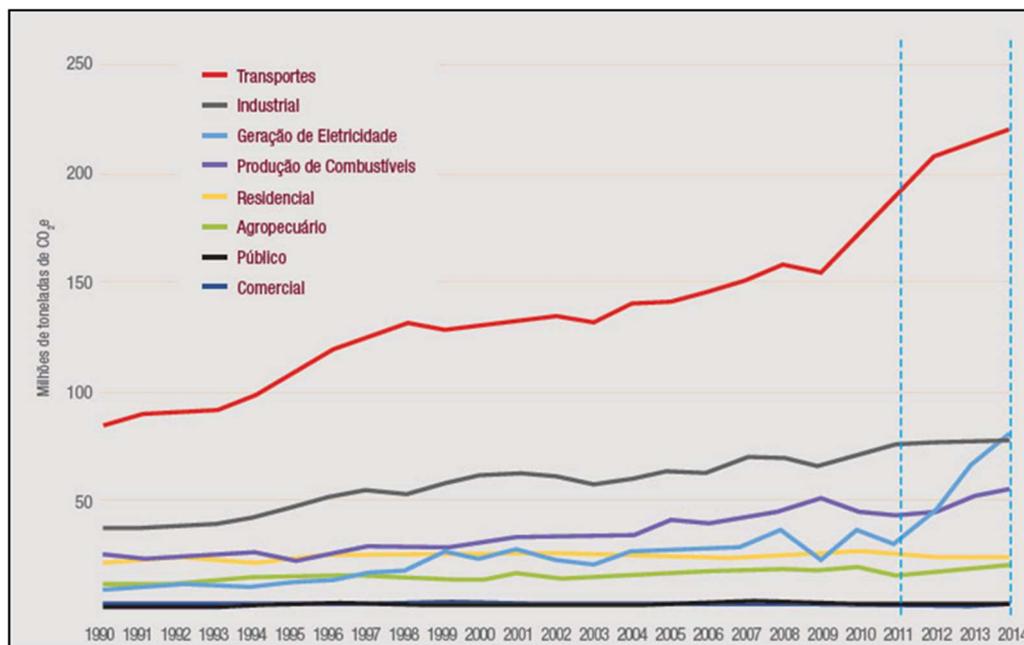


Figura 2.14 - Emissões de CO₂ do Setor de Energia por segmento de atividade (1990-2014).

Fonte: SEEG (2016) [15a].

2.3.2.

Compromisso Brasil na COP 21- Acordo de Paris em 2015

O Brasil juntamente a 195 países e mais a União Europeia, reuniram-se na COP 21 em Paris, na França (UNFCCC, 2015) [16], com o objetivo de alcançar um novo acordo global sobre o clima, que limite o aquecimento do planeta a 2 graus Celsius até 2100 (Figura 1.15).



Figura 2.15 - Redução da temperatura até o limite de 2° C.

Fonte: MMA (2016) [17]

Nessa oportunidade, o Brasil assume um importante papel de destaque, como o único país em desenvolvimento a se comprometer com a redução absoluta de emissões de gases de efeito estufa para conter o aquecimento global. Trata-se de um objetivo ousado e um avanço em relação ao compromisso assumido na COP 15 em 2009 (MMA,2011) [19], quando o País anunciou uma meta de redução, mas como base nas tendências de emissões futuras.

O compromisso assumido é de reduzir, as emissões de gases do efeito estufa, em 37% até 2025 e em 43%, até 2030 (Figura 1.16), ambos em comparação aos níveis de 2005. Para isso, o país pretende também zerar o desmatamento na Amazônia Legal e restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030, uma área equivalente ao território da Inglaterra.

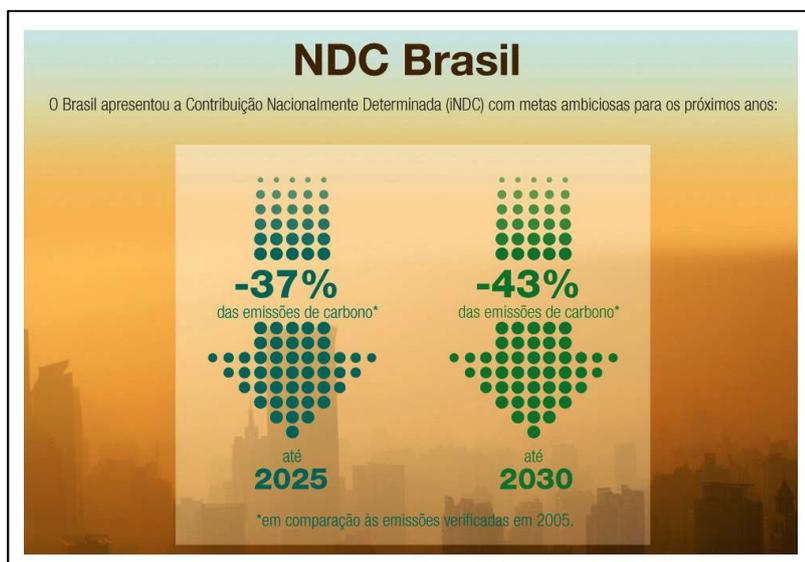


Figura 2.16 - Contribuição Nacionalmente Determinada.
Fonte: MMA(2016) [20]

A redução absoluta das emissões é exigida apenas das economias desenvolvidas, mas será perseguida voluntariamente pelo governo brasileiro em todos os setores da economia como Agropecuária, Energia, Indústria e Mudanças de Uso da Terra.

2.3.3. Expansão da Matriz Elétrica com geração própria a partir de fontes renováveis

A ANEEL desde 2012 vem aprimorando as regras de geração própria de eletricidade visando o aperfeiçoamento da matriz energética com o incremento e a diversificação de fontes de energia renováveis instituindo através das resoluções

normativas 482/2012 (ANEEL, 2012) [21] e 687/2015 (ANEEL,2015) [22], o marco regulatório de geração própria de energia como um vetor para desenvolvimento regional, com destaque para a utilização da energia solar fotovoltaica.

Com essas resoluções o Brasil dá um passo significativo rumo a medidas de redução das emissões de GEE. Consumidores da rede de energia elétrica passam a poder gerar sua própria energia por fontes renováveis, nas modalidades de micro e minigeração distribuída, de pequeno porte em residências, comércios e indústrias. Estas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Microgeração – Sistema gerador de energia elétrica através de fontes renováveis, com potência instalada inferior ou igual a 75 kW.
- Minigeração – Sistema gerador de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW (para fonte hídrica) e menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis (solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada).

Com isso o consumidor pode instalar pequenos geradores em sua unidade e trocar energia com a distribuidora local, num sistema de compensação. A compensação é realizada a partir da energia excedente injetada pelo micro ou minigerador na rede da distribuidora de energia, a qual gera créditos de energia equivalentes para serem utilizados na própria unidade consumidora por até 60 meses, ou usar esses créditos para compensar em outra unidade consumidora de mesma titularidade.

O sistema de compensação de créditos engloba também consórcios e cooperativas criadas com a finalidade de produção de energia, permitindo que a energia gerada possa ser compensada por todos os que integram o consórcio ou cooperativa, como condomínios, empresas com filiais e outras opções.

2.3.4. Geração Distribuída

Com base em dados oficiais da ANEEL e segundo levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a geração própria de energia no Brasil - chamada micro e minigeração distribuída - de sistemas solares fotovoltaicos instalados em residências, comércios, indústrias, prédios públicos e na zona rural já representam mais de 99% de instalações de microgeração e minigeração distribuída no País (Figura 1.17).

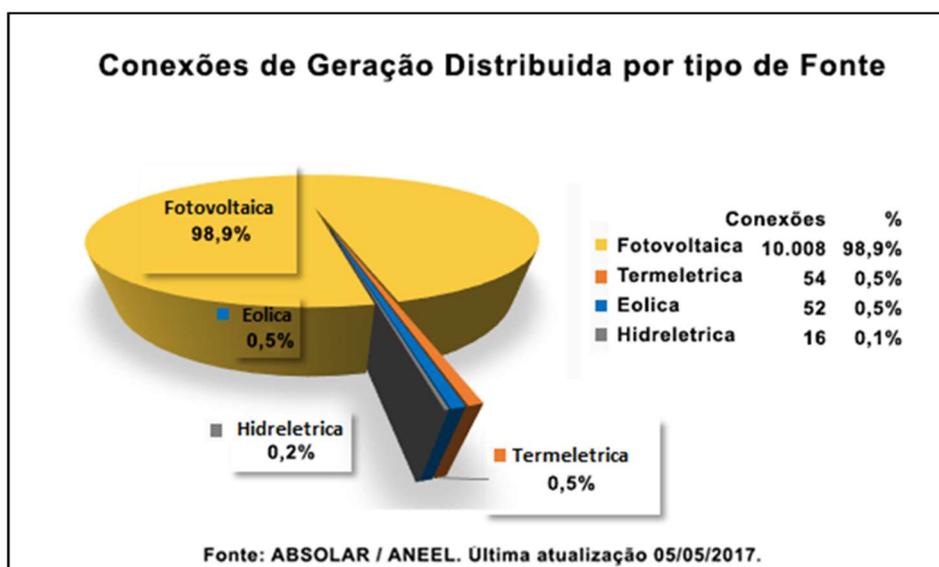


Figura 2.17 - Conexões de GD por tipo de fonte de geração.
Fonte: ANEEL (2017) [23].

Os 10.008 sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica geram créditos e beneficiam um total de 11.063 unidades consumidoras (Figura 1.18). Apesar desse número de sistemas fotovoltaicos instalados representar 99% das geração de energia distribuída, ainda é insignificante perante o potencial do território brasileiro. Por outro lado, demonstra a tendência de crescimento do mercado, o que já justificaria o investimento no setor da geração distribuída particularmente da tecnologia fotovoltaica contribuindo para acelerar o crescimento e desenvolvimento da economia do país.

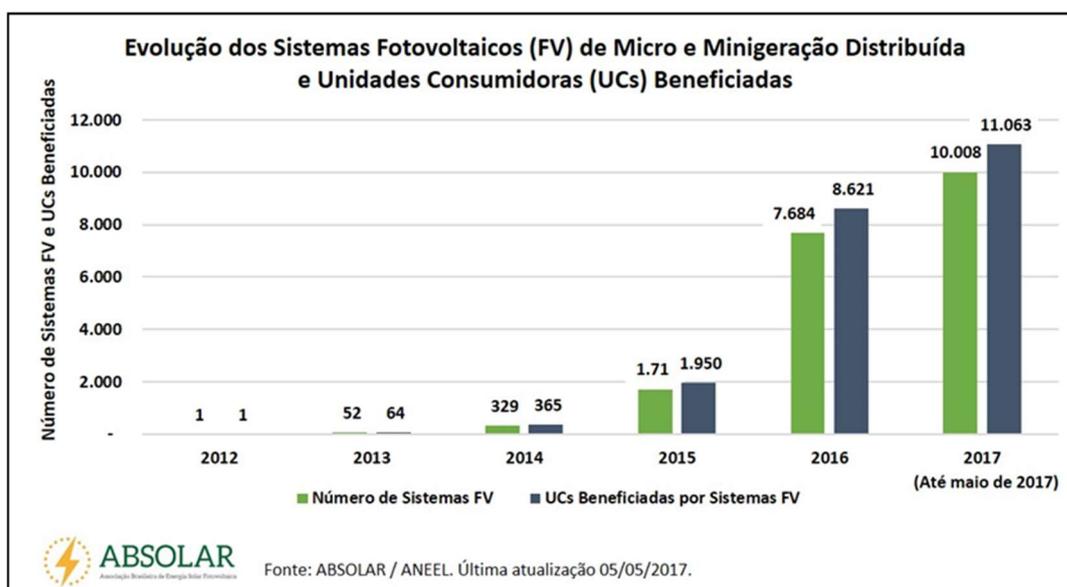


Figura 2.18 - Evolução dos Sistemas Fotovoltaicos de Micro e Mini geração Distribuída e Unidades Consumidoras Beneficiadas.
Fonte: ANEEL (2017) [23a].

Dentre as unidades consumidoras beneficiadas por sistemas solares fotovoltaicos, a maior parcela é de residências, que representam 78,2% do total, seguida de comércios (16,7%), indústrias (2,0%), consumidores rurais (1,7%) e outros tipos, como iluminação pública (0,1%), serviços públicos (0,2%) e consumidores do poder público (1,1%) (Figura 1.19).

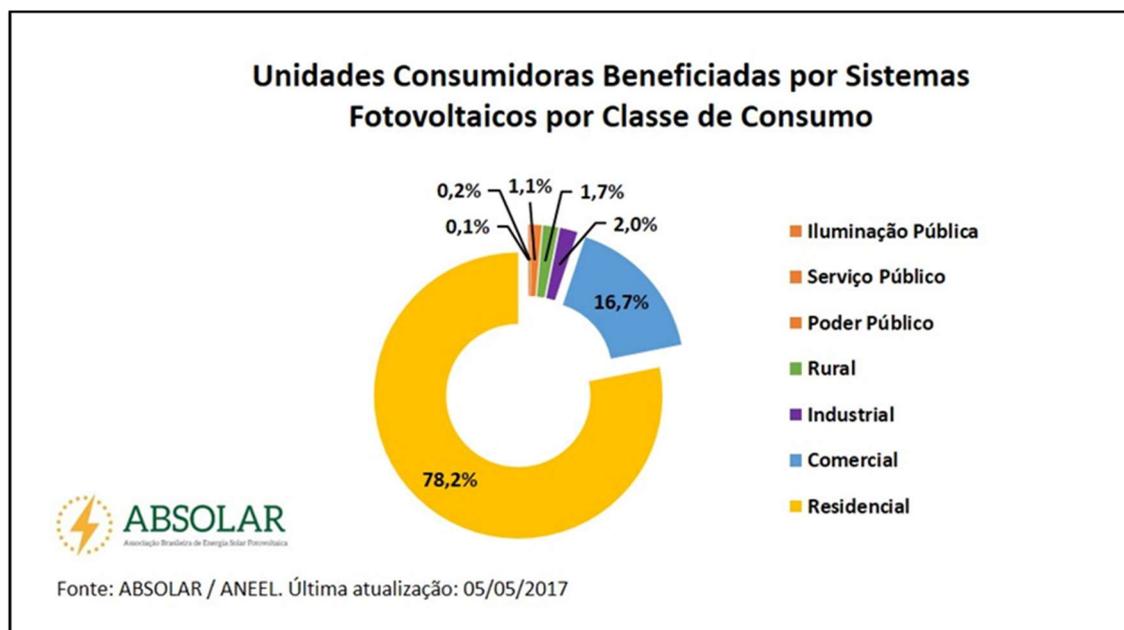


Figura 2.19 - Unidades Consumidoras Beneficiadas por Sistemas Fotovoltaicos por Classe de Consumo.
Fonte: ANEEL (2017) [23b].

Segundo o presidente da ABSOLAR, Dr. Rodrigo Sauaia (2017) [24], recentemente, a micro e minigeração distribuída atingiu a marca de 111 megawatts (MW) instalados, dos quais 77,6 MW são provenientes da fonte solar fotovoltaica, capaz de gerar energia elétrica suficiente para abastecer mais de 45 mil residências. Quanto ao potencial técnico da geração distribuída solar fotovoltaica, parcialmente mapeado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), representa mais de 164 GW (Sauaia, 2017) [25], quando se considera apenas os telhados de residências. Isso significa que, aproveitando os telhados de residências brasileiras com geração distribuída solar fotovoltaica, a energia elétrica gerada seria capaz de abastecer 2,3 vezes toda a demanda residencial do País. Isso demonstra o enorme potencial desta tecnologia renovável, limpa e de baixo impacto ambiental, que auxilia a reduzir os gastos de consumidores com energia elétrica, tem contribuído para reaquecer a economia do país e tem gerado empregos locais e de qualidade para a população.

“Se adicionarmos a estes cálculos os edifícios comerciais, industriais, públicos e rurais, o potencial técnico da geração distribuída solar fotovoltaica será multiplicado e crescerá diversas vezes. Ou seja, no que depender da fonte solar fotovoltaica, ainda temos muita oportunidade de redução de gastos, crescimento e desenvolvimento, com responsabilidade e sustentabilidade” (SAUAIA, 2017) [25a].

3. Conceitos Energéticos: uma fundamentação

3.1. Recurso Solar como Fonte de Energia Global

O Sol como fonte de energia é classificado como uma forma de energia renovável por ser praticamente inesgotável. Da liberação da energia solar derivam várias outras fontes energéticas existentes na Terra, como a eólica, hidráulica, ondas, biomassa e os combustíveis fósseis. A utilização da energia solar depende do tempo, da localização e das condições meteorológicas. É a energia mais abundante na Terra, com cerca de 885 milhões TWh (IEA, 2014a) [26] atingindo a superfície do planeta a cada ano. Esses valores conferem à fonte solar, considerando seus múltiplos usos (ver Figura 2.1), o maior potencial técnico de aproveitamento frente a outras fontes renováveis (IPCC, 2012) [28].

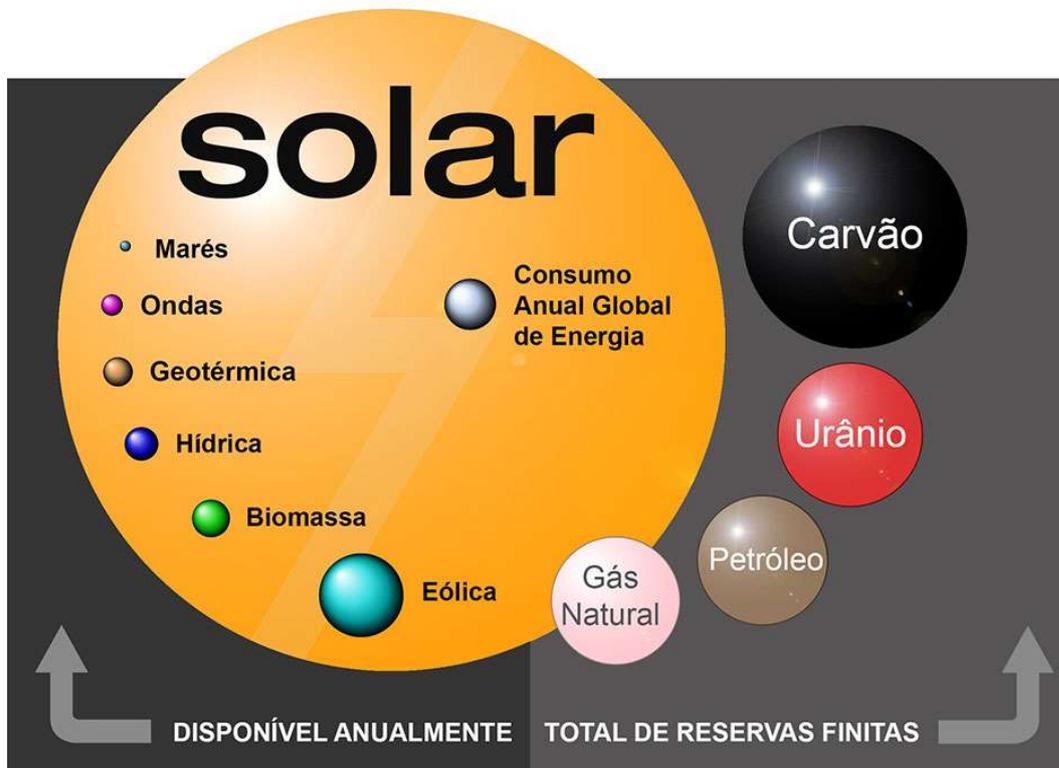


Figura 3.1 - Recursos de Energias Globais¹⁰.
Fonte: Adaptado de Perze et al. 2014 [29]

Desde o início do processo da civilização humana, a energia do Sol vem sendo utilizada através da agricultura e da pecuária, além de diversas outras maneiras de aproveitamento, como a iluminação e o calor, as mais evidentes para a população.

