

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Bruno Silva Mucciaccia

**ANÁLISE DE SISTEMA SOLAR TÉRMICO E DE
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO ESTÁTICO E
GIRATÓRIO EM EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Graduação
2017

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Bruno Silva Mucciaccia

**ANÁLISE DE SISTEMA SOLAR TÉRMICO E DE
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO ESTÁTICO
E GIRATÓRIO EM EDIFICAÇÕES**

Orientador

Ten. Cel. Eng. Marcio Antônio da Silva Pimentel - PhD

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Mucciaccia, Bruno

Análise de sistema solar térmico e de sistema solar fotovoltaico estático e giratório em edificações / Bruno Mucciaccia.

São José dos Campos, 2017.

91f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017. Orientador: Ten. Cel. Marcio Antônio da Silva Pimentel - Phd

1. Fotovoltaico. 2. Solar térmico. 3. Rastreamento solar. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
II. Análise de sistema solar térmico e de sistema solar fotovoltaico estático e giratório em edificações

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MUCCIACCIA, Bruno; **Análise de sistema solar térmico e de sistema solar fotovoltaico estático e giratório em edificações**. 2017. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno Silva Mucciaccia

TÍTULO DO TRABALHO: Análise de sistema solar térmico e de sistema solar fotovoltaico estático e giratório em edificações

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2017

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Bruno Silva Mucciaccia

Rua h8A número 1 ap 140

12228-460, São José dos Campos - SP

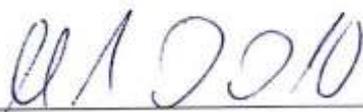
ANÁLISE DE SISTEMA SOLAR TÉRMICO E DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO ESTÁTICO E GIRATÓRIO EM EDIFICAÇÕES

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Bruno Silva Mucciaccia

Autor



Ten. Cel. Marcio Antônio da Silva Pimentel - PhD

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 22 de novembro de 2017

Dedico este trabalho a minha mãe
Margarete, pois sem ela nada seria.

Agradecimentos

Agradecimento à família

Minha mãe é conforto, com ela sinto paz. É amor infinito, se eu tudo perder, seu amor ainda terei, e com essa certeza venço a vida. Meu irmão é meu sangue, quão parecido somos e pensamos, o jovem das conversas mais interessantes. Minha avó, tios e tias, pessoas carinhosas, amigas e de bom coração. Meus primos (as), nunca vi mais extrovertidos e animados. Família, muito obrigado por existir e por tudo!

Agradecimento aos amigos

Amigo é apoio. É pilar que sustenta as tempestades de solidão. Que ama, encanta e canta, e diz “aguenta, já vem o verão”.

Que por meio de sorrisos e risos, brincadeiras e besteiras, alegra as manhãs daquelas segundas feiras.

Um bicho igual a mim, simples e humano, que move e comove, e comigo desbrava os mistérios do novo mundo.

De gratidão a alma acalma, ao lembrar de histórias e memórias, e por saber que aqui tu estarás, guardado, do lado esquerdo do meu peito.

Você. Eu. Ninguém, vai bater tão forte quanto a vida, mas não se trata de o quão forte você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar tentando. O quanto pode suportar e *seguir em frente. É assim que se consegue vencer*”
(Rocky Balboa)

Resumo

No mundo atual, em que a preocupação com a sustentabilidade é crescente, a busca por alternativas limpas e renováveis no uso de energia torna-se imprescindível para o desenvolvimento da sociedade. Entre as alternativas limpas e renováveis, destaca-se a energia solar. O presente trabalho aborda as duas maiores tecnologias de conversão de energia solar: o sistema solar fotovoltaico e o térmico-solar. No trabalho em questão, será analisado o sistema solar fotovoltaico e o térmico-solar em termos de custos, mercado, eficiência, desafios e perspectivas futuras e serão discutidas metodologias de dimensionamento de painéis giratórios fotovoltaicos e de coletor térmico solar. Além disso, será checada a viabilidade do aproveitamento da energia solar no país e será analisado o ganho de eficiência de sistemas de rastreamento solar para sistemas fotovoltaicos.

Abstract

In today's world, where concern for sustainability is growing, the search for clean and renewable alternatives to energy use becomes essential for the development of society. Among the clean and renewable alternatives, solar energy stands out. The present work addresses the two major solar energy conversion technologies: the solar photovoltaic system and the solar thermal system. This work will analyze the solar photovoltaic and solar thermal systems in terms of costs, market, efficiency, challenges and future prospects, and will discuss methodologies for the sizing of photovoltaic panels with tracking systems and solar thermal collectors. In addition, this work will check the feasibility of the use of solar energy in the country and will analyze the efficiency gain of solar tracking systems for photovoltaic systems.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Capacidade Solar Fotovoltaica Global e Adições Anuais, 2006 a 2016 (REN21, 2017)	22
Figura 2.2 – Capacidade Solar Fotovoltaica Global por País e Região, 2006 a 2016 (REN21, 2017)	22
Figura 2.3 - Separação dos custos dos componentes do sistema fotovoltaico (IRENA, 2015)	24
Figura 2.4 – Separação dos custos de investimento do sistema fotovoltaico (RAMOS et al., 2017)	24
Figura 2.5 – Média ponderada global para sistemas fotovoltaicos em larga escala, dados (2009-2015) e projeções (2016-2025) - (IRENA, 2017).....	25
Figura 2.6 – LCOE de 2016 de energias renováveis (IRENA, 2017)	26
Figura 2.7 – LCOE de 2016 de energias renováveis (IRENA, 2017)	27
Figura 2.8 – Capacidade global de coletores de aquecimento solar térmico, 2006-2016 (REN21, 2017).	31
Figura 2.9 – Aplicações dos coletores térmico solares, por região econômica, 2015 (REN21, 2017).	31
Figura 2.10 – 20 maiores países em capacidade solar térmica para aquecimento de água, 2016 (REN21, 2017).....	34
Figura 2.11 – Separação dos custos de investimento - incluindo instalação - do sistema térmico solar (esquerda) e do sistema fotovoltaico (direita). Preços são de especulação de varejistas do Reino Unido (RAMOS et al., 2017).	35
Figura 2.12 – Custos de investimento específicos e LCOH para diferentes aplicações térmicas-solares na Dinamarca - laranja: sistemas domésticos de pequena escala, verde: aplicações comerciais em grande escala (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).....	37

Figura 2.13 – Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas domésticos unifamiliares de água quente com termosifão (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).	37
Figura 2.14 - Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas domésticos multifamiliares de água quente com bombeamento (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).	38
Figura 2.15 - Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas combinados de água quente e aquecimento de ambiente - residências unifamiliares (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).....	38
Figura 2.16 - Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas de aquecimento de piscina (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).	39
Figura 2.17 – LCOE (custo nivelado de energia) para sistemas de larga escala no mundo, faixas e médias ponderadas, 2010 e 2016 (IRENA, 2017).....	40
Figura 2.18 – Estimativa de empregos diretos e indiretos em energia renovável no mundo, por setor (REN21, 2016).	41
Figura 2.19 – Resultado da avaliação no mundo do fator de rendimento fotovoltaico com base na localidade – valores da legenda em kWh/kWp (SOLARGIS, 2016).....	42
Figura 2.20 – Irradiação solar anual (kWh/m ²) versus a densidade de construção (N/km ²) para 16 regiões. O coeficiente de determinação (R ²) e a significância associada (valor p) a 5% são apresentadas para a correlação linear (MOHAJERI et al., 2016).....	43
Figura 2.21 – Distância de estações de medições solares de alta qualidade utilizadas na validação do modelo de radiação solar da Solargis. (SOLARGIS 2016).	44
Figura 2.22 – Especificação e consumo de energia de um sistema de rastreamento.....	47
Figura 3.1 – Valor de nda para cada dia do ano	49
Figura 3.2 – Movimento da Terra em torno do Sol e dos Solstícios e Equinócios.	50

Figura 3.3 – Gráfico da declinação da Terra para cada dia do ano, com destaque para Solstícios e Equinócios.	51
Figura 3.4 – Ilustração da Terra nos Solstícios e Equinócios	51
Figura 3.5 – Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação da potência de saída do inversor.	55
Figura 3.6 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação da potência de entrada do inversor.	56
Figura 3.7 – Exemplos de coeficientes de temperatura de um módulo fotovoltaico comercial.	57
Figura 3.8 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação da quantidade de módulos no painel.	58
Figura 3.9 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação do máximo de módulos em série no inversor.	59
Figura 3.10 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação do mínimo de módulos em série no inversor	59
Figura 3.11 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação do máximo de fileiras em paralelo.	60
Figura 4.1 – Parâmetros utilizados para cálculo de volume de consumo de água numa residência.....	63
Figura 4.2 – Valores dos Parâmetros de Saída do inversor especificado (SMA modelo SB 2500)	64
Figura 4.3 – Valores dos parâmetros de eficiência do inversor SMA – modelo SB2500.....	64
Figura 4.4 – Especificações técnicas do painel especificado (265 Wp) de energia solar.	65
Figura 4.5 – Especificações Mecânicas do painel especificado (265 Wp) de energia solar. ...	65