¹⁰ Comparativo das proporções entre as fontes de energias renováveis e as fontes de energias de reservas finitas. Para as energias renováveis, a quantidade de energia é exibida por ano, enquanto que para o gás natural, petróleo, urânio e carvão a reserva total é exibida.

3.2. Radiação Solar

O termo “radiação solar” é usado para designar, de forma genérica, a energia vinda do Sol e a “Irradiância solar” representa a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, medida em watt por metro quadrado (W/m^2). Diferentes áreas, recebem diferentes quantidades médias anuais de energia do sol.

A radiação solar ao atingir a superfície da Terra é decomposta em duas componentes, uma direta e outra difusa. No plano horizontal, a radiação global consiste na soma das componentes direta e difusa, enquanto que no plano inclinado, tem-se as parcelas refletida na superfície e nos elementos do entorno (Figura 2.2).

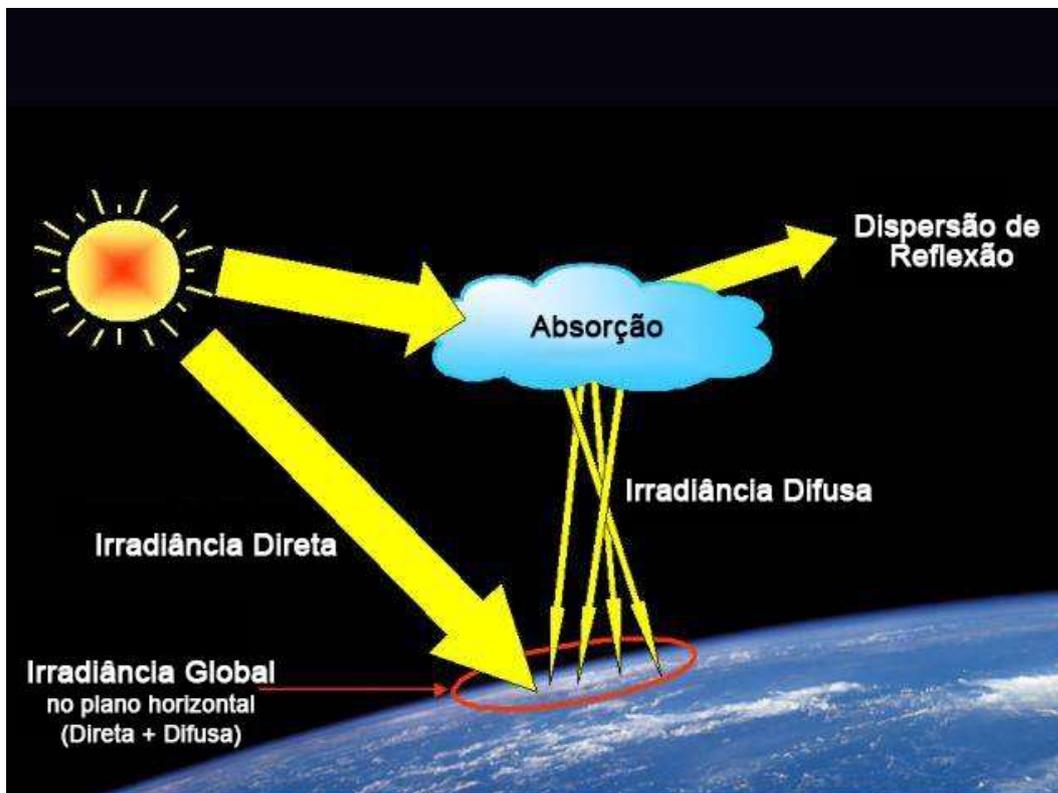


Figura 3.2 - Irradiação Solar Global.
Fonte: Adaptado de Cararta (2016) [30]

Para a geração de energia fotovoltaica a irradiação de maior interesse é a Irradiação Global Horizontal, que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela Irradiação Difusa Horizontal – parcela dispersa e atenuada por reflexões em nuvens, poeira, vapor d’água e outros elementos em suspensão na atmosfera - e pela Irradiação Direta Normal parcela que atinge o solo diretamente, sem reflexões. Em dias nublados, a principal parcela é a Difusa, enquanto que em dias claros prevalece a parcela Direta.

É interessante destacar que o recurso solar não pode ser considerado como constante dada sua variação ao longo do dia, do ano, e de acordo com a localidade. Grande parte destas variações se deve à geografia terrestre e seus movimentos astronômicos de rotação e translação, os quais possibilitam certa previsibilidade do recurso. No entanto, a estas variações somam-se aquelas causadas por fenômenos climáticos, como a formação de nuvens, as quais são mais difíceis de prever.

A Terra, ao realizar o movimento de translação determina um plano, denominado de plano da eclíptica, ou plano da órbita da Terra ao redor do Sol. O movimento de rotação, por sua vez, é realizado em torno de um eixo que possui uma inclinação fixa de $23,45^\circ$ em relação à perpendicular do plano da eclíptica. Esta inclinação ocasiona a mudança das estações ao longo do ano (Figura 2.3), com dias mais longos e o sol mais alto no céu entre os equinócios, nos meses de setembro e março no hemisfério sul.

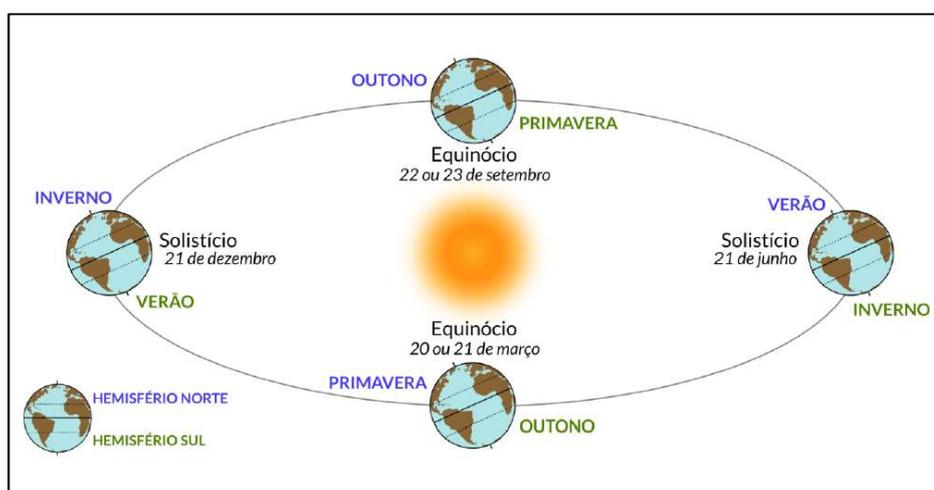


Figura 3.3 - Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol.

Fonte: PEREIRA (2007) [31].

Dadas as proporções entre o Sol e a Terra, é possível afirmar que os raios solares atingem a Terra paralelamente, e com uma intensidade praticamente constante numa superfície imaginária perpendicular aos raios, na borda da atmosfera terrestre. No entanto, nem toda superfície na Terra é perpendicular aos raios solares, o que diminui a insolação no plano horizontal. Conforme pode ser visto na Figura 2.4, a incidência solar que atinge as duas superfícies “A” e “B” é a mesma, porém quando o ângulo “ θ ” de incidência solar for maior do que zero (não perpendicular ao plano horizontal), a superfície “A” paralela à Terra será maior que sua projeção (superfície “B” hipotética) fazendo com que a taxa de energia solar por unidade de área (ou seja, a irradiância solar), caindo na superfície “A” seja menor do que na superfície B. Esse fenômeno é conhecido como efeito cosseno (STINE; GEYER, 2001) [32].

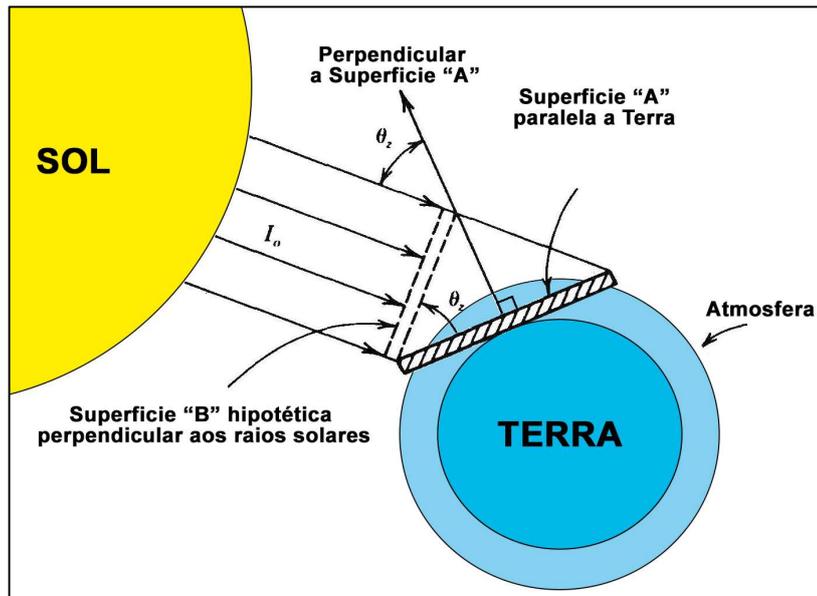


Figura 3.4 - Espalhamento dos raios solares em diferentes superfícies.

Fonte: Adaptado de STINE (2001) [32a]

A irradiância solar varia em função da posição terrestre e o ângulo de incidência dos raios solares (Figura 2.5). Regiões próximas à linha do equador apresentam menor variação da irradiação ao longo do ano, enquanto localidades em grandes latitudes apresentam os maiores valores de irradiação em meses do verão. Durante o inverno apresentam os menores valores, de modo que a energia anual total recebida é menor nas maiores latitudes.

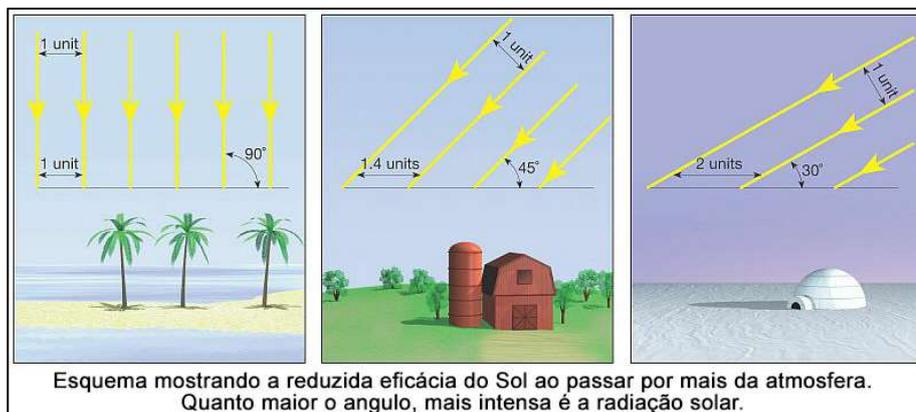


Figura 3.5 - Efeito da inclinação dos raios solares na radiação recebida por unidade de área.

Fonte: Adaptado de FLOOR, (2017) [33]

3.3. Otimização do aproveitamento Solar

O aproveitamento do recurso pode ser otimizado através da orientação dos painéis fotovoltaicos para coletar a luz solar. O ângulo que usualmente é considerado como ótimo é igual à latitude do local, que no caso do Brasil e dos países do hemisfério sul deve ser orientado ao norte, de forma que a superfície receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual, fazendo com que a variação da irradiação ao longo do ano seja atenuada, assim como maximizada a quantidade de energia incidente sobre tal superfície nesse período.

Embora considerado como ideal, o posicionamento em ângulo igual à latitude do local não é regra absoluta. Se for desejado maximizar a irradiação em determinada estação ou mês, é possível orientar os painéis ao ângulo que favoreça a aplicação.

Segundo PINHO (2014) [34], para áreas muito próximas ao equador, com latitudes entre -10° e $+10^\circ$, aconselha-se uma inclinação mínima de 10° , para evitar o acúmulo de sujeira e favorecer a autolimpeza dos módulos pela ação da água da chuva. Na determinação da inclinação ótima, há de se considerar também as condições climáticas locais. Em cidades com estações chuvosas bem demarcadas, o ângulo que fornece a maior energia em média anual é maior que a latitude, caso as chuvas ocorram majoritariamente no verão, e menor que a mesma, caso a estação úmida seja o inverno.

Outra maneira de maximizar a irradiação solar sobre uma superfície consiste em fazê-la seguir o movimento do Sol, através de mecanismos e estruturas de seguimento de um ou dois eixos (Figura 2.6). Essa alternativa é a mais usual em centrais fotovoltaicas, nas quais os módulos estão sobre o solo.

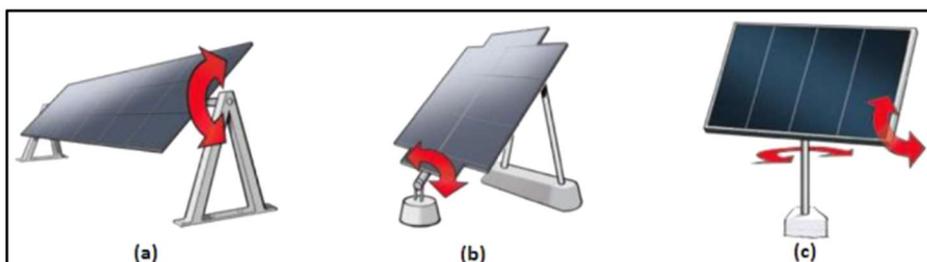


Figura 3.6 - Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos.

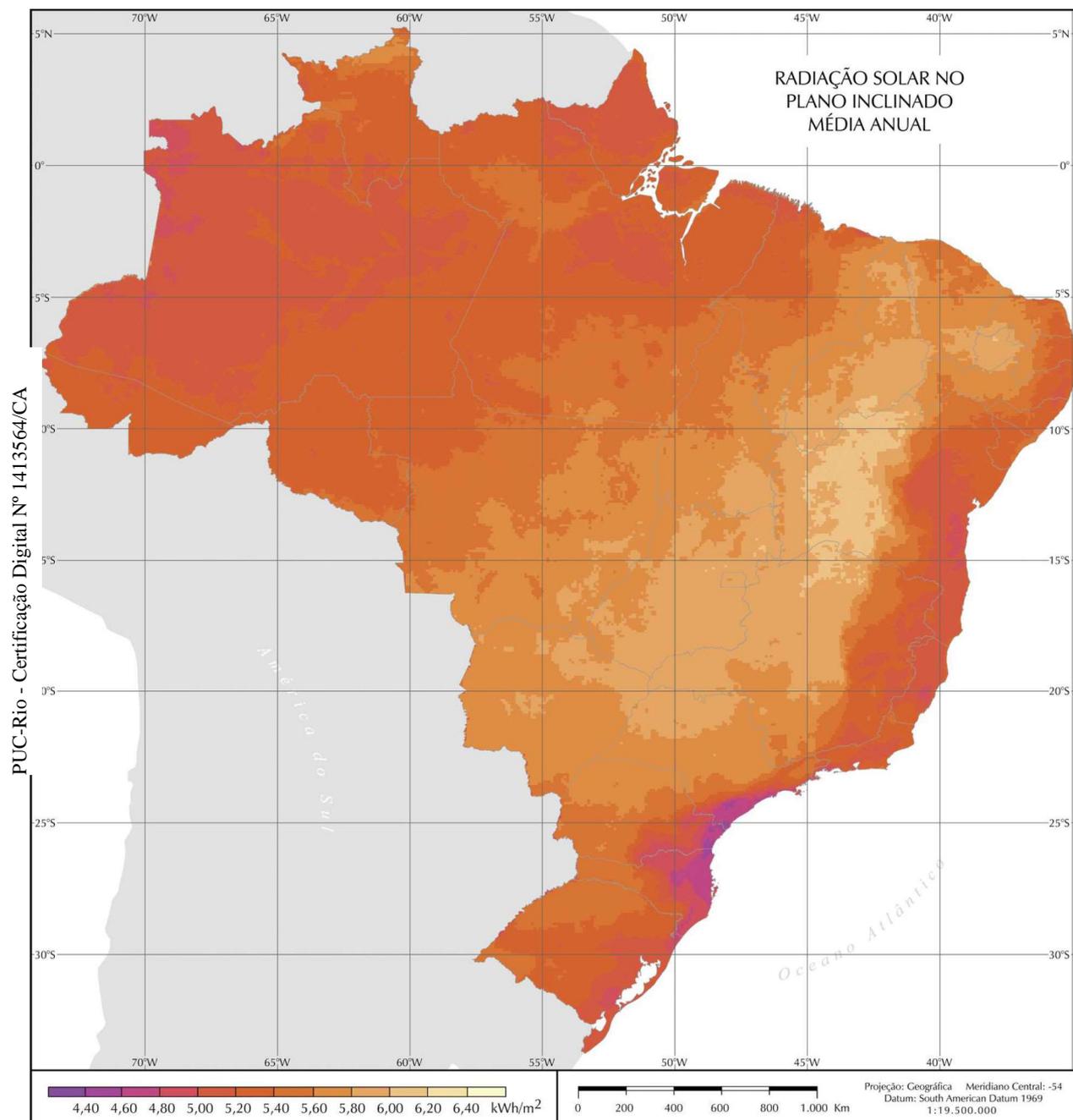
Fonte: Adaptado de Solar Trackers Blog [35]

3.4. Recurso Solar no Brasil

O Brasil está situado quase que totalmente na região limitada pelos Trópicos de Câncer e de Capricórnio, de incidência mais vertical dos raios solares.

Esta condição favorece elevados índices de incidência da radiação solar em quase todo o território nacional, inclusive durante o inverno, o que confere ao país condições vantajosas para o aproveitamento energético do recurso solar.

Adicionalmente, a localização próxima à linha do equador propicia uma baixa variabilidade durante o ano da radiação solar no Brasil. A Figura 2.7 apresenta os dados brasileiros de irradiação global no plano inclinado, adequado às aplicações fotovoltaicas e de aquecimento.



Fonte: INPE, LABSOLAR, PEREIRA (2006) [36].

O mapa apresentado ilustra as regiões onde a irradiação solar é maior no Brasil, indicando, inicialmente, as melhores áreas para o aproveitamento solar.

Figura 3.7- Mapa da irradiação solar no plano inclinado.

Analisando-se exclusivamente este fator, observa-se que o oeste da Bahia é dos lugares mais favoráveis, bem como o Vale do São Francisco, Piauí, Mato Grosso do Sul, leste de Goiás e oeste do Estado de São Paulo.

Considerando que a faixa de variação da irradiação global horizontal anual do Brasil seja de 1.500 a 2.200 kWh/m², praticamente todo território brasileiro é elegível à expansão do aproveitamento deste recurso. Como referência, a Alemanha, um dos países com maior capacidade instalada fotovoltaica, possui irradiação entre 900 e 1.250 kWh/m² (PEREIRA et al., 2006) [36a].

3.5. Conversão Direta da Radiação Solar em Energia Elétrica

O elemento principal para a conversão da radiação solar e geração em energia elétrica é a célula fotovoltaica. Porém, o aproveitamento em escala comercial desse tipo de energia se faz com o auxílio de outros componentes. Primeiramente, as células são agrupadas e revestidas para formar os módulos fotovoltaicos (Figura 2.8).

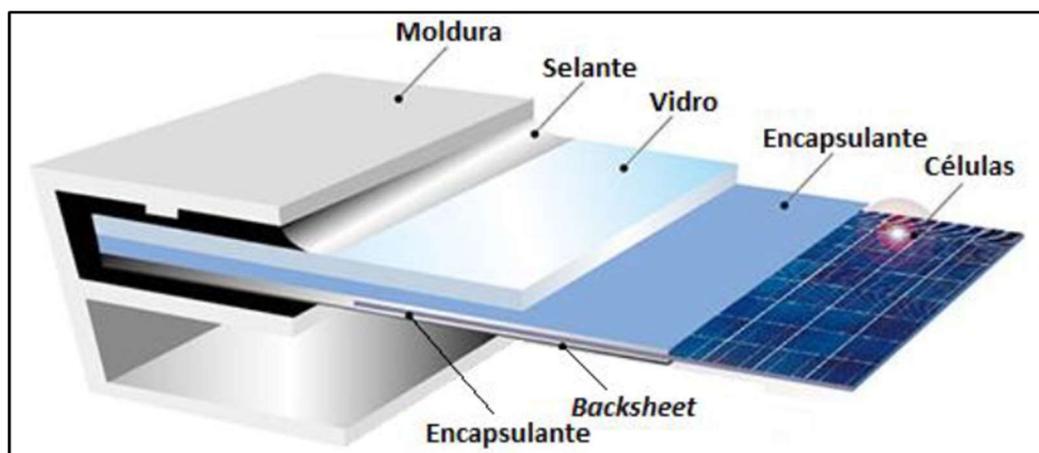


Figura 3.8 - Camadas de um módulo fotovoltaico típico.

Fonte: Adaptado de Ritek Green [37]

Os módulos então são associados em série e paralelo para formar os arranjos de geração com a tensão e a corrente desejadas. A geração é feita em corrente contínua (CC), portanto, geralmente é necessário o uso de um inversor para transformá-la em corrente alternada (CA), podendo assim ser utilizada normalmente em aplicações convencionais conectadas à rede. Em sistemas isolados (off-grid), além dos equipamentos citados, geralmente são utilizados baterias e controladores de carga para possibilitar o funcionamento do sistema. A Figura 2.9 ilustra essas informações.

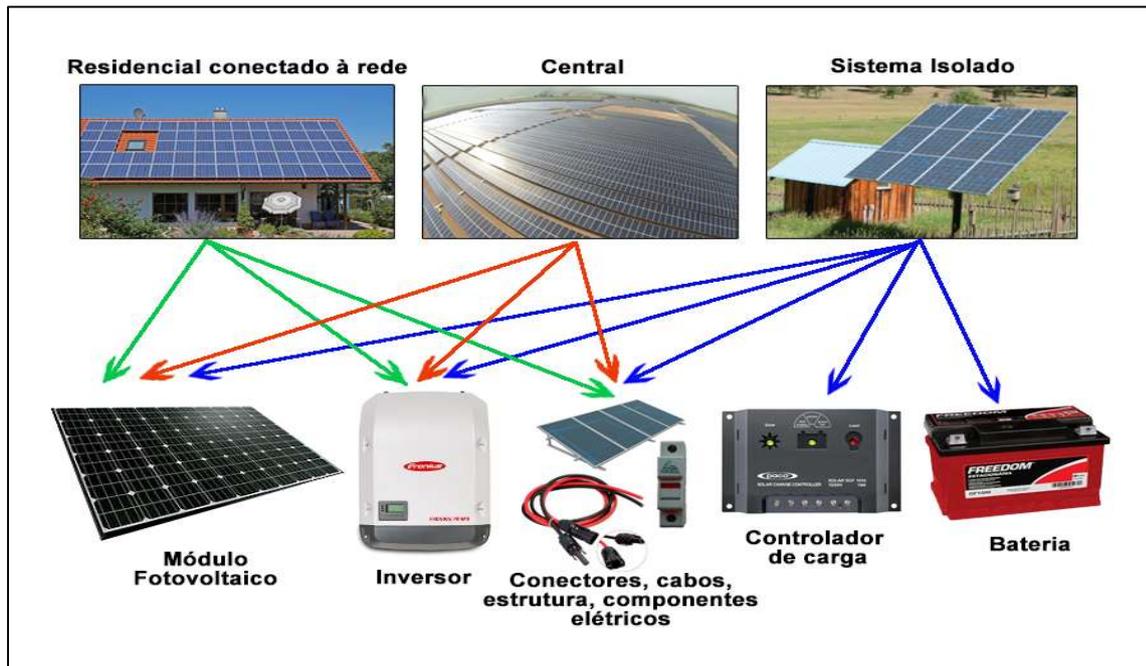
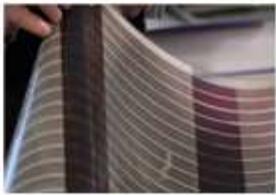


Figura 3.9 - Principais componentes por tipo de sistema fotovoltaico.
Fonte: Elaboração própria.

A radiação solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio de efeitos da radiação luminosa (efeito fotovoltaico) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar. Entre os materiais mais adequados para a conversão da radiação solar em energia elétrica, os quais são usualmente chamados de células solares ou fotovoltaicas, destaca-se o silício. A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. A primeira célula fotovoltaica de silício foi desenvolvida pela Bell Labs nos EUA durante a década de 1950 (Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2010) e teve uma eficiência de conversão de energia solar a energia elétrica de 4%, que é um limite que continuamente tem sido quebrado desde então (IEA, 2011) [38]. A maior eficiência alcançada até 2014 foi de 46%, medida em ambiente de laboratório (Fraunhofer ISE, 2014) [39].

As tecnologias fotovoltaicas podem ser classificadas como de primeira geração (silício mono e poli cristalino), segunda geração (silício amorfo e filme fino) ou terceira geração (concentrador fotovoltaico) conforme representado no Tabela 2.1 abaixo:

Tabela 3.1 - Classificação das células fotovoltaicas

Geração	Celulas Fotovoltaicas	Tecnologia
1 ^a	Silício Monocristalino (mc-Si) e silício Policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível.	 Monocristalina  Policristalina
2 ^a	Dividida em 3 cadeias produtivas: Silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Possui menor eficiência quando comparada a 1 ^a geração associadas à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células e, no caso do cádmio por ser tóxico.	
3 ^a	Dividida em 3 cadeias produtivas: célula multijunção e célula para concentração (CPV), células sensibilizadas por corante (DSSC) e células orgânicas ou poliméricas (OPV). A tecnologia CPV demonstrou um potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora com um custo ainda não competitivo com as tecnologias que dominam o mercado.	

Fonte: Adaptado de IEA (2011) [38a]

Os painéis solares comerciais, no entanto, têm eficiências mais baixas como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 3.2 - Eficiência máxima das tecnologias fotovoltaicas

	Cells	Efficiency %
Silicon	Si (crystalline)	25,6%
	Si (multicrystalline)	20,8%
	Si (thin film transfer)	21,2%
III-V Cells	GaAs (thin film)	28,8%
	GaAs (multicrystalline)	18,4%
	InP (crystalline)	22,1%
Thin film Chalcogenide	CIGS (cell)	20,5%
	CdTe (cell)	21,0%
Amorphous/Nanocrystalline Si	Si (amorphous)	10,2%
	Si (nanocrystalline)	11,4%
Photochemical	Dye sensitised	11,0%
Organic	Organic thin film	11,0%
Multijunction Devices	GaInP/GaInAs/Ge	37,9%
	a-Si/nc-Si/nc-Si (thin film)	13,4%
	a-Si/nc-Si (thin film cell)	12,7%

Fonte: Adaptado de Green et al. (2015) [40].

Os painéis solares fotovoltaicos são projetados e fabricados para serem utilizados em ambiente externo, sob sol, chuva e outros agentes climáticos, podendo operar, nessas condições, por um período de aproximadamente 30 anos.

3.6. Benefícios da Geração de Energia Elétrica por Fonte Solar

O principal benefício de se utilizar a geração de energia elétrica a partir do aproveitamento solar usando a tecnologia fotovoltaica é o baixo impacto socioambiental quando comparado com outras fontes que durante o processo de geração são responsáveis pela emissão de poluentes como NOx, SO₂, CO, e gases de efeito estufa como o CO₂, CH₄ e N₂O.

Com relação ao uso do solo, permite a sua implantação em variados locais, com aproveitamento de instalações existentes, em telhados, fachadas de edificações, e alta flexibilidade em relação a locais de instalação de usinas fotovoltaicas, porém com baixa interferência sobre a fauna e flora local, onde os impactos podem ser minimizados por meio de práticas adequadas de gestão de cada empreendimento.

Outro potencial especialmente importante é o da geração de empregos pelo grande número de regiões no Brasil com elevada irradiação solar e, portanto, com grande potencial de geração de energia criando oportunidade para geração de mão de obra especializada para posterior contratação desses técnicos para as obras de implantação. No âmbito nacional, considerando a cadeia completa de produção da indústria fotovoltaica, poderá também incrementar o desenvolvimento de um parque industrial na fabricação da tecnologia e componentes para atender não só ao mercado nacional, mas competir internacionalmente com a criação de uma cadeia de produção e serviços. Outro benefício de redução do impacto socioambiental em regiões isoladas é a utilização de sistemas fotovoltaicos descentralizados, promovendo a aceleração da eletrificação em regiões de difícil acesso e evitando obras de grande porte e investimentos para construção de novas linhas de transmissão e às perdas elétricas associadas (MME/EPE, 2015) [41].

3.7. Impactos da Geração de Energia Elétrica por Fonte Solar

A alteração da paisagem é o principal impacto decorrente da instalação de módulos fotovoltaicos para a geração de energia elétrica distribuída, já que os mesmos serão um elemento novo na paisagem, mas que pode ser mitigado por meio de soluções de arquitetura e design, e com a evolução tecnológica dos módulos.

Conforme REIS (2015), a cadeia de produção dos componentes do sistema fotovoltaico assume um papel importante principalmente no que diz respeito aos processos de transformação envolvendo o silício que é a tecnologia mais utilizada, que gera impactos socioambientais desde a fase de extração de matéria-prima até a geração de rejeitos, principalmente, além de possível poluição da água. Na fase de transformação em silício metalúrgico ocorre a emissão do pó da sílica gerado

durante essa etapa pode causar doenças pulmonares em humanos, gases tóxicos e de efeito estufa, chuva ácida e a geração de produtos acidificantes do meio.

Os módulos fotovoltaicos são produzidos com incorporações de metais pesados, os quais possuem resistência à biodegradação. Materiais bromados, com chumbo e cromo hexavalente, podem estar presentes na parte eletrônica dos sistemas de geração, podendo gerar danos significativos aos ecossistemas e aos seres humanos. Como medida de mitigação, devem ser adotadas práticas de mineração que visam à redução dos impactos socioambientais e o controle e descarte adequados dos subprodutos gerados (REIS, 2015) [42].

O descarte inadequado das baterias de chumbo-ácido utilizadas em sistemas fotovoltaicos isolados pode ocasionar impactos socioambientais, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente, principalmente devido à possível contaminação do solo e de águas subterrâneas. Como medidas de mitigação, destacam-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa, que estão dentre os princípios e instrumentos introduzidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) [43], devendo ser priorizados a reutilização e reciclagem. Novamente, cabe destacar que as usinas fotovoltaicas centralizadas geralmente não se utilizam de baterias, por estarem conectadas ao SIN¹¹. Ainda, a consolidação do “Net Metering”¹² no país estimula a conexão com a rede de distribuição na geração fotovoltaica distribuída, fato que reduz a necessidade de utilização de baterias.

¹¹ O SIN (Sistema Interligado Nacional) interconecta os sistemas elétricos nas 5 regiões do território nacional. Por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. Essa integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

¹² Net Metering ou Sistema de Compensação de Energia, surgiu como um sistema de incentivo às fontes de energia renovável. Esse sistema, permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro e minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente. Quando a energia injetada for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo na fatura dos meses subsequentes.

4. Potencial energético solar no Brasil: Procedimentos metodológicos

O presente estudo parte do cenário que irá simular o potencial de geração de energia dos domicílios brasileiros (casas e apartamentos) conectadas à rede elétrica do Sistema Interligado Nacional(SIN), como micro usinas de geração distribuída de energia elétrica proveniente de painéis solares fotovoltaicos instalados nos telhados e a resultante emissões de gases do efeito estufa evitadas.

Foram definidos 3 cenários de simulação com intervalo de 5 anos entre eles, representando os anos base onde a energia Fotovoltaica estaria sendo gerada nos telhados dos domicílios brasileiros em substituição a eletricidade gerada pelas usinas térmicas. Como as metas Brasil de redução das emissões dos GEE determinadas pelo acordo Global de Paris foram definidas baseadas nas emissões do ano de 2005, os cenários ano base de simulação serão dos anos 2006, 2011 e 2016 (Figura 3.1).



Figura 4.1 - Cenários Anos Base (2006, 2011 e 2016) de Simulação de Geração de Energia Fotovoltaica.

Fonte: Elaboração Própria

A determinação do potencial de energia solar fotovoltaica gerada baseia-se, conforme LANGE (2012) [44] e BERGAMASCO & ASINARI (2011) [45] , nos seguintes fatores:

- Níveis de irradiação solar no plano inclinado nas diversas regiões do território nacional (obtidos do Projeto SWERA do INPE);
- Domicílios (casas e apartamentos) conectados à rede elétrica no território nacional (censo demográfico do IBGE de 2010 tendo como unidade básica da análise o setor censitário¹³) ;

¹³ O setor censitário é a unidade territorial estabelecida para fins de controle cadastral, formado por área contínua, situada em um único quadro urbano ou rural, com dimensão e número de domicílios

- Área do telhado disponível;
- Área do telhado útil para geração de energia fotovoltaica;
- Eficiência de conversão do recurso solar em eletricidade.

A determinação das emissões evitadas de gases do efeito estufa, conforme a metodologia AMS-I.D [46] aprovada pelo comitê executivo do MDL14 para projetos de pequena escala (“Geração de energia renovável conectada à rede”) baseia-se nos seguintes fatores:

- Eletricidade anual gerada;
- Fatores de emissão de CO₂ para energias renováveis.

4.1. Sistema de Informação Geográfico

Levando em conta a não disponibilidade de informações das áreas das coberturas de domicílios (casas e prédios) na vasta extensão do território nacional, será utilizado como ferramenta um SIG¹⁵ para simular esse espaço geográfico virtual representativo dessas coberturas por camadas de informações que se cruzam espacialmente dentro de um mesmo sistema de referência geográfica (REGO, 2007) [48]. Utilizando-se deste aparato ferramental, portanto, será levado em conta o nível de irradiação solar nas localidades estaduais dos setores censitários dos domicílios conectados à rede elétrica e as áreas dos telhados com a respectiva área de aproveitamento da luz solar para geração de energia fotovoltaica.

4.2. Estimativa de domicílios integrados à rede elétrica

O universo de domicílios conectados à rede elétrica passíveis de adotarem a tecnologia fotovoltaica nos telhados será determinado tendo por base um banco de dados georeferenciados, através do software de SIG (ArcGIS 10.1), a partir dos dados da última pesquisa censitária do IBGE de 2010 [49], considerando a malha de setores censitários [50], por tipo e condição de ocupação de domicílios.

que permitam o levantamento por um recenseador. Assim sendo, cada recenseador procederá à coleta de informações tendo como meta a cobertura do setor censitário que lhe é designado.

¹⁴ O MDL é uma iniciativa estabelecida pelo Protocolo de Kyoto — acordo internacional assinado em 1997 — a fim de conceder créditos para projetos que reduzam ou evitem emissões nos países em desenvolvimento. Trata-se de um mecanismo de grande importância, pois funciona como um canal através do qual os governos e as corporações privadas transferem tecnologias limpas e promovem o desenvolvimento sustentável (FELIPETTO, 2007) [47]. Os créditos são obtidos na forma de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs).

¹⁵ Os SIGs “são sistemas automatizados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos. Esses dados representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la” (ARONOFF, 1989) [52]

O universo dos domicílios será definido pelas variáveis abaixo relacionadas conforme descritivo da “Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário” [51] (planilha Domicilio01_UF.xls da Base de Informações):

- V133 - Domicílios particulares permanentes do tipo casa com energia elétrica da companhia distribuidora.
- V172 - Domicílios particulares permanentes do tipo casa de vila ou em condomínio com energia elétrica de companhia distribuidora.
- V211 - Domicílios particulares permanentes do tipo apartamento com energia elétrica de companhia distribuidora.

4.3.

Determinação da Irradiação Solar por Estado e Setor censitário

Para esse estudo será utilizada a camada de Irradiação Solar no Plano Inclinado adaptado à latitude (Latitude Tilted Solar Radiation Model) que representa o melhor ângulo para a colocação de painéis fotovoltaicos. No caso do Brasil, superfícies com inclinação igual a latitude local voltada para o norte, recebem a maior quantidade de energia solar durante o ano e apresentam médias diárias anuais acima de 4,4 kWh/m² para todo o território nacional, chegando a valores acima de 6,0 kWh/m² nas regiões com maior nível de incidência solar anual (Figura 3.2).