Figura 5.1 – Comparação de valores de Irradiação Global Horizontal entre bases de dados do Global Solar Atlas, CRESESB, INPE, NASA e modelo teórico linear de Ångström-Prèscott.	77
Figura 5.2 - Comparação de valores de Irradiação Global Inclinada na Latitude entre bases de dados do Global Solar Atlas, CRESESB, INPE, NASA.	77
Figura 5.3 - Comparação de valores de Irradiação Normal Direta entre bases de dados do Global Solar Atlas, INPE, NASA.	78
Figura 5.4 - Comparação de valores da soma da Irradiação Normal Direta com a Irradiação Difusa entre bases de dados do Global Solar Atlas, INPE, NASA.	78
Figura A.0.1 – Mapa de Irradiação Global Horizontal (GHI) em kWh/m ² no mundo (SOLARGIS, 2016).	88
Figura A.0.2 – Mapa de Irradiação Normal Direta (DNI) em kWh/m ² no mundo (SOLARGIS, 2016).	88
Figura A.0.3 – Mapa de Irradiação Difusa (DIF) em kWh/m ² no mundo (SOLARGIS, 2016).	89
Figura A.0.4 – Mapa de Irradiação Global Inclinada com a latitude (GTI) em kWh/m ² no mundo (SOLARGIS, 2016)	89
Figura A.0.5 – Mapa de Temperatura, em °C, no mundo (SOLARGIS, 2016)	90
Figura A.0.6 – Mapa de Elevação de Terreno, em m, no mundo. (SOLARGIS, 2016)	90
Figura A.0.7 – Mapa de densidade populacional no mundo, em habitantes/m ² (COLUMBIA UNIVERSITY, 2013)	91
Figura A.0.8 – Mapa de produção de eletricidade no mundo, em Mtoe (IEA, 2017) Nota: A produção do Brasil é 279,37 Mtoe.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Capacidade de geração em 2015 (em MW) e eletricidade gerada no ano de 2014 e 2015 (em GWh) para energias renováveis (IRENA, 2017) e (IEA SHC, 2016). Nota: dados manipulados pelo autor.	28
Tabela 2.2 – LCOE, Custo de Implementação e Fator de Capacidade de energias renováveis em 2016 na América do Sul (IRENA, 2017). Nota: Dados manipulados pelo autor.	29
Tabela 2.3 – Capacidade total no fim de 2015 de coletores solares de aquecimento de água e adições na capacidade em 2016 no Brasil (REN21, 2017).	35
Tabela 2.4 – Dados de DNI, DIF, radiação com rastreamento solar, GHI, GTI e eficiência do rastreamento para a cidade de São José dos Campos (SOLARGIS, 2016). Nota: Dados manipulados pelo autor.	46
Tabela 4.1 – Dados de especificações técnicas do painel selecionado corrigidos com a temperatura de São José dos Campos	66
Tabela 5.1 – Valores de média mensal de insolação em São José dos Campos.	67
Tabela 5.2 – Valores de declinação (graus), angulação da hora do por sol (graus), fotoperíodo (h), insolação média mensal (h), irradiação solar diária incompleta (Ro) e final (Rg) para cada dia do ano.	67
Tabela 5.3 – Ganho de eficiência do rastreamento solar em relação a painel horizontal e a painel inclinado na latitude, utilizando as bases de dados do INPE, NASA E Global Solar Atlas.	79
Tabela 5.4 – Parâmetros de consumo de água aplicados para uma população de 24 pessoas para obtenção do volume de consumo diário.	79
Tabela 5.5 – Cálculo do volume armazenado a partir do volume de consumo.	80
Tabela 5.6 – Obtenção da Energia Útil mensal a partir do volume armazenado.	80

Tabela 5.7 – Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento de módulo estático e resultados obtidos. 82

Tabela 5.8 - Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento de módulo com rastreamento solar e resultados obtidos. 83

Tabela 5.9 - Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento de coletor solar convencional e resultados obtidos. 84

Lista de Abreviaturas e Siglas

DNI	Direct Normal Irradiance (Irradiação Normal Direta)
GHI	Global Horizontal Irradiance (Irradiação Global Horizontal)
GTI	Global Tilted Irradiance (Irradiação Global Inclinada)
TILT	Global Tilted Irradiance (igual ao GTI)
DIF	Irradiação Difusa
LCOE	Levelised Cost of Energy (Custo Nivelado de Energia)
LCOH	Levelised Cost of solar generated Heat (Custo Nivelado de Calor solar)
BoS	Balance of System
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
NASA	National Aeronautics and Space Administration
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1.1	Motivação	20
1.2	Objetivos do trabalho	20
1.2.1	Objetivo geral do trabalho	20
1.2.2	Objetivos específicos do trabalho.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Sistema solar fotovoltaico	21
2.1.1	Situação atual da energia solar fotovoltaica em âmbito internacional	21
2.1.2	Indústria Solar Fotovoltaica	23
2.1.3	Custo do sistema fotovoltaico no mundo.....	23
2.1.4	Sistema fotovoltaico no Brasil	28
2.1.5	Custo do sistema fotovoltaico no Brasil	28
2.1.6	Eficiência do sistema fotovoltaico	29
2.2	Sistema de aquecimento solar térmico.....	30
2.2.1	Situação atual do sistema de aquecimento solar térmico em âmbito internacional .	30
2.2.2	Indústria de aquecimento solar térmico	32
2.2.3	Inovação e futuro da energia solar térmica	32
2.2.4	Desafios da energia solar térmica.....	33
2.2.5	Custos do sistema solar térmico no Brasil e no Mundo.....	34
2.2.6	Eficiência do sistema térmico solar	39
2.3	Comparação do sistema fotovoltaico com o térmico no mundo e no Brasil	40
2.4	Condições geográficas do mundo para aproveitamento solar fotovoltaico	41
2.5	Sistema de rastreamento solar	44

3	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	48
3.1	Modelo Linear de Ångström-Prèscott.....	48
3.1.1	Relação Terra – Sol	48
3.1.2	Declinação.....	50
3.1.3	Ângulo zenital	51
3.1.4	Ângulo horário	52
3.1.5	Fotoperíodo (N) e pôr do sol.....	52
3.1.6	Irradiação e Irradiância Solar no topo da atmosfera.....	52
3.1.7	Irradiação solar global diária no topo da atmosfera	53
3.1.8	Irradiação solar global diária na superfície	53
3.2	Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos com inversor.....	54
3.2.1	Consumo de Eletricidade em Média Mensal	54
3.2.2	Custo de disponibilidade (Mensal).....	54
3.2.3	Energia de Compensação Média Mensal.....	54
3.2.4	Radiação Solar Diária em média anual.....	55
3.2.5	Potência de saída do inversor.....	55
3.2.6	Eficiência média do inversor (Rendimento europeu).....	55
3.2.7	Potência de Entrada no Inversor.....	56
3.2.8	Influência da temperatura na operação	56
3.2.9	Especificações de Módulos Fotovoltaicos	57
3.2.10	Quantidade de módulos no painel.....	57
3.2.11	Tensão máxima de entrada do inversor.....	58
3.2.12	Tensão mínima de entrada do inversor	58
3.2.13	Corrente máxima de entrada do inversor	58
3.2.14	Máximo de módulos em série no inversor	58
3.2.15	Mínimo de módulos em série no inversor.....	59

3.2.16	Máximo de fileiras (strings) em paralelo	59
3.3	Dimensionamento de coletor solar para aquecimento de água	60
3.3.1	Cálculo do volume de consumo	60
3.3.2	Cálculo do sistema de armazenamento	61
3.3.3	Cálculo da demanda de energia útil.....	61
3.3.4	Cálculo da área coletora.....	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1	População de projeto	62
4.2	Consumo de Eletricidade em Média Mensal	63
4.3	Custo de disponibilidade	63
4.4	Dados do inversor	64
4.5	Dados dos módulos dos painéis fotovoltaicos.....	65
4.6	Dados necessários para o dimensionamento do coletor solar	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	Cálculo de radiância global horizontal pela expressão de Ångström-Prèscott	66
5.2	Validação da base de dados do Global Solar Atlas.....	76
5.3	Método de cálculo dos dimensionamentos	79
5.4	Dimensionamento de módulo fotovoltaico estático.....	81
5.5	Dimensionamento de módulo fotovoltaico com rastreamento solar	82
5.6	Dimensionamento de coletor convencional com painel estático.....	84
6	CONCLUSÃO	84
	REFERÊNCIAS.....	86
A	ANEXOS.....	88
A.1	Mapas do mundo com valores das variáveis que contribuem para boas condições de instalação de sistema fotovoltaico.	88

1 Introdução

1.1.1 Motivação

A energia solar é uma energia renovável, limpa, com baixas emissões de CO², com custos decrescentes ao longo do tempo, e a indústria solar está ganhando força com o aumento da consciência da população e dos governos.

As duas maiores tecnologias de conversão de energia solar são a fotovoltaica e a térmica-solar. A primeira converte a luz do sol em eletricidade e a segunda engloba captação solar para aquecimento em edificações e processos industriais.

A motivação principal desse trabalho é responder a seguinte questão:

- No Brasil, de modo geral, em uso residencial, os custos são maiores para gerar energia por painéis fotovoltaicos ou por coletor solar convencional de aquecimento de água?

Além disso, pelo fato de os painéis fotovoltaicos serem mais leves do que os coletores solares e, portanto, permitirem sistemas giratórios de rastreamento solar com menores custos, surgiram as seguintes questões:

- Como dimensionar um sistema de geração de energia com tecnologia de rastreamento solar?
- Um sistema fotovoltaico utilizando sistema de rastreamento solar ficaria mais viável do que um sistema estático de coletor convencional? Em que quantidade?

1.2 Objetivos do trabalho

1.2.1 Objetivo geral do trabalho

O objetivo geral do trabalho é definir metodologia que permita comparar o sistema solar fotovoltaico (estático e giratório) com o sistema térmico solar para aquecimento de água.

1.2.2 Objetivos específicos do trabalho

- Comparar o sistema solar fotovoltaico e o sistema térmico solar em termos de custos, eficiência, indústria e mercado atual, no Brasil e no mundo.
- Apresentar e analisar um software que mostra as regiões do planeta que possuem melhores condições para instalar sistemas fotovoltaicos, baseado em irradiação, temperatura e altitude.
- Calcular o ganho de eficiência do sistema de rastreamento solar para sistemas fotovoltaicos e validar comparando o resultado com modelo teórico linear e bases de dados empíricas.
- Dimensionar um sistema fotovoltaico (estático e giratório) e um sistema térmico solar para um prédio especificado, permitindo assim uma melhor comparação de área utilizada e de custos.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Sistema solar fotovoltaico

2.1.1 Situação atual da energia solar fotovoltaica em âmbito internacional

Em 2016, a capacidade solar fotovoltaica cresceu 75 GW no mundo, equivalente a instalação de mais de 31000 painéis solares por ano. O ganho em 2016 foi maior que a capacidade total acumulada de 2011 e 48% maior que o ganho de 2015. No final do ano, a capacidade global acumulada foi de 303 GW.

A expansão do mercado ocorreu devido ao aumento de competitividade da energia solar fotovoltaica, além do aumento da consciência global do potencial ecológico dessa energia e da crescente demanda por energia elétrica.

Em alguns mercados emergentes, a energia solar fotovoltaica já é competitiva em custos na produção de energia elétrica. No entanto, na maioria dos mercados, ela é movida basicamente por regulações e incentivos do governo.