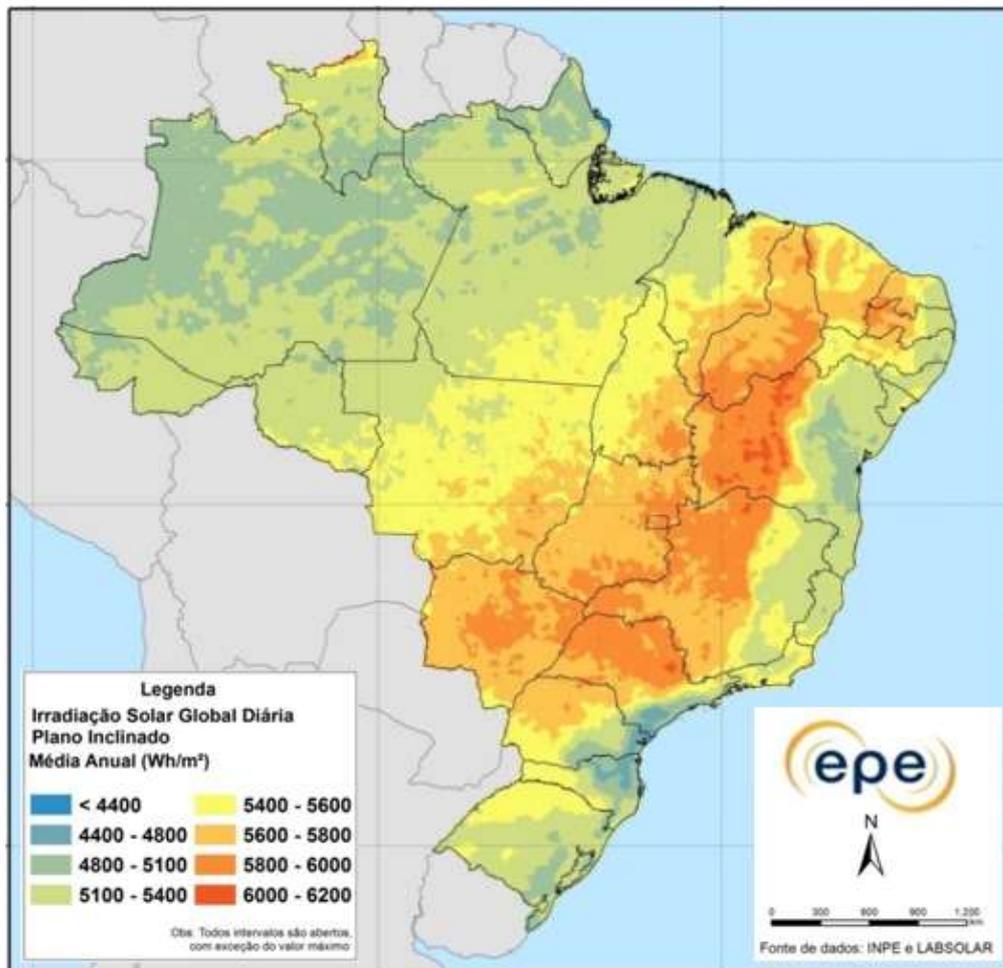


Figura 4.2 - Mapa de Irradiação Solar Global Diária no plano Inclinado incidindo sobre superfície com Inclinação igual à latitude do local.

Fonte: INPE, LABSOLAR, PEREIRA (2006) [36b].

Os dados de irradiação solar são obtidos a partir do site “Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – SONDA” (SONDA, 2007) [53]; ou consultados através da página de consulta aos bancos de dados do SWERA¹⁶ [54]. O SWERA também disponibiliza, em sua página principal [55], todos os mapas e bases de dados em formato de SIG, com informações para várias localidades do globo terrestre, e que podem ser baixados gratuitamente. Os dados compilados têm resolução espacial de 10 km x 10 km, baseados em um período de 10 anos (1995-2005), com três mapas de irradiação.

- Irradiação Solar Global Horizontal – mensal, sazonal e média anual.
- Irradiação Solar Difusa – mensal, sazonal e média anual.
- Irradiação Solar no Plano Inclinado – mensal, sazonal e média anual (camada utilizada para o presente estudo).

¹⁶ SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment – que pode ser traduzido como “Avaliação do Recurso Energético Solar e Eólico”

Com auxílio do software do Sistema de Informação Geográfica (ArcGIS 10.1) e do Software QGIS¹⁷ superpõe-se as informações da camada de Irradiação Solar no Plano Inclinado adaptado à latitude em formato de dados vetoriais (Swera.tif Bi Res WG84) com a camada dos domicílios residenciais de cada setor censitário de acordo com a posição geográfica.

Com a função estatística de rasterização do software QGIS determina-se a energia média de cada setor censitário que é atribuída à camada de domicílios residenciais do respectivo setor censitário. De posse da energia média de cada setor censitário, multiplica-se pela área útil de telhado para determinação do potencial de energia solar incidente sobre os telhados do setor censitário, sendo estes valores discutido a seguir.

4.4. Determinação da Cobertura Disponível e Área Útil dos Telhados

Para a determinação da área livre disponível para instalação dos painéis fotovoltaicos e da área útil de aproveitamento para geração da energia fotovoltaica a partir da irradiação solar recebida no telhado é necessário se determinar quais fatores podem reduzir ou até impedir a montagem da estrutura do sistema fotovoltaico tanto do ponto de vista físico ou por força de alguma legislação impeditiva. Fatores de sombreamento como construções vizinhas, caixas d'água, antenas, aparelhos de ar condicionado, sistemas de aquecimento instalados no telhado e para-raios podem obstruir ou reduzir a área onde os painéis fotovoltaicos são instalados. Como a área do telhado e os dados de redução da capacidade do sistema fotovoltaico são difíceis de serem coletados a nível nacional, adotou-se como área de cobertura disponível a estimativa baseada numa pesquisa realizada sobre 12 dos 26 estados no Brasil de acordo com o plano de solo (Figura 3.3), obtendo-se uma média ponderada de 81m² para a área de telhados de residências e 15m² para área de telhados por apartamento unitário, como usado por Ghisi et al em 2006 [56].

¹⁷ QGIS – Quantum Geographic Information System - é um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG) que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. QGIS provê integração com outros softwares para estender suas funcionalidades.

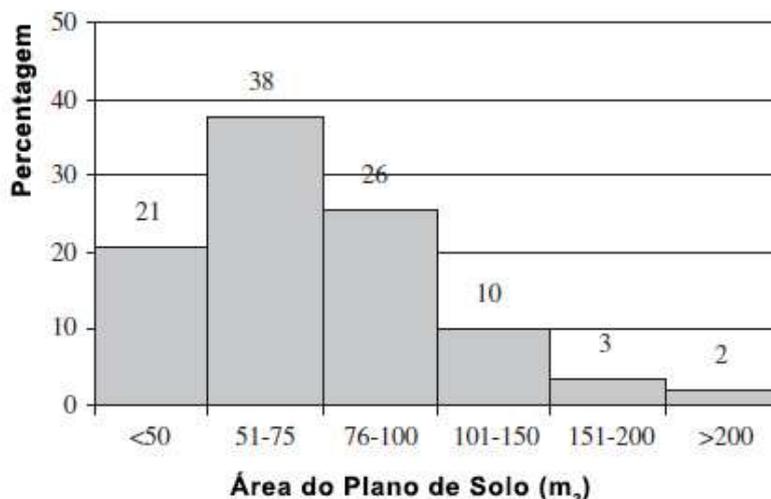


Figura 4.3 - Percentagem de residências de acordo com a variação de área do plano de solo.

Fonte: Eletrobrás (1998) [56a]

Como parâmetro da área útil adotou-se o valor conservador de 30% tomando-se como base a pesquisa de medições realizada em áreas urbanas solares em 5 países (Espanha, Suíça, Alemanha, Índia e Nova Zelândia) onde os fatores vão de 22% a 90% de área útil do telhado conforme apresentado na Tabela 3.1.

**Tabela 4.1- Fração de telhado disponível para aplicação de Painéis Fotovoltaicos
Iniciativa de Pesquisas de 5 países**

Local	Tipo de Edificação	Critério Usado	Método	Fração do telhado disponível	Referencias
Espanha	Prédios designados da área urbana	Sombreamento e outros usos	Inspeção humana	34%	[57] Izquierdo et al. (2008)
Alemanha	Prédios designados como “solares”	Sombreamento e outros usos	Estimativa	90%	[58] Lehmann, et al. (2003)
Suíça	Três áreas urbanas	Irradiação, fluxos de luz diurna, diagrama polar, fatores de visão do céu	Ray tracing simulations	95%	[59] Scartezzini, et al. (2002)
				73%	
				49%	[60] Montavon, et al. (2004)
Índia	Residências, hospitais, hotéis e casas de saúde	Sombreamento e outros usos	Inspeção humana	30%	[61] Pillai, et al. (2007)
Nova Zelândia	Cinco blocos residenciais	Fração da área do telhado dentro de 45 graus para o norte	Software GIS CITYGreen	30%	[62] Ghosh,t al. (2006)
				23%	
				30%	
				22%	
				47%	

Fonte: Elaboração própria

4.5. Atribuição do Fator de Eficiência na conversão Fotovoltaica

A eficiência de um painel solar fotovoltaico é o percentual com que ele pode converter a luz solar em energia elétrica. Os painéis solares disponíveis comercialmente aumentaram significativamente sua eficiência nos últimos anos, se aproximando do patamar de 30% conforme a Figura 3.4. Para esse estudo foi adotado o valor conservador de 20% de eficiência do painel.

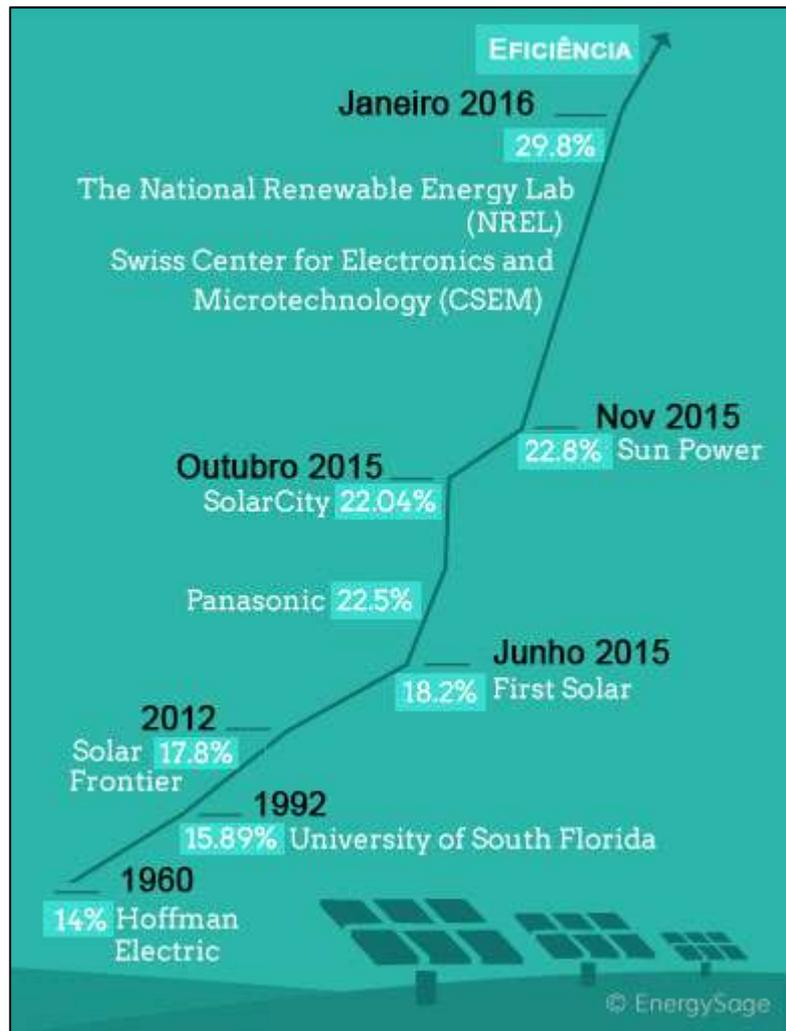


Figura 4.4 - Evolução da eficiência dos painéis solares.
Fonte: Adaptado de ENERGYSAGE (2017) [63].

No entanto para se determinar a eficiência de um sistema fotovoltaico como um todo, outros fatores de perda de eficiência devem ser levados em conta como perda por temperatura, perda por posicionamento dos painéis, perda na conversão de energia de corrente contínua para corrente alternada, perdas por resíduos nas placas, perdas de cabeamento entre outros e para efeito desse estudo será adotado o valor de 33% de perda de um sistema fotovoltaico conectado à rede como mostrado na Figura 3.5. Portanto o fator de eficiência é de 67% dos 20% da

conversão da energia incidente, em energia elétrica, ou seja, um fator final de 13,4%.

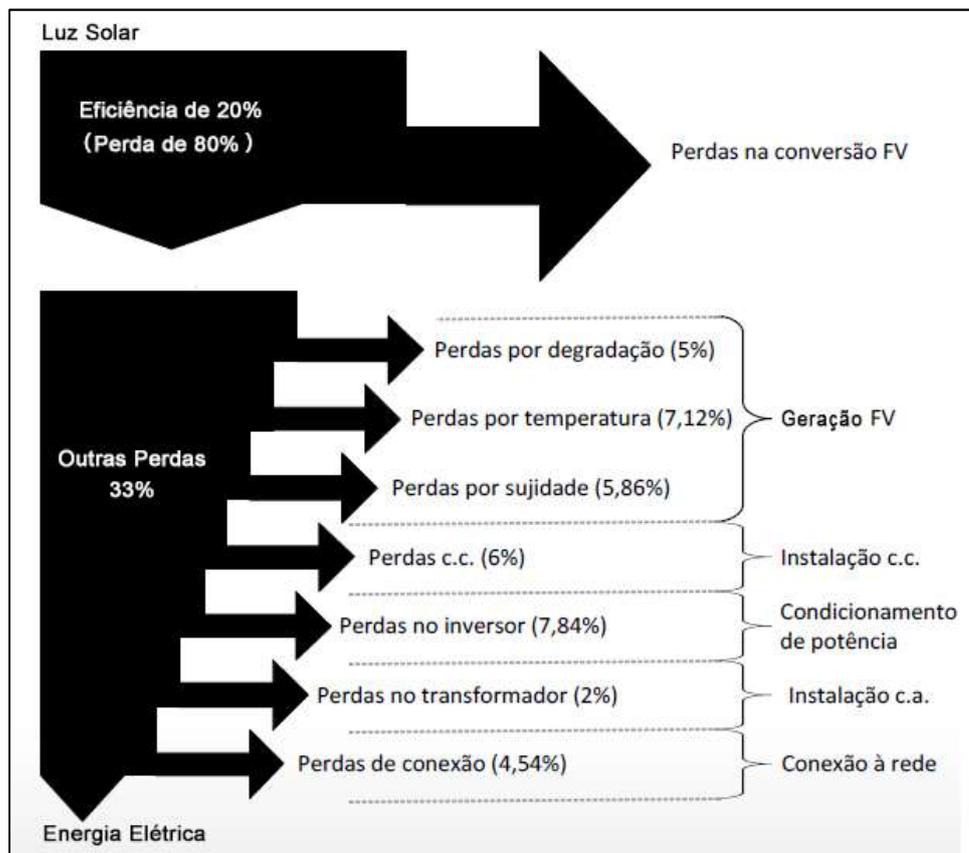


Figura 4.5 - Diagrama de Sankey de perdas de um sistema fotovoltaico conectado à rede.
Fonte: Adaptado de Kymakis, Kalyakis e Papazoglou (2009) [64].

4.6. Determinação do Fator de Emissão de CO₂ do sistema elétrico

Para o presente estudo foi adotada a metodologia AMS-I.D.[46a] desenvolvida no âmbito do MDL que se destina especificamente aos projetos que utilizam as fontes de energia renováveis, de pequena escala e conectadas à rede de energia. Segundo Batista (2007) [65] os projetos de pequena escala podem utilizar metodologias simplificadas e considerando nulas as emissões de projeto, devido à energia renovável ser uma fonte neutra de emissão, como também serão nulas as fugas, pois a tecnologia de energia renovável utilizada não será transferida de outra atividade. De acordo com a ferramenta metodológica aprovada pelo Conselho Executivo do MDL tem-se a equação 3.6.1 para estimar a contribuição em termos de redução de emissões de CO₂e de um projeto de MDL que gere eletricidade para a rede.

$$BEy = EGpj,y \times EFgrid,y \text{ (Eq.3.6.1)}$$

Onde:

BEy = Emissões da linha de base no ano y (tCO₂)

$EGpj,y$ = Quantidade líquida de eletricidade fornecida à rede elétrica como resultado da implementação da atividade de projeto de MDL no ano y (MWh)

$EFgrid,y$ = Fator de emissão de CO₂e da rede elétrica no ano y (tCO₂e/MWh).

O fator de emissão CO₂e deve ser calculado combinando uma margem operacional (OM¹⁸) e uma margem de construção (BM) de acordo com o procedimento descrito em “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema elétrico – Versão 6.0” (UNFCCC, 2016) [66];

$$EF\ grid,\ y = EF\ grid,\ OM,\ y \times W_{OM} + EF\ grid,\ BM,\ y \times W_{BM} \text{ (Eq.3.6.2)}$$

Onde:

$EF\ grid,\ OM,\ y$ = Fator de emissão de CO₂e da margem de operação no ano y (tCO₂e/MWh)

$EF\ grid,\ BM,\ y$ = Fator de emissão de CO₂e da margem de construção no ano y (tCO₂/MWh)

W_{OM} = Peso do fator de emissão da margem de operação para novos empreendimentos de energia renováveis (%)

W_{BM} = Peso do fator de emissão para margem de construção para novos empreendimentos de energia renováveis (%)

Os fatores de emissão de CO₂e das margens de operação e construção são disponibilizados pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2016) [67]. Com relação aos pesos do fator de emissão dos respectivos fatores de emissão, a “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema elétrico - Versão 6.0” determina que para os projetos de energia eólica e solar, os pesos padrão sejam os seguintes: $W_{OM} = 0,75$ e $W_{BM} = 0,25$, em razão da sua natureza intermitente (UNFCCC, 2016) [66a].

De forma resumida, o fator de emissão de CO₂e é uma combinação do fator da margem de operação com o fator da margem de construção que são fornecidos em base anual pelo MCTI. É um algoritmo amplamente utilizado para quantificar a contribuição futura de uma usina que vai gerar energia elétrica para a rede em termos de redução de emissões de CO₂ em relação a um cenário de base.

Para esse estudo adotou-se o ano de 2016, ano dos últimos fatores de emissão divulgado pelo MCTI¹⁹, como cenário principal para quantificar a

¹⁸ OM sigla do inglês “Operation Margin” representa a margem de operação do Sistema Integrado Nacional de Energia Elétrica e BM sigla inglês “Build Margin” que representa a margem de construção do Sistema Integrado Nacional de Energia Elétrica.

¹⁹ Os fatores de emissão de CO₂e de 2017 serão divulgados no início do ano 2018.

contribuição futura em termos de redução de emissões de CO₂ da energia fotovoltaica gerada.

Adicionalmente, para efeitos comparativos de cenários, será quantificada a contribuição futura em termos de redução de emissões, se a geração de energia fotovoltaica ocorresse nos anos 2006 e 2011. No entanto, cabe ressaltar que nesse estudo não se considerou o acompanhamento da dinâmica dos domicílios para os respectivos cenários, tendo sido considerado unicamente os dados dos domicílios do último censo do IBGE de 2010.

4.6.1.