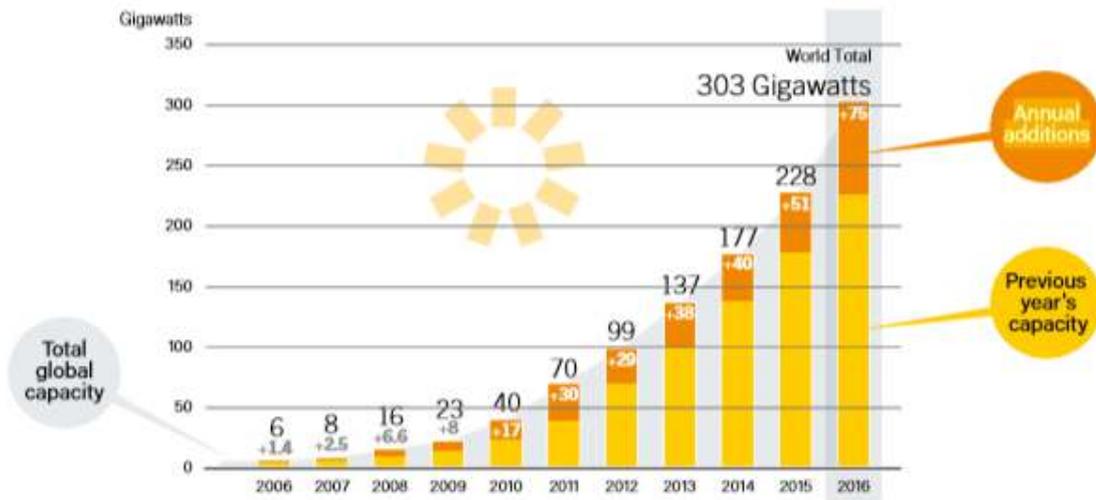


Figura 2.1 – Capacidade Solar Fotovoltaica Global e Adições Anuais, 2006 a 2016 (REN21, 2017)

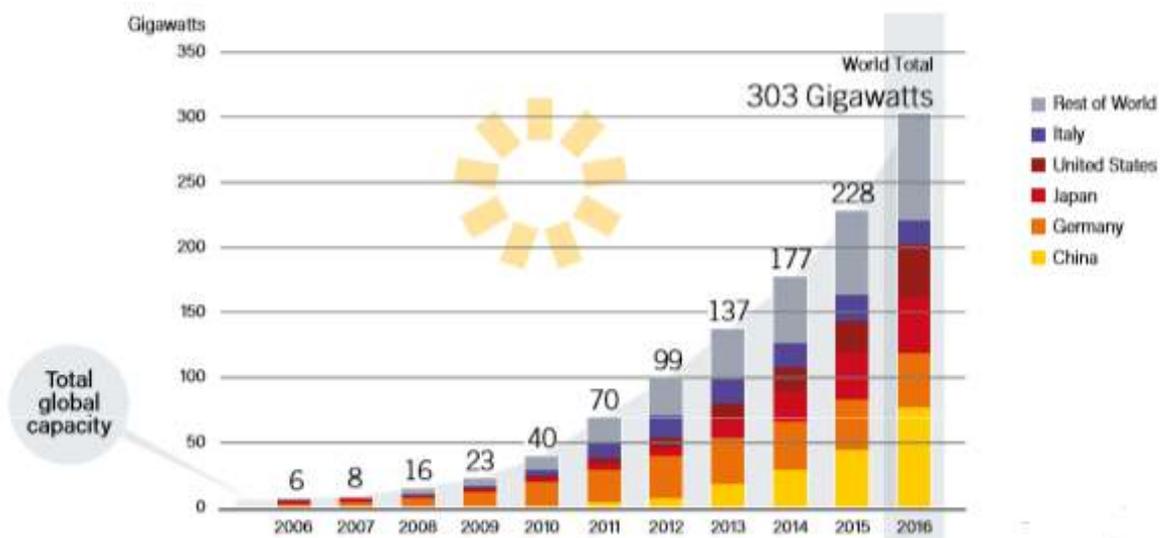


Figura 2.2 – Capacidade Solar Fotovoltaica Global por País e Região, 2006 a 2016 (REN21, 2017)

2.1.2 Indústria Solar Fotovoltaica

Apesar do forte crescimento na demanda em 2016, os preços dos módulos, inversores e sistemas de equilíbrio estrutural caíram de forma jamais vista. Essa queda surgiu por causa de um crescimento maior ainda na capacidade de produção, além de baixas expectativas de mercado para 2017, particularmente na China. O preço médio dos módulos caiu aproximadamente 29%, alcançando um patamar de 0,41\$/W, uma baixa histórica (REN21, 2017).

Custos de operação e manutenção caíram rapidamente em alguns países devido a economias de escala, melhora na performance de inversores, evolução em sistemas de instalação, de rastreamento solar e de limpeza robótica.

A indústria solar fotovoltaica está se tornando competitiva. No entanto, desafios ainda persistem, uma vez que essa indústria é vulnerável a mudanças nas políticas de incentivo ou a medidas de proteção de combustíveis fósseis.

2.1.3 Custo do sistema fotovoltaico no mundo

O custo do sistema fotovoltaico é influenciado pelo local, isso é, locais pouco ensolarados requerem sistemas amplos para gerar eletricidade suficiente, e zonas distantes de zona urbana requerem linhas de transmissões compridas para conectar a energia produzida à rede. Além disso, tipo de tecnologia utilizada, complexidade do sistema e materiais empregados também influenciam os custos (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Para melhor avaliar o custo do sistema, uma análise de seus componentes deve ser feita. Entre eles: célula fotovoltaica, semi-condutor, módulo solar e BoS (Balance of System ou Sistema de Equilíbrio) - que inclui o inversor.

O custo de capital de um sistema fotovoltaico é composto pelo custo do módulo e pelo custo do BoS. O custo do módulo – interconexão de uma matriz de células – é principalmente determinado pelo custo de matéria prima (Silício policristalino). Já o custo do BoS inclui itens como custo do sistema estrutural, custo do sistema elétrico, custo do sistema de desenvolvimento (aquisição do cliente, custos laborais de instalação). Em caso de sistemas desconectados da rede, o custo do sistema de armazenamento/bateria deve ser adicionado (KHETARPAL, 2016).

Component	Costs
Semiconductor	Capital & equipment cost + raw materials (e.g. silicon, saw slurry, saw wire) + utilities + maintenance & labour + manufacturer margin
Cells	Capital & equipment + raw materials (metallization, dopants) + utilities + maintenance & labour + manufacturer margin
Modules	Capital & equipment + raw materials (glass, ethylene vinyl acetate (EVA), metal frame, junction box) + utilities + maintenance & labour + margin + shipping + retailer margin
Inverter	Capital & equipment + raw materials (magnetics, board, enclosures) + power electronics + utilities + maintenance & labour + manufacturer margin
Balance of system / Installation	Mounting + hardware + wiring + design + installation

Figura 2.3 - Separação dos custos dos componentes do sistema fotovoltaico (IRENA, 2015)

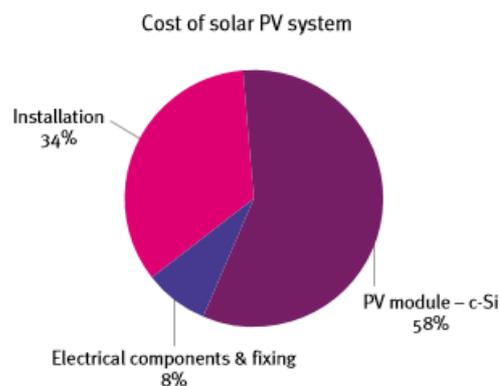


Figura 2.4 – Separação dos custos de investimento do sistema fotovoltaico (RAMOS et al., 2017)

Um conceito relevante para o trabalho em questão é o de LCOE - levelised cost of energy - ou custo nivelado de energia. O LCOE mede o valor presente do custo total de construção e operação de um sistema durante seu ciclo de vida dividido pela energia total produzida pelo sistema durante esse mesmo período. Permite a comparação de diferentes tecnologias.

É importante destacar que o LCOE varia em cada país devido a fatores como insolação, custo de capital do equipamento, custo laboral de instalação, produção e demanda, custo de operação, condições de financiamento, vida operacional do sistema, investimentos específicos, etc.

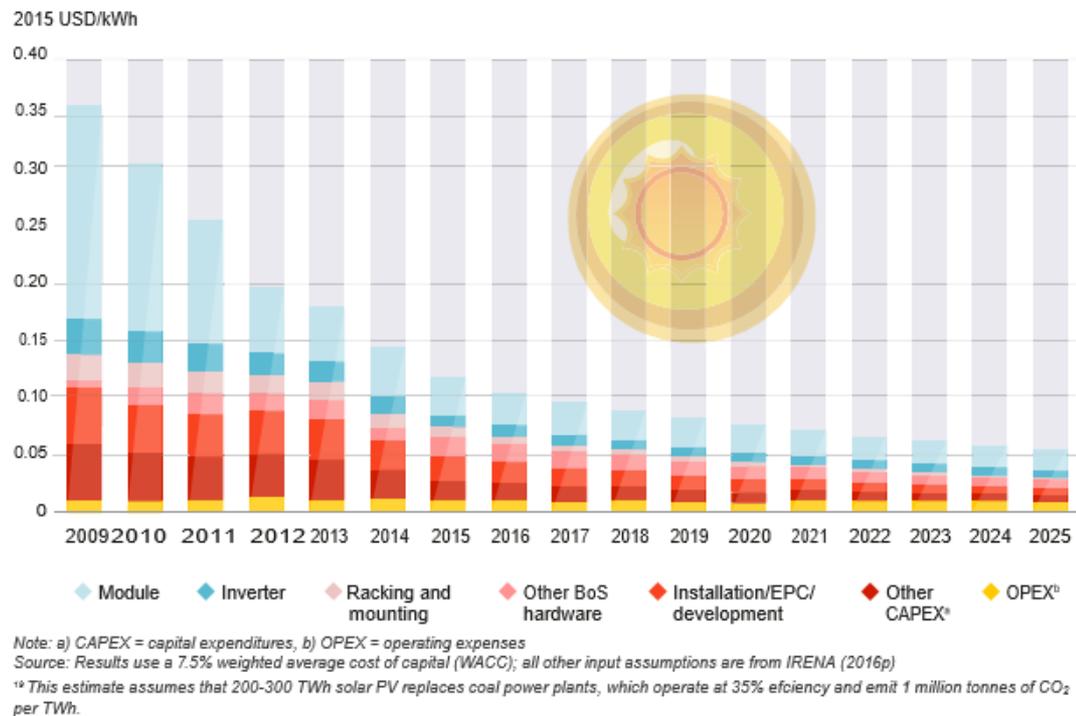


Figura 2.5 – Média ponderada global para sistemas fotovoltaicos em larga escala, dados (2009-2015) e projeções (2016-2025) - (IRENA, 2017).

Nota: USD – United States Dollar. EPC – Engineering, Procurement and Construction. BoS – Balance of system (engloba todos os componentes que não seja o painel).

No ano de 2015, conforme Figura 2.5, pode-se ver que os maiores custos em ordem de importância são: módulo, instalação/desenvolvimento, outros hardwares de BoS, colocação/montagem. O LCOE global estimado nesse ano é 0,12 \$/kWh.

O LCOE é usado como o parâmetro mais relevante para avaliar custo de longo prazo de qualquer fonte de energia. Quando uma fonte de energia renovável atinge um LCOE abaixo do LCOE da produção de eletricidade convencional, ocorre o fenômeno chamado grid parity. O principal objetivo para a energia solar fotovoltaica e termossolar é atingir grid parity sem subsídios governamentais (PAPAEFTHIMIOU; SOULIOTIS; ANDRIOSOPOULOS, 2016).

Dessa forma, os mercados de energia fotovoltaica e térmica solar conseguiriam se tornar independentes e competitivos.

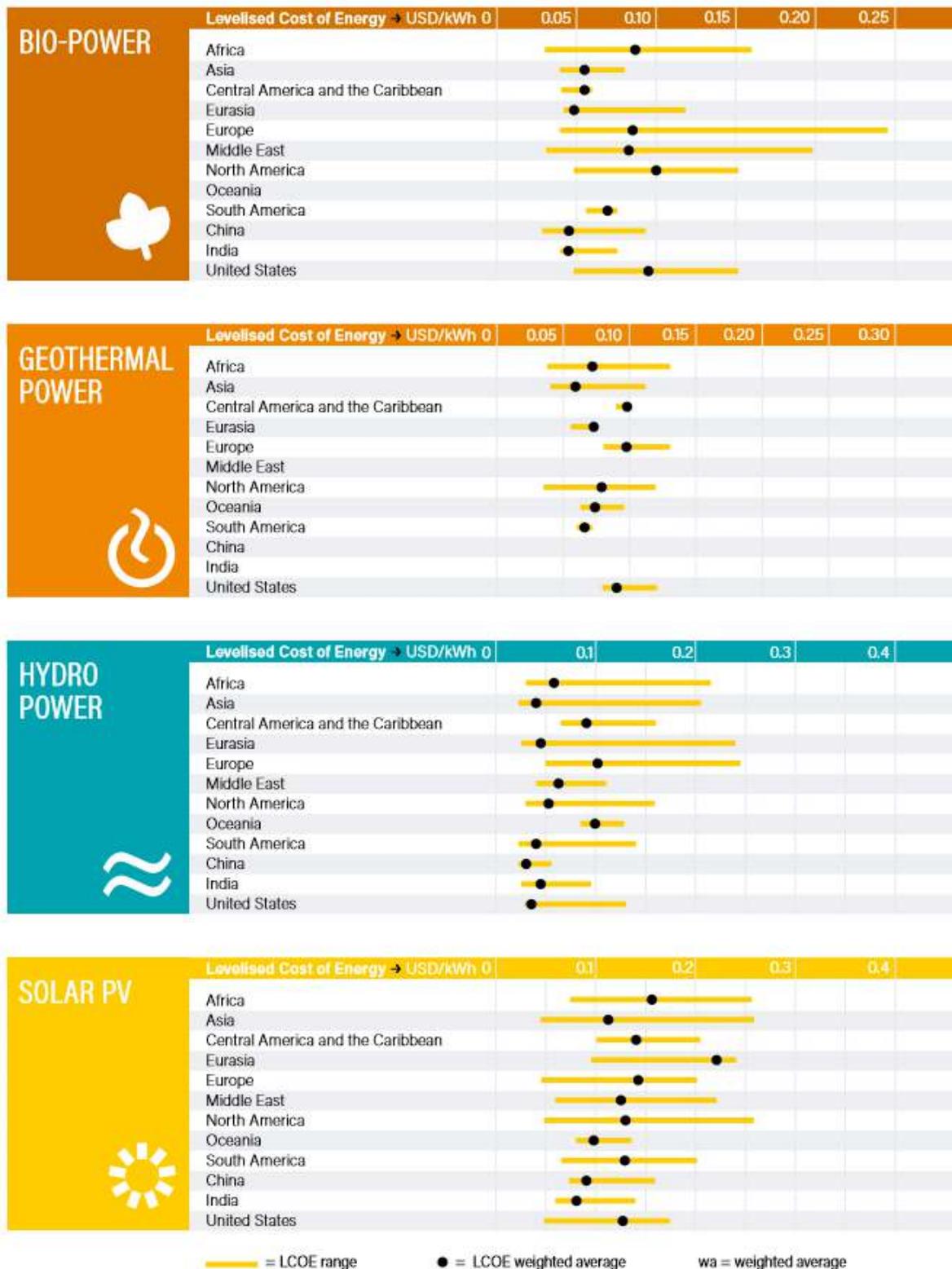


Figura 2.6 – LCOE de 2016 de energias renováveis (IRENA, 2017)

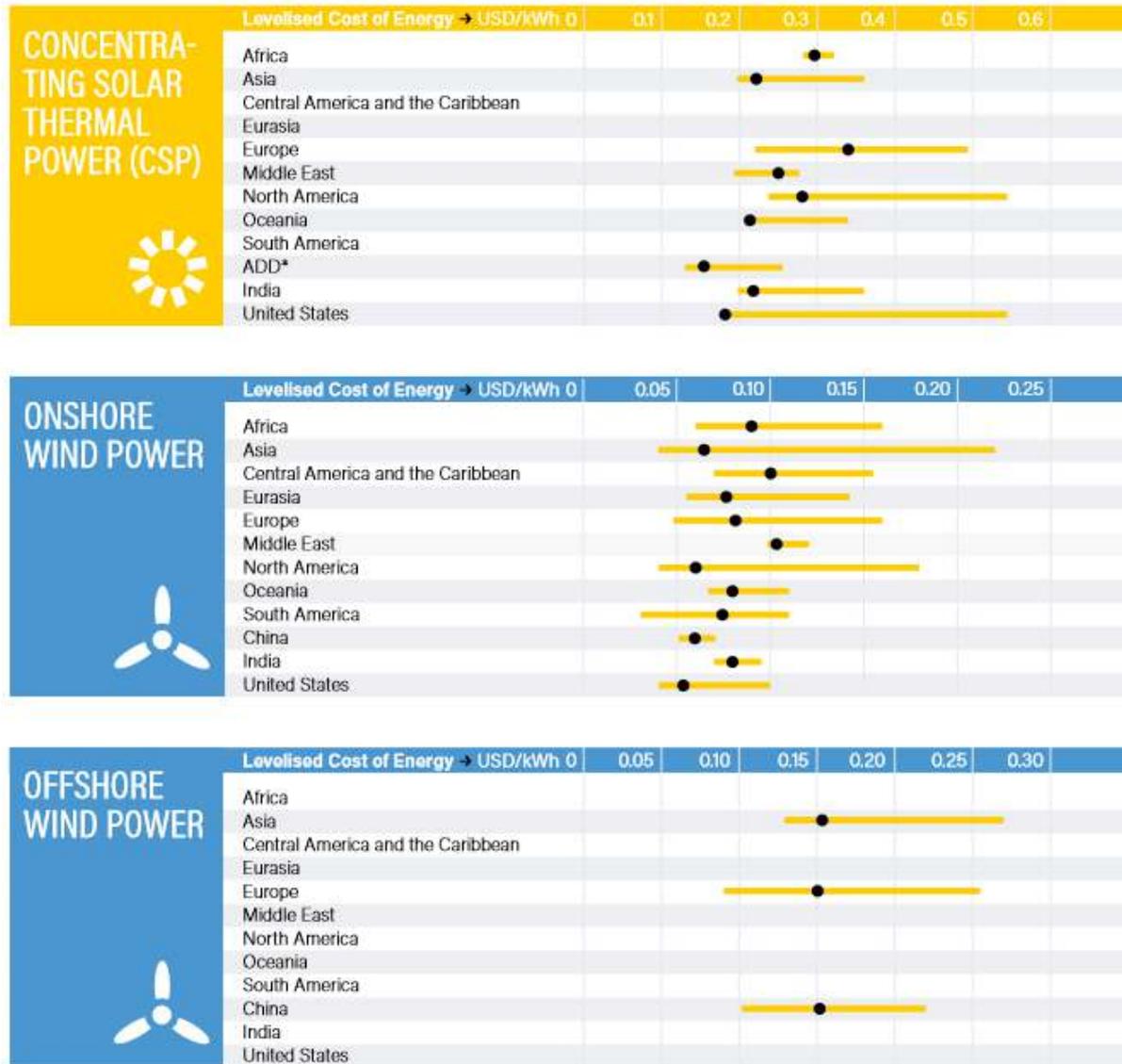


Figura 2.7 – LCOE de 2016 de energias renováveis (IRENA, 2017)

Na Figura 2.6 e Figura 2.7, as análises de custos excluem subsídios e impostos. Pela análise das figuras, pode-se afirmar que a energia solar fotovoltaica possui um LCOE alto de forma global em relação a bioenergia, eletricidade geotérmica e energia eólica na costa, indicando uma fraqueza comparativa no mercado fotovoltaico, que ainda precisa de subsídios e políticas fiscais do governo para continuar crescendo. Mas vale notar que há evidências da aceleração na convergência dos custos de sistemas solares fotovoltaicos para níveis mais competitivos.

2.1.4 Sistema fotovoltaico no Brasil

O Brasil, possuía ao final de 2016, 81 MWp de energia solar fotovoltaica instalados, o que representa cerca de 0,05% da capacidade instalada total no país (NASCIMENTO, 2017).

Apesar da baixa utilização da energia fotovoltaica, o país possui satisfatórios níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar importante vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares.

O principal obstáculo para incrementar o uso de painéis de geração solar fotovoltaica em unidades consumidoras, principalmente residenciais e comerciais de pequeno porte, consiste no alto investimento inicial associado à aquisição dos sistemas de geração.

Apesar de o BNDES oferecer linhas atrativas de financiamento para empreendimentos de maior porte, isso não ocorre com empreendimentos de pequeno porte, especialmente aqueles implantados por pessoas físicas. Nesse sentido, seria recomendável a criação, pelos bancos oficiais, de linhas de crédito com condições favoráveis para financiamento da aquisição de sistemas de geração solar fotovoltaica. A Tabela 2.1 reafirma, com dados, a baixa utilização da energia fotovoltaica no país.

Tabela 2.1 – Capacidade de geração em 2015 (em MW) e eletricidade gerada no ano de 2014 e 2015 (em GWh) para energias renováveis (IRENA, 2017) e (IEA SHC, 2016). Nota: dados manipulados pelo autor.

	Total		Hidrelétrica		Eólica		Solar		BioEnergia	
	(MW)	(GWh)	(MW)	(GWh)	(MW)	(GWh)	(MW)	(GWh)	(MW)	(GWh)
Brasil 2014		430 940		373 439		12 210		61		45 229
Brasil 2015	116 687	429 548	92 062	359 743	8 715	21 626	23	59	15 887	48 120

2.1.5 Custo do sistema fotovoltaico no Brasil

A baixa produção e utilização da energia fotovoltaica no Brasil e nos demais países da América do Sul refletem num LCOE alto. Conforme a Tabela 2.2, a energia solar fotovoltaica na América do Sul apresenta um LCOE médio ponderado maior do que o de outras energias renováveis, como bioenergia, hidrelétrica, eólica e geotérmica.