Fator de Emissão de CO₂e anual – Ano Base 2016

Na Tabela 3.2 abaixo estão os fatores de emissão da Margem de Operação e da Margem de Construção fornecidos pelo MCTI referentes às emissões observadas no ano de 2016:

Tabela 4.2 - Dados da Margem de Construção e da Margem de Operação – Ano de 2016

Fator de Emissão Médio Anual da Margem de Construção (tCO ₂ /MWh)											
<i>Ef_{grid}</i> , BM = 0,1581											
Fator de Emissão Médio Anual da Margem de Operação (tCO ₂ e/MWh)											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0,5953	0,6032	0,6281	0,6291	0,6356	0,6368	0,6288	0,6344	0,6402	0,618	0,6217	0,6022
<i>Ef_{grid}</i> , OM = 0,6228											

Fonte: Elaboração própria a partir do MCTI (2016) [67b].

Substituindo-se esses valores dos fatores de emissão Médio Anual da Margem de Construção e da Margem de Operação ponderadas pelos respectivos fatores de 0,25 e 0,75 na equação 3.6.2 obtém-se o seguinte fator de emissão elétrico anual:

$$EF_{grid,2016} = 0,6228 \times 0,75 + 0,1581 \times 0,25 = 0,5066 \text{ tCO}_2/\text{MWh}.$$

4.6.2.

Fator de Emissão de CO₂e anual – Ano Base 2011

Na Tabela 3.3 abaixo estão os fatores de emissão da Margem de Operação e da Margem de Construção fornecidos pelo MCTI referentes as emissões observadas no ano de 2011:

Tabela 4.3 - Dados da Margem de Construção e da Margem de Operação - Ano de 2011

Fator de Emissão Médio Anual da Margem de Construção (tCO ₂ /MWh)											
<i>Ef grid, BM = 0,1056</i>											
Fator de Emissão Médio Anual da Margem de Operação (tCO ₂ e/MWh)											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0,2621	0,2876	0,2076	0,1977	0,2698	0,341	0,3076	0,3009	0,2734	0,35	0,3565	0,3495
<i>Ef grid, OM = 0,2920</i>											

Fonte: Elaboração própria a partir do MCTI (2016) [67a].

Substituindo-se esses valores dos fatores de emissão Médio Anual da Margem de Construção e da Margem de Operação ponderadas pelos respectivos fatores de 0,25 e 0,75 na equação 3.6.2 obtém-se o seguinte fator de emissão elétrico anual:

$$EF_{grid,2011} = 0,2920 \times 0,75 + 0,1056 \times 0,25 = \mathbf{0,2454 \text{ tCO}_2/\text{MWh.}}$$

4.6.3.

Fator de Emissão de CO₂e anual – Ano Base 2006

Na Tabela 3.4 abaixo estão os fatores de emissão da Margem de Operação e da Margem de Construção fornecidos pelo MCTI referentes as emissões observadas no ano de 2006:

Tabela 4.4 - Dados da Margem de Construção e da Margem de Operação - Ano de 2006

Fator de Emissão Médio Anual da Margem de Construção (tCO ₂ /MWh)											
<i>Ef grid, BM = 0,0814</i>											
Fator de Emissão Médio Anual da Margem de Operação (tCO ₂ e/MWh)											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0,3218	0,3462	0,3373	0,2752	0,3173	0,3058	0,3507	0,336	0,3834	0,36	0,2651	0,2802
<i>Ef grid, OM = 0,3232</i>											

Fonte: Elaboração própria a partir do MCTI (2016) [67c].

Substituindo-se esses valores dos fatores de emissão Médio Anual da Margem de Construção e da Margem de Operação ponderadas pelos respectivos fatores de 0,25 e 0,75 na equação 3.6.2 obtém-se o seguinte fator de emissão elétrico anual:

$$EF_{grid,2006} = 0,3232 \times 0,75 + 0,0814 \times 0,25 = \mathbf{0,2628 \text{ tCO}_2/\text{MWh.}}$$

4.7. Procedimentos Metodológicos Aplicados

A Figura 3.6 abaixo, resume de forma simplificada o esquema dos procedimentos metodológicos aplicados:

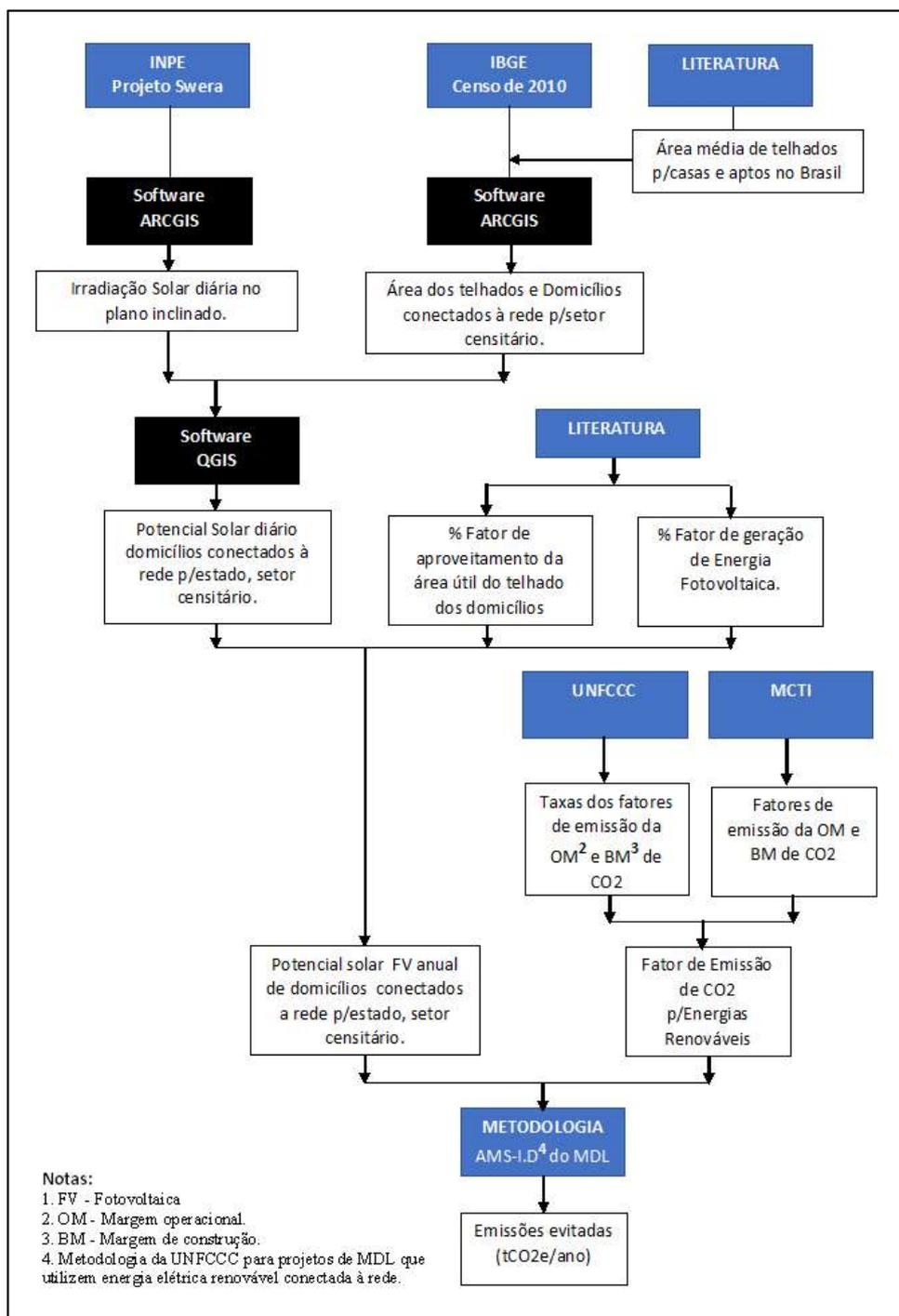


Figura 4.6 - Metodologia de estimativa de potencial fotovoltaica nos domicílios e quantificação da redução de emissão dos Gases do Efeito Estufa.

Fonte: Elaboração Própria.

4.7.1. Premissas Adotadas

Juntamente com os procedimentos metodológicos adotados, estão relacionados abaixo de forma consolidada as premissas e parâmetros adotados nesse estudo:

1. Universo Gerador de Potencial Solar
 - Considera o território brasileiro como universo gerador de energia solar constituído de residências e prédios de apartamentos conectados à rede elétrica com base nos dados do censo do IBGE de 2010.
2. Premissas de Cálculo do Potencial de Energia Solar
 - Os dados do universo dos domicílios conectados à rede elétrica foram tratados de forma homogênea em nível nacional sem atribuição de peso por localização.
 - O potencial solar incidente sobre os telhados foi calculado por setor censitário correlacionando as camadas de dados de energia por setor censitário obtidos do INPE, com os dados dos domicílios conectados a rede elétrica por setor censitário segundo o censo do IBGE de 2010 e multiplicando-se o potencial solar médio do setor censitário pelo total de área útil dos telhados.
3. Parâmetros para Cálculo do Potencial de Energia Solar
 - Residenciais: 81m² e Apartamentos: 15m² (Ghisi et al., 2006)
 - Conversão de Área Útil – 30% (Izquierdo et al, 2008); (Lehmann et al, 2003); (Scartezzini et al, 2002) ; (Mortavon et al, 2004); (Pillai et al, 2007); (Ghosh et al, 2006).
4. Parâmetros para Cálculo da Energia Fotovoltaica
 - Fator de conversão de Energia Fotovoltaica (FC)
→ 20% de Conversão Fotovoltaica (Energysage, 2017)
 - Fator de Perda (FP)
→ 33% de Perdas (Kymakis et al. , 2009)
 - Fator de Eficiência Fotovoltaica (FEF)
→ 13,4% (FEF= FC x 100-FP)

5. Dos resultados potenciais: os diferentes cenários na implementação da energia fotovoltaica no Brasil

5.1. Geração de Energia Fotovoltaica

De acordo com a Tabela 4.1 tem-se o potencial de geração de energia fotovoltaica anual nos telhados dos domicílios (casas e apartamentos) conectados à rede elétrica, por estado.

Tabela 5.1- Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica em Domicílios Conectados à Rede por Estado

Total de Domicílios Conectados a Rede									
ESTADO	No. De Domicílios	Area Telhados Domicílios (km2)	Potencial Solar Diário (MWh) s/100% da Área do Telhado	Fator de área Útil do Telhado	Potencial Solar Diário (MWh) s/Área Útil do Telhado	Fator de Conversão p/ Energia Fotovoltaica	Potencial Solar FV Diário (MWh)	Potencial Solar FV Anual (MWh)	Potencial Solar FV Anual (GWh)
Acre	173.293	13	68.610	30%	20.583	13,4%	2.758	1.006.708	1.007
Alagoas	822.850	64	340.839	30%	102.252	13,4%	13.702	5.001.127	5.001
Amapá	147.033	11	59.725	30%	17.918	13,4%	2.401	876.349	876
Amazonas	683.571	52	260.118	30%	78.035	13,4%	10.457	3.816.715	3.817
Bahia	3.873.192	296	1.544.100	30%	463.230	13,4%	62.073	22.656.580	22.657
Ceará	2.314.669	177	977.831	30%	293.349	13,4%	39.309	14.347.713	14.348
DF	750.422	48	276.967	30%	83.090	13,4%	11.134	4.063.931	4.064
Espirito Santo	1.086.080	78	412.273	30%	123.682	13,4%	16.573	6.049.287	6.049
Goiás	1.842.421	142	815.611	30%	244.683	13,4%	32.788	11.967.466	11.967
Maranhão	1.569.300	125	677.639	30%	203.292	13,4%	27.241	9.943.002	9.943
Mato Grosso	875.962	69	379.152	30%	113.746	13,4%	15.242	5.563.302	5.563
Mato Grosso Sul	740.709	58	337.105	30%	101.132	13,4%	13.552	4.946.345	4.946
Minas Gerais	5.929.828	442	2.479.158	30%	743.747	13,4%	99.662	36.376.683	36.377
Pará	977.552	75	394.812	30%	118.443	13,4%	15.871	5.793.071	5.793
Paraíba	1.066.141	82	444.138	30%	133.241	13,4%	17.854	6.516.831	6.517
Paraná	3.259.159	244	1.319.336	30%	395.801	13,4%	53.037	19.358.621	19.359
Pernambuco	2.500.797	188	992.142	30%	297.643	13,4%	39.884	14.557.700	14.558
Piauí	781.499	62	354.600	30%	106.380	13,4%	14.255	5.203.048	5.203
Rio de Janeiro	5.133.861	346	1.893.903	30%	568.171	13,4%	76.135	27.789.240	27.789
Rio Gde do Norte	885.796	69	363.120	30%	108.936	13,4%	14.597	5.328.066	5.328
Rio Gde do Sul	3.552.677	253	1.326.616	30%	397.985	13,4%	53.330	19.465.432	19.465
Rondonia	436.726	34	176.998	30%	53.099	13,4%	7.115	2.597.096	2.597
Roraima	103.030	8	40.510	30%	12.153	13,4%	1.628	594.398	594
Santa Catarina	1.968.720	142	720.074	30%	216.022	13,4%	28.947	10.565.647	10.566
São Paulo	9.118.498	684	3.777.720	30%	1.133.316	13,4%	151.864	55.430.489	55.430
Sergipe	580.935	44	239.305	30%	71.792	13,4%	9.620	3.511.328	3.511
Tocantins	369.080	30	164.330	30%	49.299	13,4%	6.606	2.411.215	2.411
BRASIL	51.543.801	3.836	20.836.733		6.251.020		837.637	305.737.390	305.737

Fonte: Elaboração própria

O potencial total Brasil de 305.737 GW/ano obtido de geração de energia fotovoltaica, se comparado ao consumo de energia do segmento residencial dos anos 2010 e 2011 após o censo de 2010, representa mais do que o dobro do consumo dos domicílios (Tabela 4.2), ficando clara a vocação do Brasil ser um forte gerador de energia renovável de fonte solar com a inserção massiva de microgeração distribuída de energia fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. Outros fatores irão contribuir para o aumento desse potencial com a evolução da tecnologia que ano a ano aumenta a eficiência de conversão e com o crescimento de domicílios também aumentam as áreas de captação de energia solar.

Tabela 5.2 - Relação entre Potencial Fotovoltaica no Brasil x Consumo de Energia

ANO de CONSUMO	No. De Domicilios	Área Telhados (km ²)	Consumo Residencial Anual (GWh)	Potencial Solar Foto-voltaico Anual (GWh)	Potencial Foto-voltaico/Consumo (%)
2010	51.543.801	3.836	107.215	305.737	285%
2011			111.971		273%

Fonte: Elaboração própria

5.2.

Cálculo das Emissões Evitadas de Gases do Efeito Estufa

As emissões evitadas de GEE de cada ano são calculadas multiplicando-se o Fator de Emissão de CO_{2e} anual $EF_{grid,y}$ do respectivo ano obtido na seção 3.6.1, 3.6.2 e 3.6.3 reproduzidos na Tabela 4.3 pelo Potencial Solar Fotovoltaico anual de cada estado para os respectivos anos base 2016, 2011 e 2006 conforme demonstrado na Tabela 4.4.

Tabela 5.3 - Fator de Emissão de CO_{2e} por Ano Base 2016, 2011 e 2006

Fator de Emissão de CO _{2e} anual (tCO ₂ /MWh)		
Ano Base 2016	Ano Base 2011	Ano Base 2006
$EF_{grid,2016}$	$EF_{grid,2011}$	$EF_{grid,2006}$
0,5066	0,2454	0,2628

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.4 - Emissões Evitadas de GEE (tCO₂/ano) por Estado - Ano Base 2016, 2011, 2006

ANO BASE 2016				ANO BASE 2011				ANO BASE 2006			
ESTADO	Potencial Solar FV Anual (MWh)	Fator de Emissão de CO ₂ e (tCO ₂ /MWh) <i>EF grid,2016</i>	Emissões evitadas (tCO ₂ e/ano)	ESTADO	Potencial Solar FV Anual (MWh)	Fator de Emissão de CO ₂ e (tCO ₂ /MWh) <i>EF grid,2011</i>	Emissões evitadas (tCO ₂ e/ano)	ESTADO	Potencial Solar FV Anual (MWh)	Fator de Emissão de CO ₂ e (tCO ₂ /MWh) <i>EF grid,2006</i>	Emissões evitadas (tCO ₂ e/ano)
Acre	1.006.708	0,5066	509.998	Acre	1.006.708	0,2454	247.046	Acre	1.006.708	0,2628	264.563
Alagoas	5.001.127	0,5066	2.533.571	Alagoas	5.001.127	0,2454	1.227.277	Alagoas	5.001.127	0,2628	1.314.296
Amapá	876.349	0,5066	443.959	Amapá	876.349	0,2454	215.056	Amapá	876.349	0,2628	230.305
Amazonas	3.816.715	0,5066	1.933.548	Amazonas	3.816.715	0,2454	936.622	Amazonas	3.816.715	0,2628	1.003.033
Bahia	22.656.580	0,5066	11.477.823	Bahia	22.656.580	0,2454	5.559.925	Bahia	22.656.580	0,2628	5.954.149
Ceará	14.347.713	0,5066	7.268.551	Ceará	14.347.713	0,2454	3.520.929	Ceará	14.347.713	0,2628	3.770.579
DF	4.063.931	0,5066	2.058.787	DF	4.063.931	0,2454	997.289	DF	4.063.931	0,2628	1.068.001
Espirito Santo	6.049.287	0,5066	3.064.569	Espirito Santo	6.049.287	0,2454	1.484.495	Espirito Santo	6.049.287	0,2628	1.589.753
Goias	11.967.466	0,5066	6.062.718	Goias	11.967.466	0,2454	2.936.816	Goias	11.967.466	0,2628	3.145.050
Maranhão	9.943.002	0,5066	5.037.125	Maranhão	9.943.002	0,2454	2.440.013	Maranhão	9.943.002	0,2628	2.613.021
Mato Grosso	5.563.302	0,5066	2.818.369	Mato Grosso	5.563.302	0,2454	1.365.234	Mato Grosso	5.563.302	0,2628	1.462.036
Mato Grosso Sul	4.946.345	0,5066	2.505.819	Mato Grosso Sul	4.946.345	0,2454	1.213.833	Mato Grosso Sul	4.946.345	0,2628	1.299.900
Minas Gerais	36.376.683	0,5066	18.428.428	Minas Gerais	36.376.683	0,2454	8.926.838	Minas Gerais	36.376.683	0,2628	9.559.792
Pará	5.793.071	0,5066	2.934.770	Pará	5.793.071	0,2454	1.421.620	Pará	5.793.071	0,2628	1.522.419
Paraíba	6.516.831	0,5066	3.301.427	Paraíba	6.516.831	0,2454	1.599.230	Paraíba	6.516.831	0,2628	1.712.623
Paraná	19.358.621	0,5066	9.807.078	Paraná	19.358.621	0,2454	4.750.606	Paraná	19.358.621	0,2628	5.087.446
Pernambuco	14.557.700	0,5066	7.374.931	Pernambuco	14.557.700	0,2454	3.572.460	Pernambuco	14.557.700	0,2628	3.825.764
Piauí	5.203.048	0,5066	2.635.864	Piauí	5.203.048	0,2454	1.276.828	Piauí	5.203.048	0,2628	1.367.361
Rio de Janeiro	27.789.240	0,5066	14.078.029	Rio de Janeiro	27.789.240	0,2454	6.819.480	Rio de Janeiro	27.789.240	0,2628	7.303.012
Rio Gde do Norte	5.328.066	0,5066	2.699.198	Rio Gde do Norte	5.328.066	0,2454	1.307.507	Rio Gde do Norte	5.328.066	0,2628	1.400.216
Rio Gde do Sul	19.465.432	0,5066	9.861.188	Rio Gde do Sul	19.465.432	0,2454	4.776.817	Rio Gde do Sul	19.465.432	0,2628	5.115.516
Rondonia	2.597.096	0,5066	1.315.689	Rondonia	2.597.096	0,2454	637.327	Rondonia	2.597.096	0,2628	682.517
Roraima	594.398	0,5066	301.122	Roraima	594.398	0,2454	145.865	Roraima	594.398	0,2628	156.208
Santa Catarina	10.565.647	0,5066	5.352.557	Santa Catarina	10.565.647	0,2454	2.592.810	Santa Catarina	10.565.647	0,2628	2.776.652
São Paulo	55.430.489	0,5066	28.081.086	São Paulo	55.430.489	0,2454	13.602.642	São Paulo	55.430.489	0,2628	14.567.133
Sergipe	3.511.328	0,5066	1.778.839	Sergipe	3.511.328	0,2454	861.680	Sergipe	3.511.328	0,2628	922.777
Tocantins	2.411.215	0,5066	1.221.522	Tocantins	2.411.215	0,2454	591.712	Tocantins	2.411.215	0,2628	633.667
Total Brasil	305.737.390		154.886.562	Total Brasil	305.737.390		75.027.956	Total Brasil	305.737.390		80.347.786

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 4.5 estão resumidas as emissões evitadas de GEE, convertidas para Mt CO_{2e}, do segmento Residencial do Setor de Energia a nível nacional para os cenários 2016, 2011 e 2006.