Tabela 2.2 – LCOE, Custo de Implementação e Fator de Capacidade de energias renováveis em 2016 na América do Sul (IRENA, 2017). Nota: Dados manipulados pelo autor.

América do Sul	LCOE min (\$/kWh)	LCOE max (\$/kWh)	Média Pond. de LCOE (\$/kWh)	Custo de implementação (\$)	Fator de Capacidade
Bioenergia	0,06	0,075	0,07	1433	0,53
Eletricidade Geotérmica	0,06	0,07	0,065	3587	0,82
Hidrelétrica	0,025	0,14	0,04	1755	0,61
Solar Fotovoltaica	0,065	0,2	0,13	2477	0,24
Energia Eólica na Costa	0,03	0,11	0,075	1912	0,53

A produção de energia solar fotovoltaica no Brasil está abaixo da média da produção na América do Sul (IEA, 2017). Com isso, pode-se estimar que o LCOE de energia fotovoltaica no país esteja entre a média ponderada e o LCOE max, isto é, o LCOE de energia fotovoltaica do país está entre 0,13 e 0,2 \$/kWh. Vale lembrar que os LCOE's apresentados não incluem subsídios e taxas de impostos.

2.1.6 Eficiência do sistema fotovoltaico

A eficiência das células solares depende da temperatura, irradiação solar e poeira. A temperatura pode afetar drasticamente a célula e, devido a esse fato, estudos têm se concentrado na redução da temperatura por meio da extração de calor, que pode ser utilizado para outros fins, como aquecimento de água ou aquecimento de ar. Para o problema do pó, é aconselhável que a superfície do módulo fotovoltaico seja limpa com frequência para manter o desempenho, uma vez que o acúmulo de poeira pode bloquear a irradiação nos módulos. Esse bloqueio não é interessante, pois quanto menor a irradiação, menor é a eficiência da célula, uma vez que uma quantidade reduzida de fótons alcançam (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Num experimento anual de Pandey (2015), na Índia, a eficiência média de um sistema fotovoltaico resultou em 22,16%; 22,53%; 20,52%; 19,54%; 19,52%; 18,53%; 21,16%; 21,95%; 22,37%; 21,15% e 16,98% para cada um dos meses do ano, respectivamente, pulando o mês de Novembro.

Em um módulo fotovoltaico convencional, 90% da luz solar é absorvida, mas apenas aproximadamente 15% disso é convertido em energia útil (RAMOS et al., 2017).

Painéis fotovoltaicos instalados no telhado de uma casa solar em Wuhan, China, com inclinação de 25° e 26 m² de área total, para irradiações insuficientes no inverno apresentaram eficiência de conversão de 9,8% (CHANG et al., 2015).

A luz do sol é absorvida por células fotovoltaicas e a energia solar é convertida para energia elétrica com uma eficiência de conversão de 15 a 25% (BLAKERS, 2015).

A eficiência de células solares de Silício cristalino está entre 14 a 19% para tecnologia baseada em impressão de tela dos contatos metálicos – mais difundida – e está cerca de 23% para tecnologias de preços mais elevados. As melhores células desenvolvidas em laboratório apresentam eficiências de 25 a 26%, comparadas com um máximo teórico de 29% (SCHMALENSEE, 2015).

A eficiência de células de Silício cristalino (c-Si) comercialmente disponíveis está na faixa de 21% a 23%, sendo que o limite teórico é 29% (IRENA, 2017).

2.2 Sistema de aquecimento solar térmico

2.2.1 Situação atual do sistema de aquecimento solar térmico em âmbito internacional

A tecnologia de aquecimento solar térmico está presente em todas as regiões do mundo e providencia água quente, aquecimento e resfriamento do ar, calor, vapor e refrigeração para processos industriais e culinária comercial, além de secar produtos.

Nas últimas 5 décadas, a principal aplicação da tecnologia solar térmica era para aquecimento de água em residências uni-familiares. Em anos recentes, no entanto, o mercado esteve transicionando para sistemas de larga escala para aquecimento de água em construções multi-familiares, no setor de turismo e no setor público. Em 2015, 63% dos coletores instalados foram para o segmento residencial e 29% para o segmento comercial. No mesmo ano, na América Latina, 52% das instalações foram utilizadas para aquecimento de piscina. (REN21, 2017).

A capacidade acumulada de coletores com cobertura vítrea (placa plana e tubo a vácuo) e sem cobertura vítrea aumentaram para um total de 456 GW-térmico em 2016, conforme a Figura 2.8.

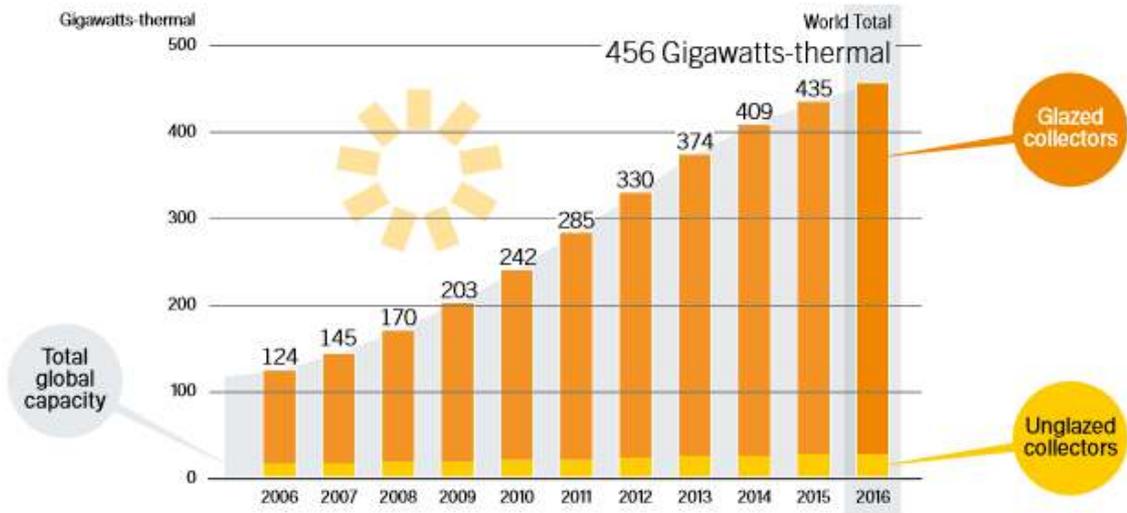


Figura 2.8 – Capacidade global de coletores de aquecimento solar térmico, 2006-2016 (REN21, 2017).

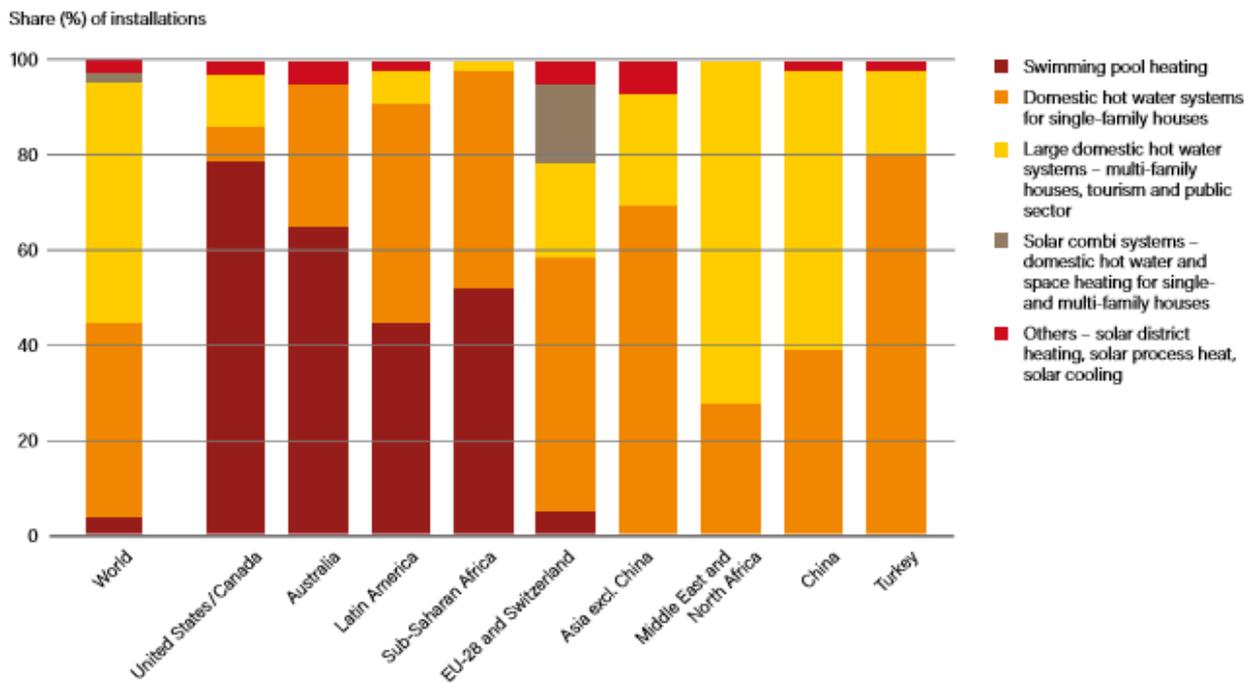


Figura 2.9 – Aplicações dos coletores térmico solares, por região econômica, 2015 (REN21, 2017).

2.2.2 Indústria de aquecimento solar térmico

A produção de energia solar térmica experienciou rápido aumento no mundo nas décadas de 80 e 90, alcançando 887 GWh em 1998, mas estagnou nos anos seguintes. O crescimento anual médio dessa produção foi praticamente zero de 1999 a 2006, e devido a um recente e revigorado interesse no setor solar térmico, os EUA aumentaram sua produção de 527 GWh em 1999 para 5333 GWh em 2016 (IEA, 2017).

Em 2016 a demanda dos proprietários - principal cliente para o segmento de vendas da indústria solar térmica - caiu e os instaladores mostraram menos interesse na tecnologia solar térmica. Para combater essa queda de demanda, quantidades crescentes de produtores de coletores solares mudaram suas linhas de produto e estratégias de venda. Muitos produtores diversificaram o portfólio e tomaram novas direções, como adição de bombas de calor e soluções fotovoltaicas, por exemplo.

Além disso, o apoio de políticas públicas para aquecimento e refrigeração por energias renováveis como um todo manteve-se muito abaixo do apoio para outros setores. No geral, apesar dos desafios contínuos para os mercados de aquecimento e refrigeração por energias renováveis em 2015, houve sinais internacionais de que a conscientização e o apoio político para tecnologias relacionadas podem estar crescendo (REN21, 2016).

Fatores importantes que influenciam o mercado solar térmico são o custo de alternativas locais (petróleo, gás, carvão, biomassa, eletricidade, etc.), as características da infra-estrutura energética local e a economia de setores industriais-chave, como a construção (RAMOS et al., 2017).

2.2.3 Inovação e futuro da energia solar térmica

Existe urgência para reduzir custos do sistema solar térmico e melhorar sua performance.

Muitas inovações para o sistema solar térmico estão a caminho:

- Materiais poliméricos estão sendo usados na parte de absorção dos módulos, o que reduz o custo dos módulos devido a custos de matéria prima e de produção, além de deixar os coletores mais leves.
- Desenvolvimentos tecnológicos ainda são necessários para fazer aplicações térmicas solares entre 250°C e 400°C comercialmente viáveis. Isso requer o desenvolvimento de coletores de alta eficiência com recursos avançados para melhor transferência de calor, como coberturas

transparentes com revestimentos anti-reflexivos para alta transmissão óptica, revestimentos comutáveis para reduzir as temperaturas de estagnação, novos materiais absorventes com revestimentos de baixa emissão, materiais super isolantes resistentes à temperatura e uso de alto vácuo ou gases nobres.

- Controle e monitoramento automático e avançado podem ser usados para garantir o desempenho esperado a longo prazo dos sistemas, fornecer estratégias de resposta à demanda, ao mesmo tempo em que reduzem os custos de manutenção. Quando um sistema solar-térmico falha, desempenha aquém do esperado ou a irradiância é muito baixa, a energia térmica é freqüentemente fornecida a partir de um sistema de backup que geralmente depende de fontes de energia convencionais. O monitoramento das taxas de fluxo, temperaturas e dados meteorológicos é necessário para avaliar o desempenho do sistema e para prever possíveis falhas. Além disso, a operação do sistema solar pode ser ajustada de acordo com previsões meteorológicas e estatísticas de comportamento do usuário, conseguindo um ótimo resultado que maximiza as economias.

- O desenvolvimento do mercado e a inovação podem reduzir o alto custo inicial do coletor (~15%) e de outros componentes do sistema (BoS). Componentes hidráulicos padronizados, conexões e conceitos de "plug and function" têm o potencial de melhorar os modelos de instalação, reduzindo custos e melhorando a confiabilidade dos sistemas (RAMOS et al., 2017).

2.2.4 Desafios da energia solar térmica

Os sistemas solares têm capacidade de adaptação e flexibilidade limitada, uma vez que requerem projetos específicos para diferentes edifícios, comportamento do usuário (perfil da demanda) e clima. Existem também limitações técnicas associadas à ampliação dos sistemas e aos componentes associados às aplicações térmicas e fotovoltaicas. Por exemplo, os resfriadores acionados termicamente geralmente não excedem uma capacidade de refrigeração de 20 kW, o que requer cerca de 60 m² de área do telhado para coletores solares térmicos, limitando suas aplicações (RAMOS et al., 2017). Assim, a integração de tecnologias solares em sistemas de energia mais amplos geralmente é um desafio.

2.2.5 Custos do sistema solar térmico no Brasil e no Mundo

Para análise de custos do sistema solar térmico, é importante mencionar o termo LCOH (Levelised Cost of solar thermal generated Heat) ou custo nivelado de calor termossolar, que é análogo ao termo LCOE (ver item 2.1.3), porém calcula o custo por unidade de calor produzida ao invés de energia.

O Brasil apresenta desempenhos impressionantes no setor de sistema solar térmico em níveis globais. Em 2015, os cinco maiores países em capacidade acumulada de energia solar térmica foram a China, Turquia, Brasil, Índia e os Estados Unidos. O Brasil continuou a ocupar o terceiro lugar pelas novas instalações e permaneceu como o maior mercado da América do Sul. Em 2016, o Brasil adionou 0,91 GWth (1,3 milhões m²) em instalações termossolares. A diminuição do mercado solar térmico do Brasil foi relativamente pequena (-7%), considerando as crises econômicas e políticas em andamento do país e a desaceleração do programa de habitação social Minha Casa Minha Vida, que exigia coletor solar térmico para aquecimento de água em edifícios novos para famílias muito pobres. Além disso, o poder de compra reduzido resultou numa queda de 10% nas vendas de coletores sem cobertura vítrea para piscinas (REN21, 2017).

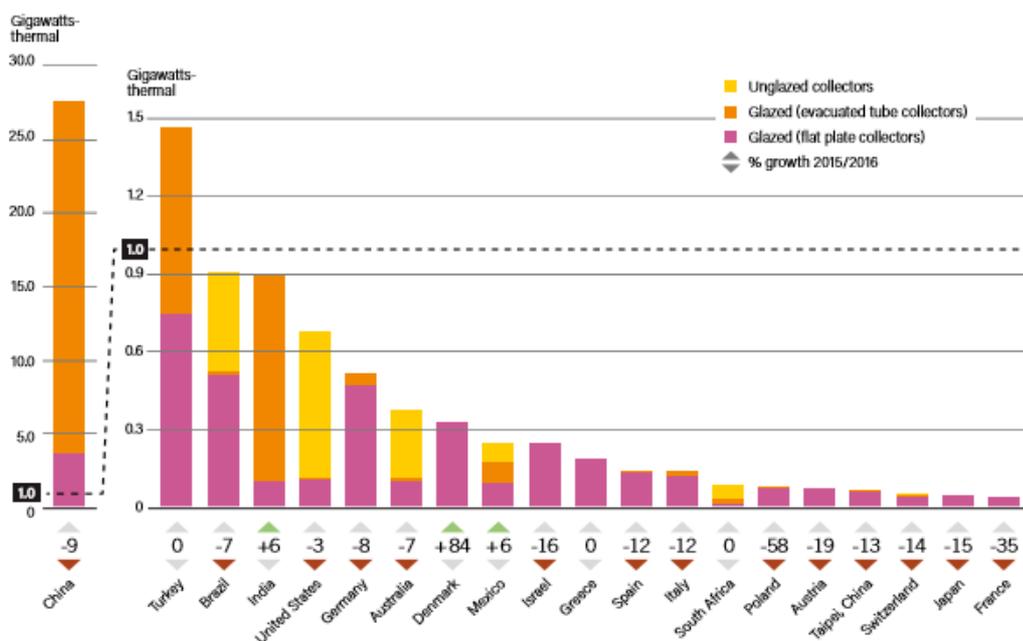


Figura 2.10 – 20 maiores países em capacidade solar térmica para aquecimento de água, 2016

(REN21, 2017)

A Tabela 2.3 apresenta a produção total do país de coletores solares para aquecimento de água com e sem cobertura vítrea do ano de 2015 e adições do ano de 2016.

Tabela 2.3 – Capacidade total no fim de 2015 de coletores solares de aquecimento de água e adições na capacidade em 2016 no Brasil (REN21, 2017).

	TOTAL fim de 2015			Adições de 2016		
	GWth			MWth		
	Com vidro	Sem vidro	Total	Com vidro	Sem vidro	Total
Brasil	5,7	3	8,7	530	384	1467

A água quente gerada por sistemas térmicos solares domésticos de pequena escala em todo o mundo custa 0,11-0,32 \$ por kWh, dependendo da localização. Isso é comparável ao LCOE do sistema fotovoltaico de 0,10-0,40 \$ por kWh. O custo do sistema na Europa, incluindo a instalação, varia de 1100 \$ por m² em mercados maduros a 2300 \$ por m² em mercados menos maduros. O preço da energia solar-térmica diminui para US \$ 0,04-0,09 por kWh para grandes instalações térmicas solares. O custo de capital dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede residencial é entre 280 \$ e 850 \$ por m², no entanto, uma queda no investimento de capital para pequenas instalações fotovoltaicas em áreas urbanas foi observada devido à diminuição dos preços dos módulos, que representam até 40% de o custo total (REN21, 2017).

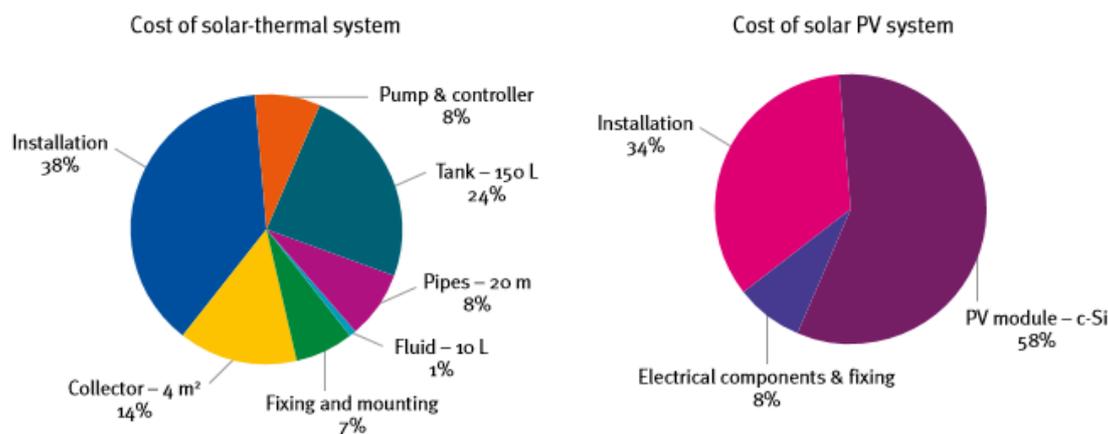


Figura 2.11 – Separação dos custos de investimento - incluindo instalação - do sistema térmico solar (esquerda) e do sistema fotovoltaico (direita). Preços são de especulação de varejistas do Reino Unido (RAMOS et al., 2017).

Os LCOH's mais baixos para aplicações domésticas no mundo em 2016 foram (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017):

- ~1 €-ct/kWh para sistemas de aquecimento de piscinas (Austrália, Brasil);
- 2 a 4 €-ct/kWh para pequenos sistemas domésticos de água quente com termosifão (Brasil, Índia, Turquia);
- 7 a 8 €-ct/kWh para pequenos sistemas domésticos de água quente com bombeamento (Austrália, China);
- 3 €-ct/kWh para pequenos sistemas combinados de água quente e aquecimento de ambiente (Brasil).

O Brasil se destaca em nível global em termos de custos para sistemas de aquecimento térmicos solares.