Tabela 5.5 - Emissões Evitadas de GEE (Mt CO_{2e}/ano) Brasil - Ano Base 2016, 2011, 2006

Emissões Evitadas Mt CO_{2e}/ano com geração fotovoltaica nos telhados		
<i>Ano Base 2016</i>	<i>Ano Base 2011</i>	<i>Ano Base 2006</i>
155	75	80

Fonte: Elaboração própria

5.3.

Contribuição de Mitigação de GEE - Acordo de Paris (COP 21)

Conforme estabelecido no Acordo de Paris na COP 21 o Brasil assumiu o compromisso de reduzir as emissões de GEE, em 37% até 2025 e em 43% até 2030, ambos em comparação aos níveis das emissões de 2005 incluindo todos os setores da economia. Para esse estudo serão computados o nível de contribuição de mitigação de GEE em relação a essas metas, pela simulação da geração fotovoltaica nos telhados dos domicílios brasileiros tomando-se como cenário base, o ano de 2016, ano da publicação dos últimos fatores de emissão de CO₂ pelo MCTI, para a geração de energia elétrica das fontes conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Adicionalmente será feita também a simulação da redução das emissões estimadas assumindo-se a geração de energia fotovoltaica nos cenários dos anos base de 2006 e 2011, para comparativo com o ano base de 2016.

De acordo com o histórico até 2014 das emissões de GEE de todos setores da economia incluindo Agropecuária, Energia, Processos Industriais, Resíduos e Mudança de Uso da Terra, o ano de 2005 apresentou um valor de 3.154 Mt CO_{2e} de emissões de GEE (Tabela 4.6). Portanto tem-se como meta de redução de 37% até o ano de 2025 o valor de 1.167 Mt CO_{2e} e meta de redução de 43% até o ano de 2030 o valor de 1.356 MtCO_{2e} conforme a Tabela 4.7.

Tabela 5.6 - Evolução das Emissões de GEE até 2014

Evolução das Emissões de GEE no Brasil por Setor (Mt CO ₂ e)											
Setores	1970	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014
Agropecuária	161	240	287	317	328	392	406	418	413	418	423
Energia	99	185	190	228	288	313	368	382	418	452	479
Processos Industriais	14	39	51	65	76	83	95	101	101	99	101
Resíduos	12	18	27	32	39	46	58	59	59	64	68
Mudança de Uso da Terra	-	-	1.068	2.139	1.503	2.319	893	843	771	887	774
Total Emissões	285	483	1.624	2.781	2.234	3.154	1.821	1.803	1.762	1.921	1.846

Fonte: SEEG (2016) [15b]

Tabela 5.7 - Metas Globais de Redução de GEE para 2025 e 2030

Metas de Redução de Emissão de GEE Brasil ¹		
Ano da Meta	% de Redução	Mt CO ₂ e
2025	37% x 3154 =	1167
2030	43% x 3154 =	1356

¹ Inclui todos os setores da economia: Agropecuária, Energia, Processos Industriais, Resíduos, Mudança de Uso da Terra.

Fonte: Elaboração própria

5.3.1.

Cenário Ano Base 2016 – % de Atingimento da Meta

Resultado para a Meta de 37% até 2025:

- Com 155 Mt CO₂e de emissões evitadas por ano, a meta de 1.167 Mt CO₂e seria atingida no 8º ano, portanto em 2024 (Figura 4.1). Já em 2025 essa meta seria ultrapassada em 20% (Tabela 4.8).

Resultado para a Meta de 43% até 2030:

- Com 155 Mt CO₂e de emissões evitadas por ano, a meta de 1.356 Mt CO₂e seria atingida no 9º ano, portanto em 2025 (Figura 4.1). Já em 2030 essa meta seria ultrapassada em 60% (Tabela 4.8).

Tabela 5.8 - Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV na Base 2016)

Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV no Ano Base 2016)					
De 2006 até	Anos	EE 2016 ¹	EE Total Mt CO2e	META Mt CO2e	% Atingimento
2025	9 x	155 =	1.395	1.167	120%
2030	14 x	155 =	2.170	1.356	160%

¹ EE = 155 Mt CO2e Emissões Evitadas no Ano Base 2016

Fonte: Elaboração própria

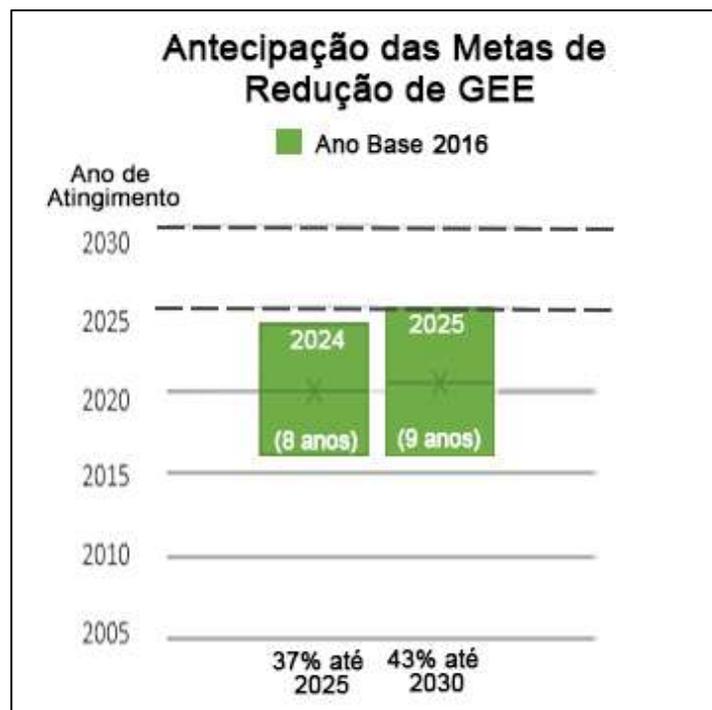


Figura 5.1 - Antecipação das Metas para o cenário do Ano Base 2016.

Fonte: Elaboração própria

5.3.2.

Cenário Ano Base 2011 - % de Atingimento da Meta

Resultado para a Meta de 37% até 2025:

- Com 75 Mt CO_{2e} de emissões evitadas por ano, a meta de 1.167 Mt CO_{2e} só seria atingida no ano 2027 (Figura 4.2), ficando abaixo 10% da meta de 2025 (Tabela 4.9).

Resultado para a Meta de 43% até 2030:

- Com 75 Mt CO_{2e} de emissões evitadas por ano, a meta de 1.356 Mt CO_{2e} seria atingida no 19º ano, portanto em 2030 (Figura 4.2). Já em 2030 essa meta seria ultrapassada em 5% (Tabela 4.9).

Tabela 5.9 - Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV na Base 2011)

Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV no Ano Base 2011)					
De 2006 até	Anos	EE de 2011 ¹	EE Total Mt CO _{2e}	META Mt CO _{2e}	% Atingimento
2025	14 x	75 =	1.050	1.167	90%
2030	19 x	75 =	1.425	1.356	105%

¹ EE = 75 Mt CO_{2e} Emissões Evitadas no Ano Base 2011

Fonte: Elaboração própria

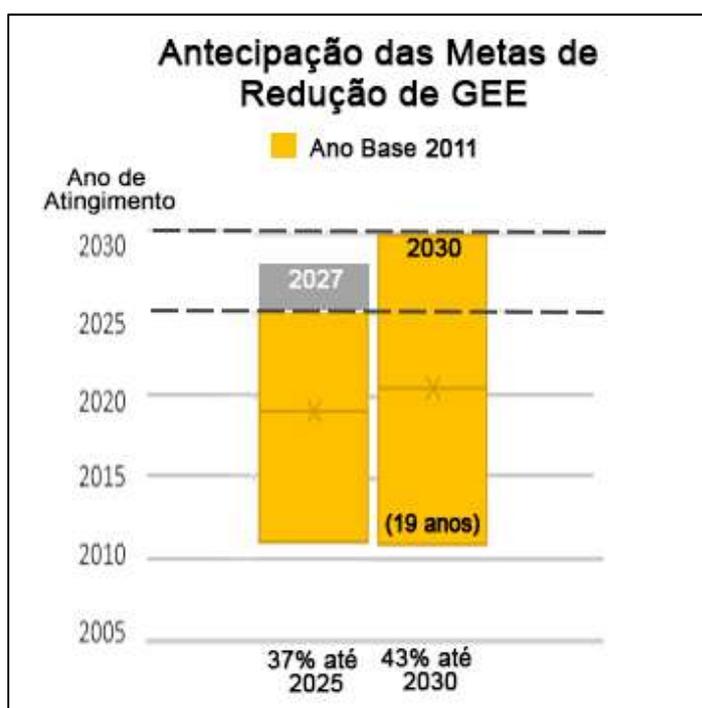


Figura 5.2 - Antecipação das Metas para o cenário do Ano Base 2011.

Fonte: Elaboração própria

5.3.3. Cenário Ano Base 2006 - % de Atingimento da Meta

Resultado para a Meta de 37% até 2025:

- Com 80 Mt CO_{2e} de emissões evitadas por ano, a meta de 1.167 Mt CO_{2e} seria atingida no 15º ano, portanto em 2021 (Figura 4.3). Já em 2025 essa meta seria ultrapassada em 30% (Tabela 4.10).

Resultado para a Meta de 43% até 2030:

- Com 80 Mt CO_{2e} de emissões evitadas por ano, a meta de 1.356 Mt CO_{2e} seria atingida no 17º ano, portanto em 2023. Já em 2030 essa meta seria ultrapassada em 42% (Tabela 4.10).

Tabela 5.10 - Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV na Base 2006)

Atingimento da Meta de Redução de GEE (Geração FV no Ano Base 2006)					
De 2006 até	Anos	EE de 2006 ¹	EE Total Mt CO _{2e}	META Mt CO _{2e}	% Atingimento
2025	19 x	80 =	1.520	1.167	130%
2030	24 x	80 =	1.920	1.356	142%

¹ EE = 80 Mt CO_{2e} Emissões Evitadas no Ano Base 2006

Fonte: Elaboração própria

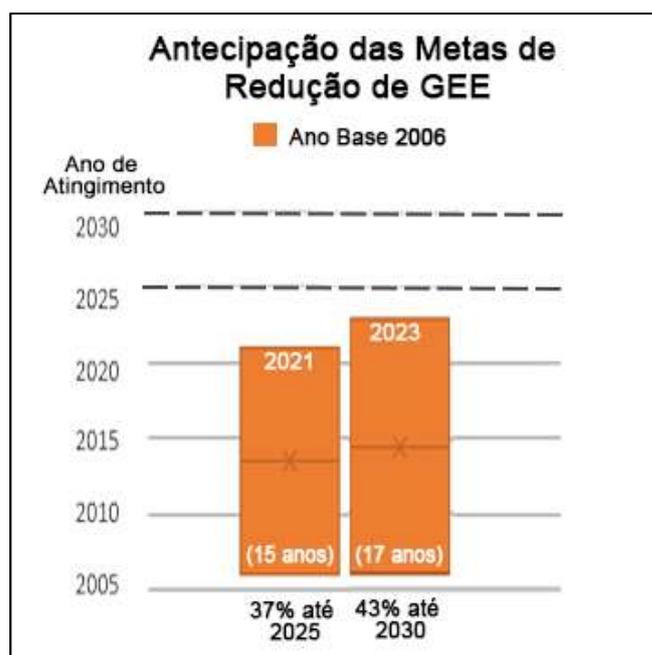


Figura 5.3 - Antecipação das Metas para o cenário do Ano Base 2006.

Fonte: Elaboração própria

6. Conclusão do Estudo

Mediante os resultados obtidos verifica-se que dos 3 cenários analisados conforme a Figura 5.1 somente o cenário de 2011 correspondente a meta de 37% de redução até o ano 2025, é que ficou abaixo 10% da meta, todas as outras metas de redução de GEE foram ultrapassadas excedendo a meta das emissões evitadas.

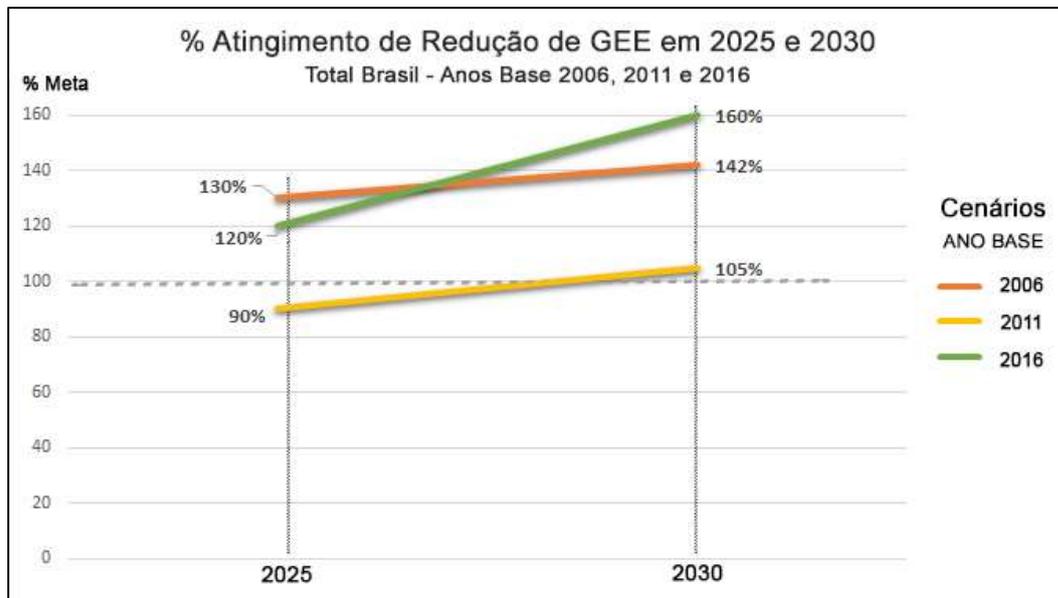


Figura 6.1- Atingimento das Metas para 2025 e 2030 do Acordo de Paris.
Fonte: Elaboração Própria.

Quanto ao resultado de antecipação das metas, tanto para 2025 quanto para 2030, o cenário que mais se anteciparia seria o do ano base de 2006 (Figura 5.2). Nesse cenário de 2006, a meta de 2025 seria alcançada 4 anos mais cedo, com 15 anos de emissões evitadas. Já em relação a meta de 2030, seria alcançada 7 anos mais cedo, com 17 anos de emissões evitadas pela geração de energia solar fotovoltaica nos telhados dos domicílios.

De forma comparativa o cenário do ano 2016 levaria a metade do tempo em relação ao cenário de 2011 e 2006 para o atingimento das metas pelo fato das emissões evitadas em 2016 (155 Mt de CO₂/ano) ser praticamente o dobro em relação a do ano 2011 (75Mt CO₂/ano) e em relação a do ano 2006 (80Mt CO₂/ano) conforme mostrado na Figura 5.3 dando assim uma ideia de aceleração relativa a esses cenários.

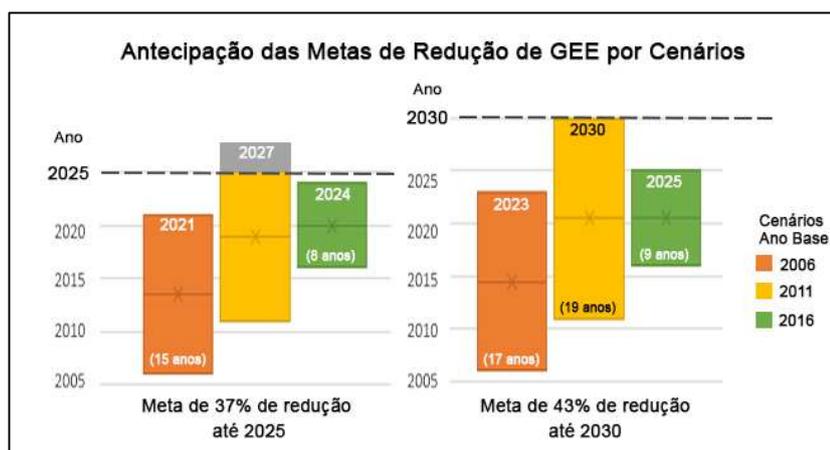


Figura 6.2 - Resultado da antecipação das Metas de Redução de GEE.
Fonte: Elaboração própria

Tomando-se o cenário mais recente do ano base de 2016, a contribuição em relação a meta de 2025 seria de um excedente de 228 Mt CO_{2e} (20% de 1.167 Mt CO_{2e}) de emissões evitadas, equivalentes a geração de um potencial de 228 milhões de créditos de carbono para o mercado internacional. Já em relação a meta de 2030, a contribuição excedente seria de 814 Mt CO_{2e} (60% de 1.356 Mt CO_{2e}) de emissões evitadas, equivalentes a geração de um potencial de 814 milhões de créditos de carbono para o mercado internacional (ver Tabela 5.1).

Tabela 6.1 - Contribuição Excedente as Metas Brasil de Mitigação de GEE

Nível de Contribuição de Mitigação (Geração FV na Base 2016)			
Ano	Emissões Evitadas (Mt CO _{2e})	META DE REDUÇÃO (Mt CO _{2e})	Excedente (Mt CO _{2e})
2025	1.395	1.167	228
2030	2.170	1.356	814

¹ EE = 155 Mt CO_{2e} EE na Base 2016

Fonte: Elaboração própria

Para efeitos comparativos, esse valor de 814 Mt CO_{2e} representaria 4 vezes a meta de redução de 174 Mt CO_{2e} [72] de GEE para 2030 da Austrália e se comparado com meta de redução de GEE do Canadá para 2030, representa mais de 3 vezes o valor de 224 Mt de CO_{2e} [73].

Portanto mais do que atingir suas metas, o Brasil teria o potencial de ultrapassá-las, aumentando sua contribuição para a mitigação dos GEE e com isso criar impactos econômicos e estruturais gerando créditos de carbono, posicionando-se mais próximo do mercado internacional de carbono.

Sobre a evolução das emissões evitadas de GEE e o fator de emissão de CO₂e:

Outro ponto importante a destacar pelos resultados das emissões evitadas nos diferentes cenários, é que o ano de 2016 praticamente dobrou em relação as emissões evitadas no cenário do ano 2006 e 2011 (Figura 5.3).

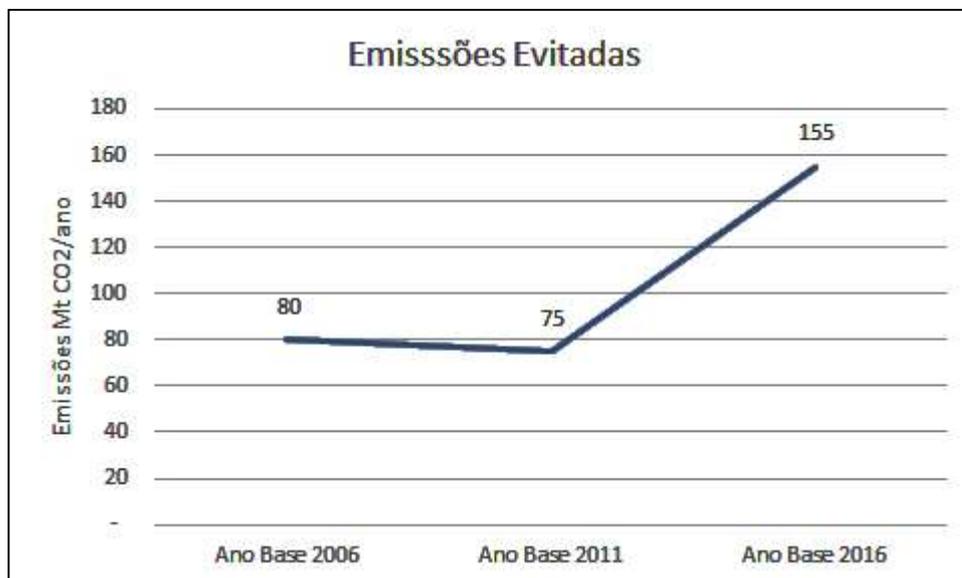


Figura 6.3 - Emissões Evitadas de GEE nos anos 2006, 2011 e 2016 (Mt CO₂e/ano).
Fonte: Elaboração própria.

Essa mesma tendência se deu para os fatores de emissão de CO₂e obtidos para os mesmos anos base conforme a Figura 5.4, denotando uma indicação do Brasil estar emitindo mais GEE na produção de energia elétrica, mesmo tendo a vantagem em relação a outros países do mundo de ter uma parcela maior de energia renovável em sua matriz elétrica.

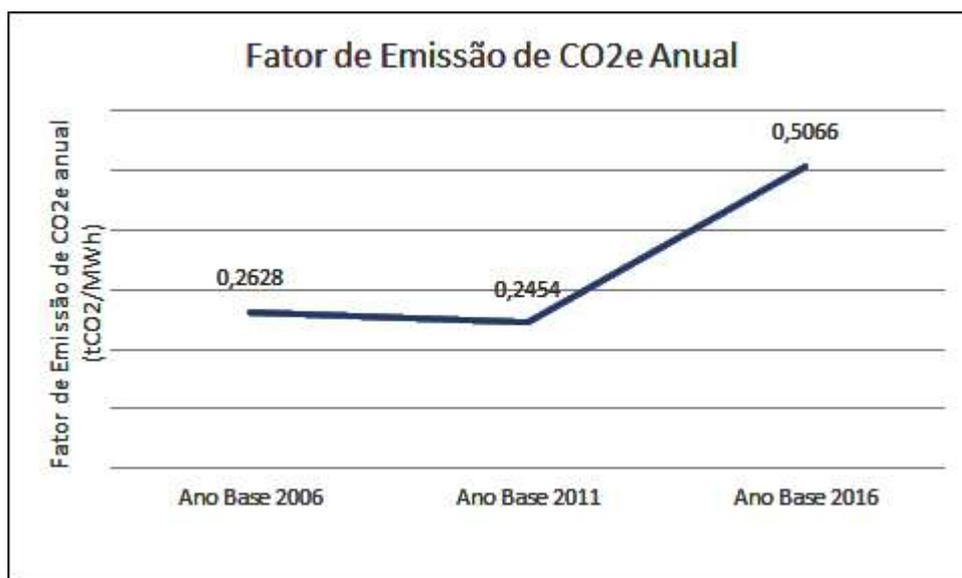


Figura 6.4 - Fatores de Emissão de CO₂e - Anos Base de 2006, 2011 e 2016.
Fonte: Elaboração própria

Os fatores da margem operacional(OM) e da margem de construção(BM) que compõem o fator de emissão em 2016 também dobram em relação a 2006 e 2011 (Figura 5.5), reforçando a ideia de maior utilização de usinas térmicas a partir de combustíveis fósseis na operação do SIN, refletindo nos fatores da margem de operação (OM) e margem de construção (BM) mais elevados.

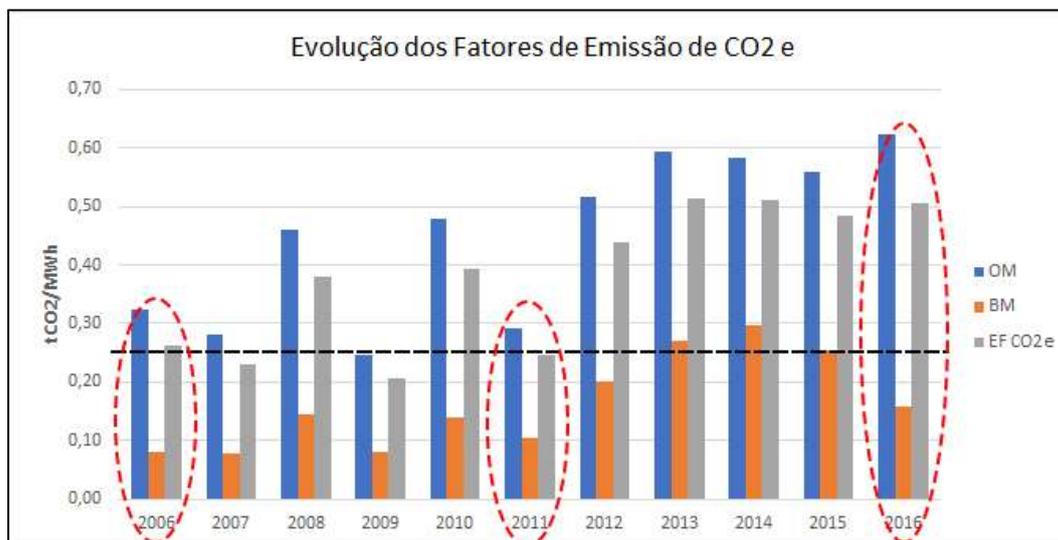


Figura 6.5 - Evolução do Fator de Emissão de CO₂e do SIN.
Fonte: MCTI,(2016) [67d]

De acordo com Lopes (2013) [68] esse aumento no fator de emissão se deveu à maior participação das usinas térmicas no SIN (Figura 5.6), tendo sido acionadas provavelmente tanto em função de condições hidrológicas desfavoráveis quanto do aumento da demanda de energia elétrica, razão pela qual resultou um fator de emissão de redução de CO₂e para o ano de 2016 dobrado em relação aos anos 2006 e 2011.

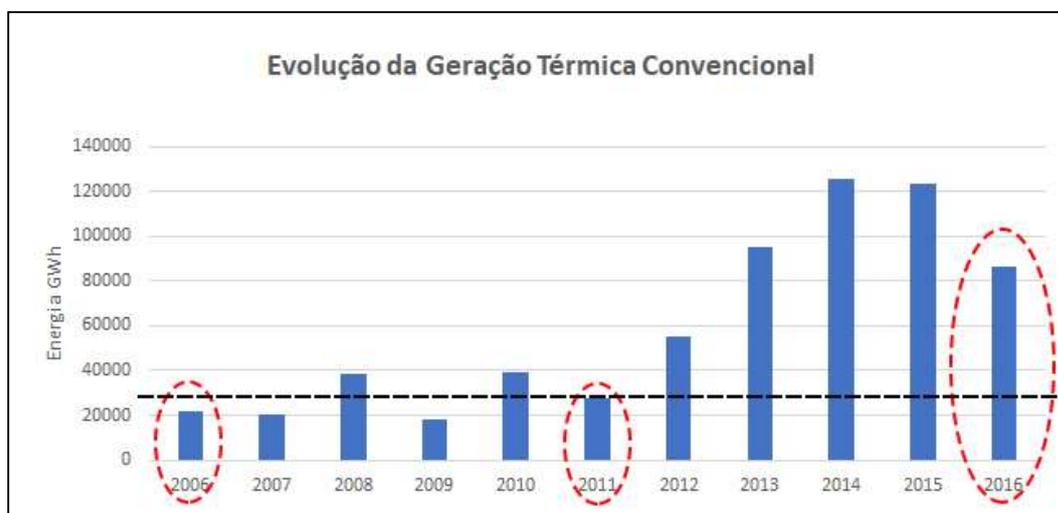


Figura 6.6 - Evolução da geração térmica convencional do SIN.
Fonte: ONS, 2016. Fonte: ONS [69]

Conclui-se que para atender a demanda de energia elétrica, mais combustíveis fósseis foram utilizados e novas plantas foram instaladas, aumentando, conseqüentemente, a emissão de CO₂.

6.1.

Uma perspectiva estadual da microgeração ao invés de nacional

Considerando a perspectiva do planejamento da disseminação da microgeração distribuída de energia fotovoltaica, esse estudo pode ser desdobrado graças a utilização do sistema de informação geográfico como ferramenta de simulação, elencando prioridades de seleção dos domicílios como estado, município, tipos de domicílio (casa, apto), situação (urbana, rural) e potencial energético da região. Por exemplo, tomando-se o potencial de microgeração na base do ano 2016 é possível priorizar os estados com o maior potencial de atingir a meta nacional de 37% de redução de GEE até o ano 2025, conforme destacado na Figura 5.7 e relacionado na Tabela 5.2 com o total de emissões evitadas de 1.189 Mt CO_{2e}.

Tabela 6.2- Estados Priorizados para atingir a Meta de 2025

Estado	EE Mt CO _{2e}
São Paulo	253
Minas Gerais	166
Rio de Janeiro	127
Bahia	103
Rio Grande do Sul	89
Paraná	88
Pernambuco	66
Ceará	65
Goias	55
Santa Catarina	48
Maranhão	45
Paraíba	30
Espirito Santo	28
Pará	26
Total de Emissões	1.189

Fonte: Elaboração própria.

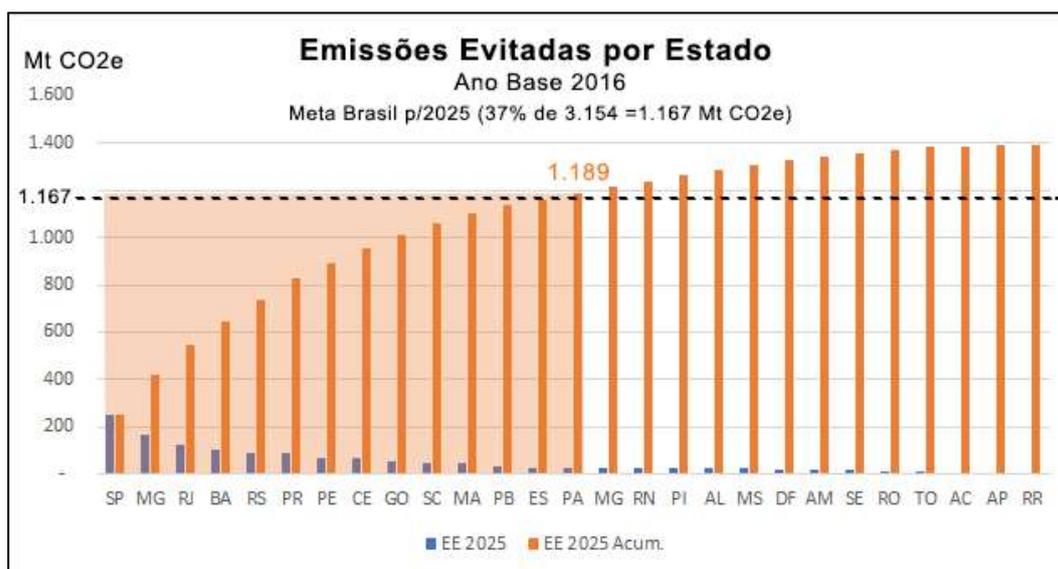


Figura 6.7 - Emissões Evitadas de Estados Priorizados para atingir a Meta Brasil de 2025.

Fonte: Elaboração própria.

Analogamente, tomando-se o potencial de microgeração na base do ano 2016 é possível priorizar os estados com o maior potencial de atingir a meta nacional de 43% de redução de GEE até o ano 2030, conforme destacado na Figura 5.8 e relacionado na Tabela 5.3 com o total de emissões evitadas de 1.388 Mt CO_{2e}.

Tabela 6.3 - Estados Priorizados para atingir a Meta de 2030

Estado	EE Mt CO _{2e}
São Paulo	393
Minas Gerais	258
Rio de Janeiro	197
Bahia	161
Rio Grande do Sul	138
Paraná	137
Pernambuco	103
Total de Emissões	1.388

Fonte: Elaboração própria

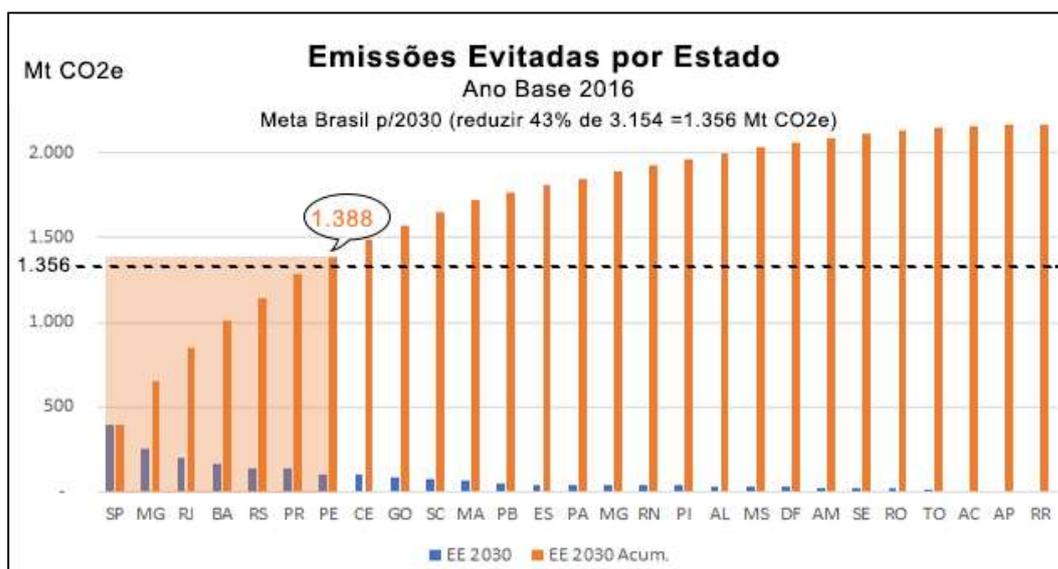


Figura 6.8 - Emissões Evitadas de Estados Priorizados para atingir a Meta Brasil de 2030.

Fonte: Elaboração própria.

6.2. Considerações Finais - Acelerando o ingresso do Brasil na era pós-carbono

Com a disseminação da microgeração distribuída de energia fotovoltaica em todas os telhados dos domicílios brasileiros, seria possível acelerar o ingresso do Brasil na era pós carbono; cumprir as metas de mitigação dos GEE do Acordo de Paris somente com a parcela das reduções de emissões do segmento residencial do setor de energia; aumentar a participação na matriz elétrica brasileira de energia da renovável; aumentar a resiliência do sistema elétrico²⁰ protegendo as populações de interrupções elétricas e minimizando a utilização dos sistemas de segurança convencional baseadas nos geradores a diesel, um dos principais responsáveis pelo aumento das emissões do GEE. Apesar dos sistemas de microgeração fotovoltaica distribuída não causarem impactos ambientais de poluição, ou sobre a fauna e na flora²¹, o processo de fabricação dos componentes e módulos, esse sim tem uma parcela de contribuição nas emissões de GEE, já que a energia é utilizada em todas as etapas do processo produtivo. A recomendação é que os processos de fabricação desses componentes ocorram em localidades onde haja uma matriz elétrica mais limpa e próxima da obtenção do recurso da matéria prima das placas fotovoltaicas que hoje é o silício, recurso abundante no Brasil, local que possui a maior reserva de quartzo mineral do qual se obtém este silício.

Tem-se, portanto, como continuidade deste trabalho a indicação positiva de um planejamento urbano com envolvimento das partes interessadas (governos federal, estadual e municipal, agencias do setor elétrico, empresas do setor privado e sociedade civil) no cumprimento da agenda de desenvolvimento

²⁰ Em tempos de crises hídricas, todo o sistema elétrico fica vulnerável pela dependência da geração de energia das hidrelétricas.

²¹ Não há relatos de impactos sobre a fauna e a flora, pois em sua maioria os sistemas fotovoltaicos estão localizados em áreas urbana, onde esses impactos à fauna e à flora já ocorreram.

nacional sustentável e de enfrentamento às mudanças climáticas tanto da sociedade brasileira como da internacional. Nesse contexto do planejamento, deve dar-se especial destaque às cidades onde efetivamente se dá o processo de disseminação da microgeração distribuída, focando no desvio da trajetória tradicional do carbono, com o envolvimento dos governos locais e engajamento da sociedade civil com uma agenda de educação ambiental.