A análise dos sistemas dinamarqueses de aquecimento de energia solar em larga escala mostra que as economias de escala permitem um enorme potencial de redução de custos: enquanto o LCOH médio para pequenas aplicações domésticas na Dinamarca varia entre 18,5 €-ct / kWh para sistemas combinados de água quente e aquecimento do ar (residências unifamiliares) e 12,1 €-ct / kWh para sistema de água quente doméstico multifamiliar, o LCOH médio para sistemas de grande escala (> 10 000 m²), incluindo o custo de armazenamento diário, cai para 3,6 €-ct / kWh. Para sistemas ainda maiores (> 50,000 m²) com armazenamento sazonal anexado, um LCOH de 4,9 €-ct / kWh é alcançado (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15 e Figura 2.16 apresentam valores de LCOH e de custos por área para diferentes aplicações de sistemas térmico solares e para diferentes países, com o Brasil incluso. Os dados de custo são expressos em euro por metro quadrado de área bruta dos coletores [€ / m²gross] e referem-se aos preços do usuário final (cliente), excluindo o imposto sobre o valor agregado e os subsídios.

Nas cinco figuras abaixo, os custos específicos dos sistemas térmico solares em € / m²gross estão apresentados numa faixa de valores, que estão destacados nas caixas azuis. O LCOH correspondente em €-ct / kWh é mostrado também numa faixa de valores, que está destacado nas faixas sombreadas com um diamante verde dentro - que indica o valor médio de LCOH.

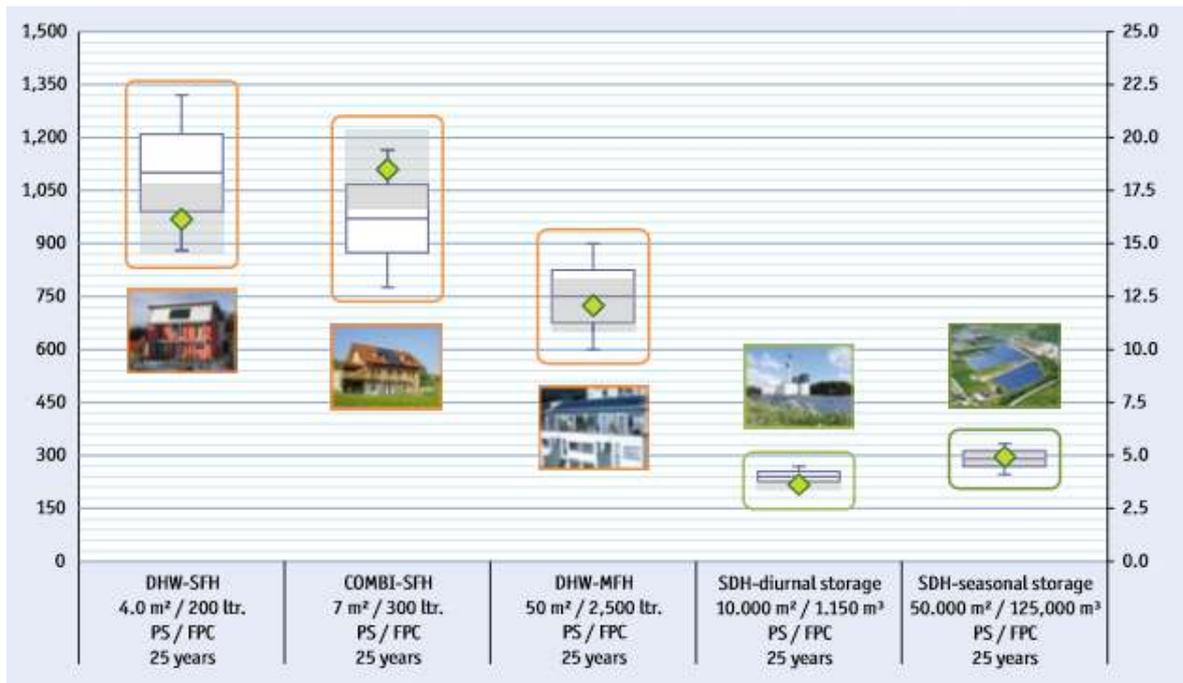


Figura 2.12 – Custos de investimento específicos e LCOH para diferentes aplicações térmicas-solares na Dinamarca - laranja: sistemas domésticos de pequena escala, verde: aplicações comerciais em grande escala (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

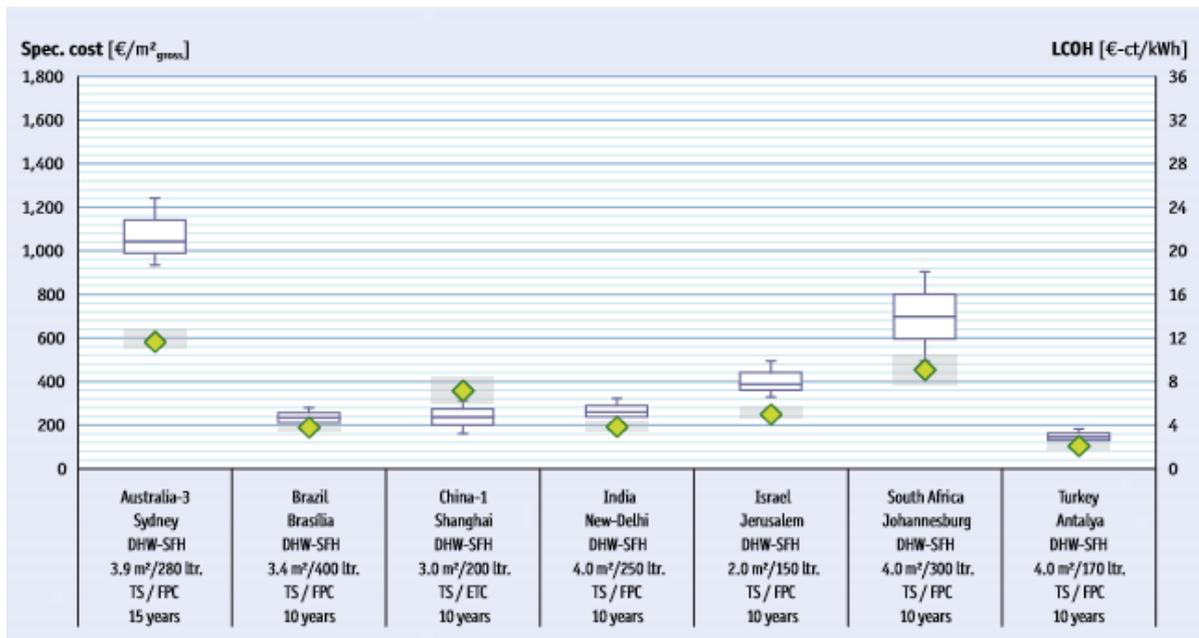


Figura 2.13 – Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas domésticos unifamiliares de água quente com termosifão (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

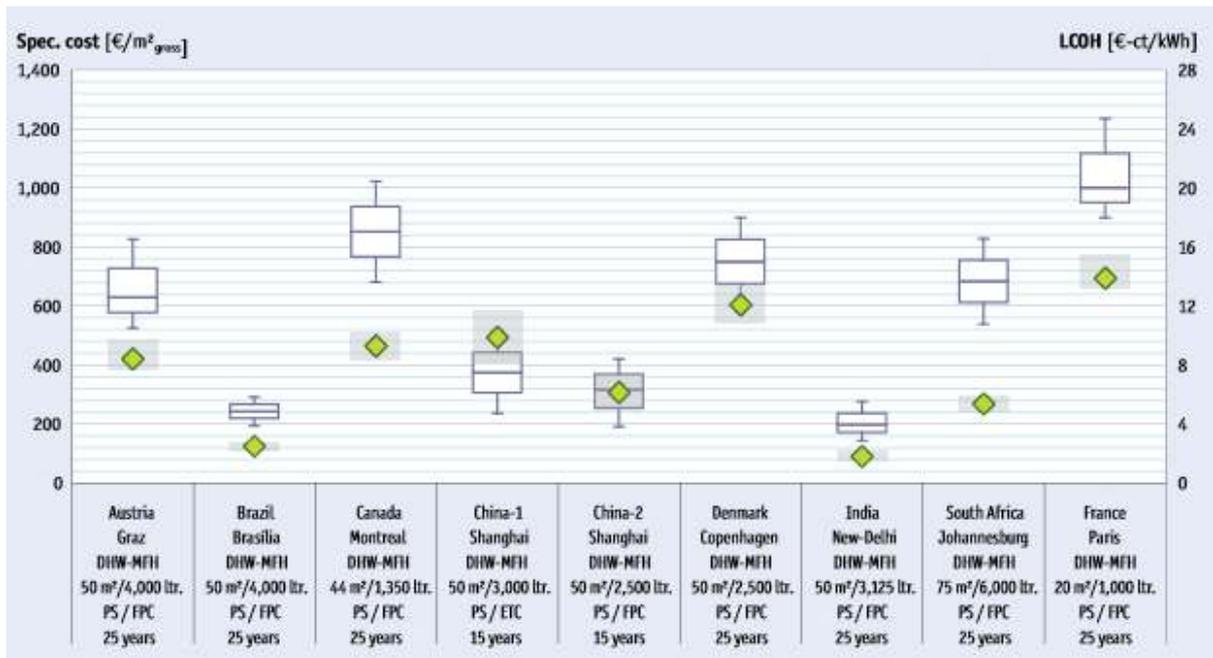


Figura 2.14 - Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas domésticos multifamiliares de água quente com bombeamento (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

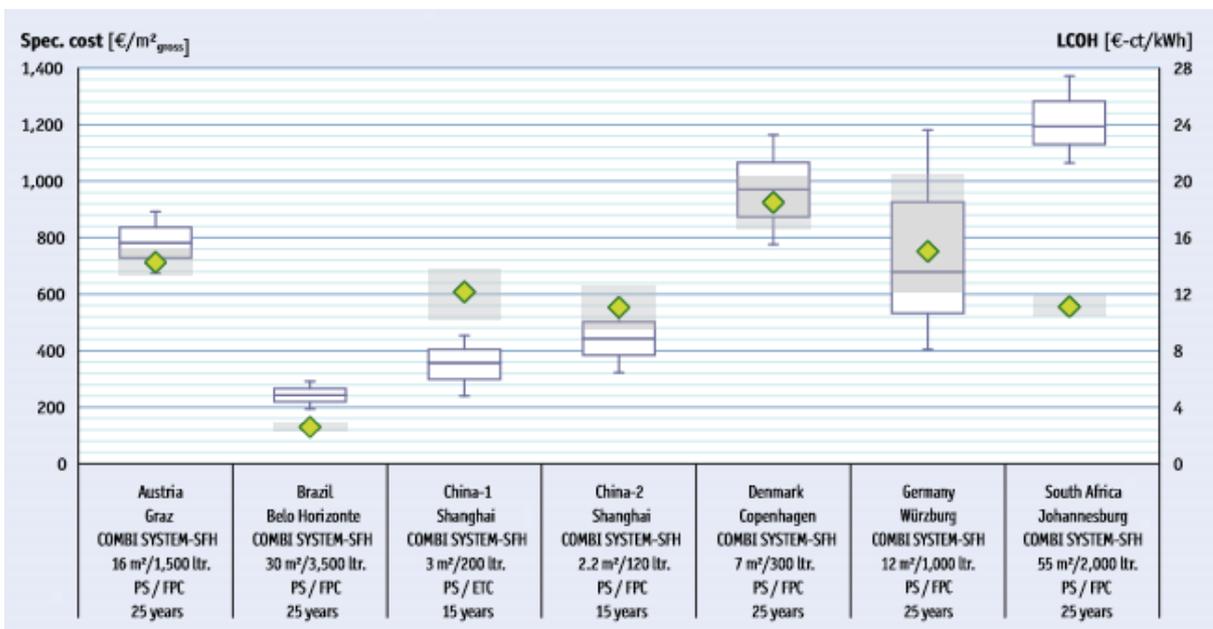


Figura 2.15 - Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas combinados de água quente e aquecimento de ambiente - residências unifamiliares (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