Trata-se, então, de um desafio político e técnico que requer instrumentos financeiros que podem ser obtidos da área de financiamento do Fundo Verde para o Clima (GCF) [74] através da Autoridade Nacional Designada²², alinhados aos eixos estratégicos nacional em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU de N^o.7 - “Energia Limpa e Acessível” (Tabela 5.4). e de N^o.13 de “Combate as Alterações Climáticas” (Tabela 5.5) da Agenda de 2030²³ de desenvolvimento sustentável.

²² AND: Autoridade Nacional Designada para o Green Climate Fund no caso do Brasil, é a Secretaria de Assuntos Internacionais do Ministério da Fazenda (SAIN-MF).

²³ A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, que busca erradicar a pobreza, promover vida digna para todos, dentro dos limites do planeta e fortalecer a paz universal. São 17 objetivos e 169 metas claras, para que todos os países adotem de acordo com suas próprias prioridades e atuem no espírito de uma parceria global que orienta as escolhas necessárias para melhorar a vida das pessoas, agora e no futuro [70].

Tabela 6.4 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável N° 7 da Agenda de 2030 da ONU

ODS	DESCRIÇÃO
	<p>ENERGIA LIMPA E ACESSÍVEL Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos comprometidos com a ação climática por meio de ações locais cumulativas de geração e uso de energia renovável.</p>
METAS DO OBJETIVO	
7.1 Até 2030, assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia.	
7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global.	
7.3 Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética.	
7.a Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa.	
7.b Até 2030, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento, particularmente nos países menos desenvolvidos, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos programas de apoio.	

Fonte: Adaptado de ONUBR (2015) [71]

Tabela 6.5 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável N° 13 da Agenda de 2030 da ONU

ODS	DESCRIÇÃO
	<p>COMBATE ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos (*).</p>
METAS DO OBJETIVO	
13.1 Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países.	
13.2 Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais.	
13.3 Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima.	
13.a Implementar o compromisso assumido pelos países desenvolvidos partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima [UNFCCC] para a meta de mobilizar conjuntamente US\$ 100 bilhões por ano a partir de 2020, de todas as fontes, para atender às necessidades dos países em desenvolvimento, no contexto das ações de mitigação significativas e transparência na implementação; e operacionalizar plenamente o Fundo Verde para o Clima por meio de sua capitalização o mais cedo possível.	
13.b Promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz, nos países menos desenvolvidos, inclusive com foco em mulheres, jovens, comunidades locais e marginalizadas.	
(*) Reconhecendo que a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima [UNFCCC] é o fórum internacional intergovernamental primário para negociar a resposta global à mudança do clima.	

Fonte: Adaptado de ONUBR (2015) [75]

7.

Referências bibliográficas

[1] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Com proposta mais ambiciosa, Brasil chega à COP 21 como importante negociador do clima.** 30 Nov. 2015. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/11/com-proposta-mais-ambiciosa-Brasil-chega-a-COP21-como-importante-negociador-mundial-do-clima>. Último acesso: 5 dezembro de 2017.

[2], [2a], [2b] EPE, 2017: **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2017**, (BEN, 2017). Rio de Janeiro, RJ. Junho de 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br> . Último acesso: 5 dezembro de 2017.

[3] [3b] [3a] IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[4], [5] [5b] IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[6], [6a], [6b] IRENA, 2017: **Renewable capacity highlights.** 30 March 2017. Disponível em: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_stats_highlights_2017.pdf . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[7] BSW-Solar, 2016: **Statistic data on the German Solar power (photovoltaic) industry.** Disponível em: https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2016_3_BSW-Solar_fact_sheet_solar_power.pdf. Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[8] SEIA, 2015: **“U.S. Solar Market Sets New Record, Installing 7.3 GW of Solar PV in 2015”.** Disponível em: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/us-solar-market-sets-new-record-installing-7-3-gw-of-solar-pv-in-2015#gs.se=ORpI>. Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[9] SunWiz, 2015: **Australian solar industry celebrates the New Year by ticking over 1.5m PV systems and one solar panel per person.** Disponível em:

<http://www.sunwiz.com.au/index.php/2012-06-26-00-47-40/73-newsletter/384-australian-solar-industry-celebrates-the-new-year-by-ticking-over-1-5m-pv-systems.html> . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[10] REN21, 2016: **Energias Renováveis 2016**. Relatório da Situação Mundial. Disponível em: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/11/REN21_GSR2016_KeyFindings_port_02.pdf Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[11] Parlamento Europeu, 2009: **Parlamento Europeu fecha pacote clima-energia: "três vintes" até 2020**. Promulgado em 17-12-2008. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081216IPR44857+0+DOC+XML+V0//PT>. Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[12] [12a] [12b] EUROSTAT, 2014: **Renewable energy in the EU. Share of renewables in energy consumption in the EU rose further to 16% in 2014**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7155577/8-10022016-AP-EN.pdf/38bf822f-8adf-4e54-b9c6-87b342ead339> .Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[13] BOARDMAN, Brenda 2007: **Home truths: A low Carbon Strategy to reduce UK Housing emissions by 80% by 2050**. Disponível em: https://www.foe.co.uk/sites/default/files/downloads/home_truths.pdf Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[14] MARTINS, E.S.P.R., 2015: **Adaptação às Mudanças do Clima: Cenários e Alternativas – Recursos Hídricos Produto 2 – Balanço Hídrico 2010-2040**. Fortaleza, CE. Fevereiro de 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/RecursosHProduto%202.pdf> .Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[15], [15a] [15b] SEEG, 2016: **Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris**. São Paulo: Observatório do Clima, 2016. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/WIP-16-09-02-RelatoriosSEEG-Sintese.pdf> .Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[16] [16a] UNFCCC- United Nations Framework Convention on Climate Change. **The Paris Agreement**, 2015. Disponível em: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php . Último acesso em 05 de dezembro de 2017.

[17] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Acordo de Paris sobre o Clima**. 8 nov. 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2016/11/acordo-de-paris-sobre-o-clima-entra-em-vigor-nesta-sexta-4> . Último acesso em: 29 novembro de 2017.

[18] ONUBR. Nações Unidas no Brasil. 2016. **Em declaração final da COP22, países prometem avançar na implementação do Acordo de Paris.** Disponível em : <https://nacoesunidas.org/em-declaracao-final-da-cop22-paises-prometem-avancar-na-implementacao-do-acordo-de-paris/>. Último acesso em: 29 novembro de 2017.

[18a] AGÊNCIA BRASIL. **Cúpula do Clima de Bonn começa a concretizar regras do Acordo de Paris.** 18 de Novembro de 2017. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2017-11/cupula-do-clima-de-bonn-comeca-concretizar-regras-do-acordo-de-paris> . Último acesso em: 29 de novembro de 2017.

[19] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Compromisso voluntário do Brasil.** 17 Nov 2011. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/o-compromisso-voluntario-do-brasil> . Último acesso em: 29 novembro de 2017.

[20] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Acordo de Paris.** 18 set. 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris> . Último acesso em: 29 novembro de 2017.

[21] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482/2012,** 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf> . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[22] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 687/2015.** 2015. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[23], [23a], [23b] ANEEL, 2017: **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL.** Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9 Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[24] SAUAIA, Rodrigo Lopes. (2017): **Energia Solar Fotovoltaica cresceu 448% em dois anos.** Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-cresceu-448-em-dois-anos.html> Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[25], [25a] SAUAIA, Rodrigo Lopes. (2017): **Geração distribuída atinge 100 MW e passa de 8,8mil sistemas fotovoltaicos no Brasil, aponta ABSOLAR.** Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/geracao-distribuida-atinge-100-megawatts-e-passa-de-88-mil-sistemas-fotovoltaicos-no-brasil-aponta-a.html> . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[26] IEA. **Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy** - 2014 Edition, 2014a. Disponível em:

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf .Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[27] IEA. **Key World Energy Statistics** - International Energy Agency – 2016 Edition. Disponível em:

http://elearning.humnet.unipi.it/pluginfile.php/101860/mod_resource/content/0/IEA%20KeyWorldEnergyStatistics2016.pdf . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[28] IPCC. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Special Report of the Intergovernmental - Panel on Climate Change**. Nova Iorque, NY, EUA: Cambridge University Press, 2012. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf.

Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[29] Perze et al. **A FUNDAMENTAL LOOK AT ENERGY RESERVES FOR THE PLANET PDF**, p.3 [Internet]. Citado em 9 August 2014. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Energy_Potential_2014_08_09.svg . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[30] CARARTA. **Green Alternative Solar and Wind Energy** [blog na Internet]. Middle Tennesse: (US); [citado em 2016 August]. Disponível em:

<http://skippersbestbuy.com/test-solar-energy-iq-knowledge/> . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[31] PEREIRA, E. B. et al. (2017): **Atlas Brasileiro de Energia Solar: 2a edição**. São José dos Campos: INPE. Disponível em:

http://labren.cest.inpe.br/atlas_2017.html . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[32] [32a] STINE, W. B.; GEYER, M. **Power From The Sun**. 2001. Disponível em:

<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html> . Último acesso em 25 de novembro de 2017.

[33] FLOOR K. **Weerkunde. Meteorologie voor iedereen** [Internet]. Nederlands [citado em 10-04-2017]. Disponível em:

<https://www.meteo-julianadorp.nl/meteorologie/Straling-warmte-temperatuur.html>

Último acesso em 25 de novembro de 2017.

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

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[35] KOBAD BHAVNAGRI. **Solar Trackers** [Blog Internet]. Australia. Nova Gales do Sul. 2010 Janeiro - [citado em 2017 Nov 25]. Disponível em:

<https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>

Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[36] [36a] [36b] [36c] PEREIRA, E. B. et al. (2006): **Atlas Brasileiro de Energia Solar: 1ª edição**. São José dos Campos: INPE. Disponível em: http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf
Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[37] HSINCHU. **Solar Module Structure** [Internet]. Taiwan: RITEK (China); [citado em 2017 Nov 25]. Disponível em: http://www.riteksolar.com.tw/eng/p2-solar_modules.asp
Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[38] [38a] IEA. **Solar Energy Perspectives - International Energy Agency**. 2011. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Energy_Perspectives2011.pdf. Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[39] FRAUNHOFER ISE. **Press Release: New world record for solar cell efficiency at 46%**. 2014. Friburg, Germany. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html> . Último acesso em: 18 de dezembro de 2017.

[40] GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W. DUNLOP, E. D. **Solar cell efficiency tables (Version 45)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 23, Issue 1, January, 2015. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2573/full>

[41] MME/EPE, 2015. Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Disponível em <http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%2024.pdf> . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[42] REIS, Dartisson de Castro. **Análise crítica do processo de licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas**. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia. 2015. UFMG. Disponível em: <http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1138M.PDF> . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[43] BRASIL. **Lei nº 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. . 2 ago. 2010.

[44] LANGE, W. **Metodologia de mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento energético fotovoltaico**. Empresa De Pesquisa Energética/Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, estudo interno elaborado por meio da TerraGIS. Rio de Janeiro EPE/GIZ, 2012.

[45] BERGAMASCO, L.; Asinari, P. (2011). **Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy)**. In: SOLAR ENERGY, vol. 85 n. 11, pp. 2741-2756. Disponível em: http://porto.polito.it/2382427/1/Bergamasco_SE_D_10_00487R1.pdf. Último Acesso em: 19 de Dezembro de 2017.

[46] [46a] UNFCCC. **Clean Development Mechanism Executive Board**. AMS-I.D.: Grid connected renewable electricity generation, Versão 18.0, Novembro de 2014. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/W3TINZ7KKWCK7L8WTXFQQOFQ QH4SBK>. Último acesso em 19 de novembro de 2017.

[47] FELIPETTO, A. V. M. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2007. IBAM, 2007. Disponível em: http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/02-mdl_1.pdf. Último acesso em: 19 de novembro de 2017.

[48] REGO, L. F.G. **O uso de sistemas de informações geográficas para o estudo do espaço geográfico**. In: Rua. J. (Org.) Paisagem, Espaço e Sustentabilidades: uma perspectiva multidimensional da geografia. Rio de Janeiro, ed. PUC-Rio, 2007. Disponível em: http://www.editora.vrc.puc-rio.br/media/ebook_paisagem_espaco_e_sustentabilidade.pdf. Último acesso em: 19 de novembro de 2017.

[49] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo IBGE de 2010: **Base de dados por setor censitário do censo 2010**. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm
->Censos
-->Censo_Demografico_2010
--->Resultados_do_Universo
---->Agregados_por_Setores_Censitarios
Último acesso em 19 de dezembro de 2017.

[50] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malha georreferenciada dos setores censitários do censo 2010: Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm
->organizacao_do_territorio
-->malhas_territoriais
--->malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais
---->censo_2010

----->setores_censitarios_shp

Último acesso em 19 de dezembro de 2017.

[51] IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário.** Disponível em:

http://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/base_de_informacoess_por_setor_censitario_universo_censo_2010.pdf. Último acesso em 25 de novembro de 2017.

[52] ARONOFF, S. *Geographic informations systems*. Canadá: WDL Publications, 1989. 425p.

[53] SONDA. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais.** Disponível em: <http://sonda.cest.inpe.br/> [Internet]. Último acesso em 25 de novembro de 2017.

[54] SWERA. **Consulta aos bancos de dados** [Internet]. Disponível em: <https://maps.nrel.gov/swera>. Último acesso em 25 de novembro de 2017.

[55] SWERA. **Mapas e bases de dados em formato de SIG, com informações para várias localidades do globo terrestre** [Internet]. Disponível em: <http://en.openei.org/apps/SWERA/> . Último acesso em 25 de novembro de 2017.

[56] GHISI, E.; MONTIBELLER, A.; SCHMIDT, R.W. 2006. **Potential for potable water savings by using rainwater: an analysis over 62 cities in southern Brazil.** Building and Environment, v. 41, n. 2, p. 204-210, 2006. Disponível em: <http://wanko.free.fr/COURS/Ges.eaux%20pluviales/Potential%20for%20potable%20water%20savings%20by%20using%20rainwater%20in%20the.pdf> . Último acesso em 25 de novembro de 2017.

[56a] Eletrobrás. **Pesquisa de posse de eletrodomésticos e hábitos de consumo.** [Survey on household appliances ownership and electricity consumption]. Eletrobrás, PROCEL, PUC-Rio, Brasil, 1998.

[57] IZQUIERDO, S., Rodrigues, M., & Fueyo, N. (2008). **A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations.** Solar Energy, 82, 929–939.

[58] LEHMANN, H., & Peter, S. (2003). **Assessment of roof & façade potentials for solar use in Europe.** Aachen, Germany: Institute for Sustainable Solutions and Innovations (ISUSI). <<http://sustainable-soli.com/downloads/roofs.pdf>> Retrieved 31.07.09.

[59] SCARTEZZINI, J.-L., Montavon, M., & Compagnon, R. (2002). **Computer evaluation of the solar energy potential in an urban environment**. Paper presented at EuroSun2002. Bologna, Italy.

[60] MONTAVON, M., Scartezzini, J.-L., & Compagnon, R. (2004). **Solar energy utilization potential of three different swiss urban sites**. Paper presented at 13 Status Seminar Energie un Umweltforschung im Bauwesen, Zurich, Switzerland.

[61] PILLAI, I. R., & Banerjee, R. (2007). **Methodology for estimation of potential for solar water heating in a target area**. *Solar Energy*, 81(2), 162–172.

[62] GHOSH, S., & Vale, R. (2006). Domestic energy sustainability of different urban residential patterns: A New Zealand approach. *International Journal of Sustainable Development*, 9(1), 16–37.

[63] ENERGYSAGE. **Solar Panel Efficiency, Reviews & Ratings**. 2017. Disponível em: <https://www.energysage.com/solar/buyers-guide/solar-panel-efficiency/> . Último acesso em 05 de dezembro de 2017.

[64] KYMAKIS, E.; KALYKAKIS, S.; PAPAZOGLU, T. **Performance analysis of a grid-connected photovoltaic park on the island of Crete**. *Energy Conversion and Management*, v. 50, p. 433 - 438, 2009. Disponível em: [http://www.physics.arizona.edu/~cronin/Solar/References/Shade%20effects/sdarticle%20\(16\).pdf](http://www.physics.arizona.edu/~cronin/Solar/References/Shade%20effects/sdarticle%20(16).pdf) . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[65] BATISTA, F. R. S. **Estimação do Valor Incremental do Mercado de Carbono nos Projetos de Fontes Renováveis de Geração de Energia Elétrica no Brasil: Uma Abordagem pela Teoria das Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2007. Monografia (Tese de Doutorado) - Departamento de Engenharia Industrial, PUCRio. Disponível em: http://www.lambda.maxwell.ele.puc-rio.br/10170/10170_1.PDF . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[66] [66a] UNFCCC- United Nations Framework Convention on Climate Change. **“Tool to calculate the emission factor for an electricity system”**, 2016. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-07-v6.pdf> . Último acesso em 19 de novembro de 2017.

[67] [67a] [67b] [67c] [67d] BRASIL. Ministério de Ciências e tecnologia e Inovação. **Arquivos dos Fatores de Emissão da Margem de Operação pelo Método da Análise de Despacho**. 2016. Disponível em: http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html . Último acesso em 19 de novembro de 2017.

[68] LOPES, D.G. **Análise de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no Âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Estudo de Caso dos Projetos da Chamada N°13 da ANEEL**. 2013. Unicamp. Campinas. Disponível em:

http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265969/1/Lopes_DaviGabriel_D.pdf . Último acesso em: 5 de dezembro de 2017.

[69] ONS - **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. 2016. Disponível em: http://apps05.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx . Último Acesso em: 19 de dezembro de 2017.

[70] ONUBR. Nações Unidas no Brasil. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2016. Disponível em: <http://www.agenda2030.org.br/sobre/> . Último acesso em: 27 dezembro de 2017.

[71] ONUBR. Nações Unidas no Brasil. **Energia Limpa e Acessível**. 2015. Disponível em : <https://nacoesunidas.org/pos2015/ods7/> Último acesso em: 27 dezembro de 2017.

[72] AUSTRALIA GOVERNMENT. **Quarterly Update of Australia's National Greenhouse Gas Inventory: March 2017**. Disponível em: <http://www.environment.gov.au/climate-change/climate-science-data/greenhouse-gas-measurement/publications/quarterly-update-australias-national-greenhouse-gas-inventory-mar-2017> . Último acesso em: 27 dezembro de 2017.

[73] UNFCCC - **Canada's 2017 Nationally Contribution Submission to United Nations Framework Convention**. 2017. Disponível em <http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Canada%20First/Canada%20First%20NDC-Revised%20submission%202017-05-11.pdf> . Último acesso em: 27 dezembro de 2017.

[74] MINISTÉRIO DA FAZENDA, SECRETARIA DA RECEITA FEDERAL. **Fundo Verde para o Clima**. Disponível em: <http://fazenda.gov.br/assuntos/atuacao-internacional/fundo-verde-do-clima/fundo-verde-do-clima-gcf> . Último acesso em: 27 dezembro de 2017.

[75] ONUBR. Nações Unidas no Brasil. **Energia Limpa e Acessível**. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/ods13/> . Último acesso em: 27 dezembro de 2017.