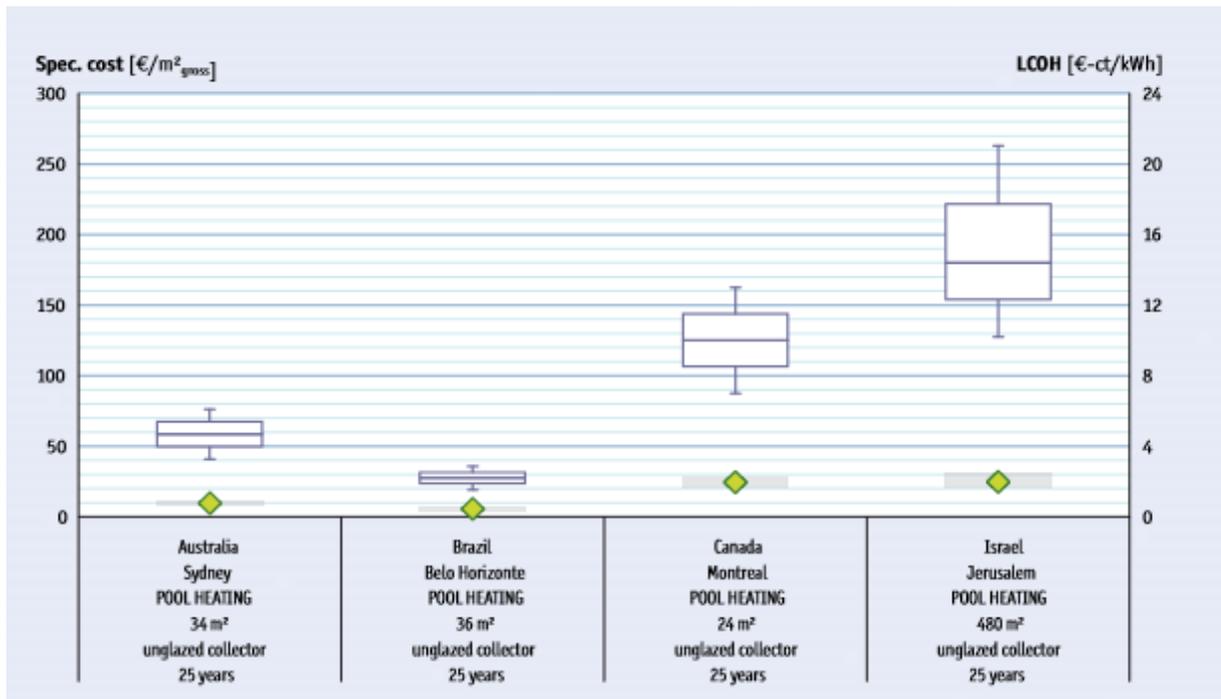


Figura 2.16 - Custos de investimento específicos e LCOH para sistemas de aquecimento de piscina (WEISS; SPÖRK-DÜR; MAUTHNER, 2017).

Sistema de aquecimento de piscina é o sistema de aquecimento de água mais econômico.

A vida-útil desses sistemas de aquecimento estão entre 10 a 15 anos dependendo da qualidade do sistema. Os valores do LCOH das cinco figuras foram calculados com base nesse tempo de vida útil.

2.2.6 Eficiência do sistema térmico solar

Um experimento de um ano de Lenz (2017) com coletor solar de placa plana de 1 m² apresentou eficiências mensais que variaram de 33,7 a 53,54%, com valor médio de 45,9%.

Os coletores solares térmicos podem fornecer calor em uma ampla gama de temperaturas com eficiências de conversão solar na faixa de 40 a 70%. Além disso, os sistemas domésticos estão bem estabelecidos e comercialmente maduros, com eficiências de coletor muitas vezes excedendo 75% (RAMOS et al., 2017).

Um sistema de aquecimento de água com tanque de 450 L, com coletor de 6,69 m² de área e com irradiação média recebida de 358 W/m² durante um dia, apresentou eficiência térmica de 37,2%, conforme Chang (2015).

Sistemas térmicos solares apresentam eficiências de 2 a 6 vezes maiores do que eficiências de sistemas fotovoltaicos. Isso deve-se ao fato da conversão direta de energia solar para aquecimento envolver menos perdas do que a conversão de energia solar para eletricidade.

2.3 Comparação do sistema fotovoltaico com o térmico no mundo e no Brasil

Em 2010, a indústria solar térmica era mais forte competitivamente em termos de custos do que a indústria solar fotovoltaica, mas de 2010 a 2016, a indústria solar fotovoltaica cresceu muito, a ponto de se tornar mais forte competitivamente do que a indústria solar térmica. Para sistemas de larga escala, a indústria solar fotovoltaica já está ficando competitiva com os combustíveis fósseis em algumas regiões.

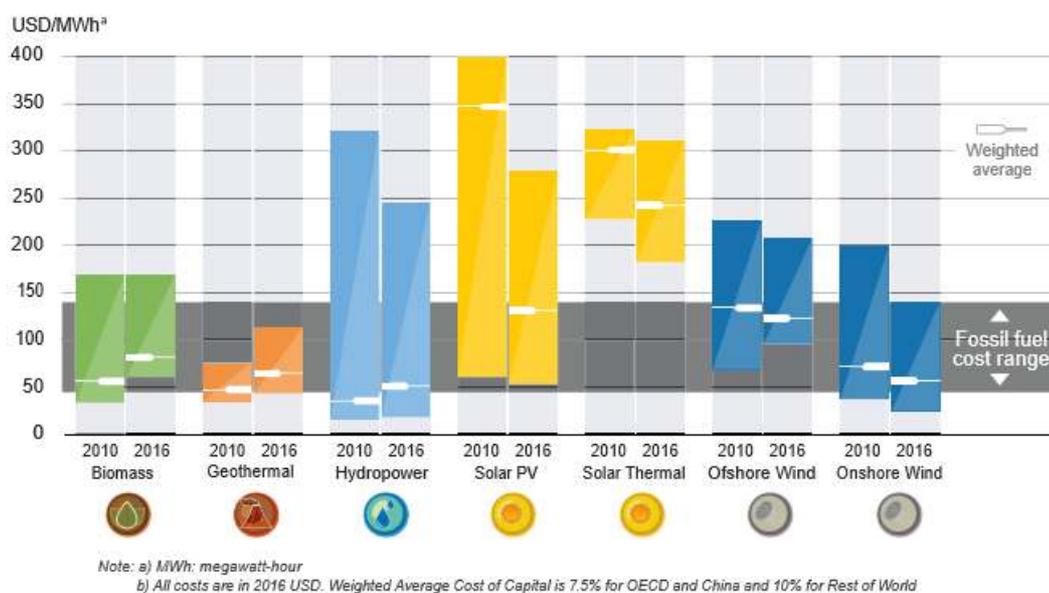


Figura 2.17 – LCOE (custo nivelado de energia) para sistemas de larga escala no mundo, faixas e médias ponderadas, 2010 e 2016 (IRENA, 2017).

No entanto, o Brasil segue um caso particular, porque no país a indústria térmica solar ainda é muito mais forte do que a solar fotovoltaica. O LCOE para energia solar térmica no país é por volta de 0,01 a 0,04 € (0,012 a 0,047 \$), enquanto o LCOE para energia solar fotovoltaica no país está na faixa de 0,13 a 0,2 \$, uma faixa de valores muito mais onerosa (dados retirados do item 2.1.5). Vale lembrar que não estão incluídos subsídios e impostos nas comparações.

A indústria térmica solar no país também possui mais mão de obra especializada e gera cerca de dez vezes mais empregos (41 mil) do que a indústria solar fotovoltaica (4 mil), esses dados são do ano de 2015 (REN21, 2016).

	Mundo	China	Brasil	Estados Unidos	Índia	Japão	Bangladesh	União Europeia ¹		
								Alemanha	França	Resto da UE
MILHARES DE EMPREGOS										
 Solar FV	2.772	1.652	4	194	103	377	127	38	21	84
 Biocombustíveis líquidos	1.678	71	821 ^c	277 ^a	35	3		23	35	47
 Energia eólica	1.081	507	41	88	48	5	0.1	149	20	162
 Aquecimento/refrigeração solar	939	743	41 ^d	10	75	0.7		10	6	19
 Biomassa sólida ^{a,d}	822	241		152 ^b	58			49	48	214
 Biogás	382	209			85		9	48	4	14
 Hidrelétrica (pequena escala) ^b	204	100	12	8	12		5	12	4	31
 Energia geotérmica ^a	160			35		2		17	31	55
 CSP	14			4				0.7		5
Total	8.079^a	3.523	918	769	416	388	141	355^l	170	644^k

Figura 2.18 – Estimativa de empregos diretos e indiretos em energia renovável no mundo, por setor (REN21, 2016).

2.4 Condições geográficas do mundo para aproveitamento solar fotovoltaico

Será feita análise no Global Solar Atlas (2016), um atlas que suporta o desenvolvimento da energia solar na fase de exploração, prospecção, escolha de local e pré-avaliação de viabilidade. Esse atlas fornece séries de 1999-2015 de médias de radiação solar (global, difusa e direta), fator principal para geração de energia fotovoltaica. Para as tecnologias fotovoltaicas, são necessárias análises de GHI (Global Horizontal Irradiation) – radiação recebida pela superfície de módulos fotovoltaicos horizontais - ou de GTI (Global Tilted Irradiation) – radiação recebida pela superfície de módulos inclinados. Além disso, a Temperatura do Ar é a segunda variável climática mais importante na determinação da eficiência dos sistemas fotovoltaicos. A eficiência de uma célula solar de Silício cai 0,4% por °C de aumento em relação a 25 °C (RAMOS et al., 2017). Outra variável importante para a eficiência de sistemas é a Elevação do Terreno.

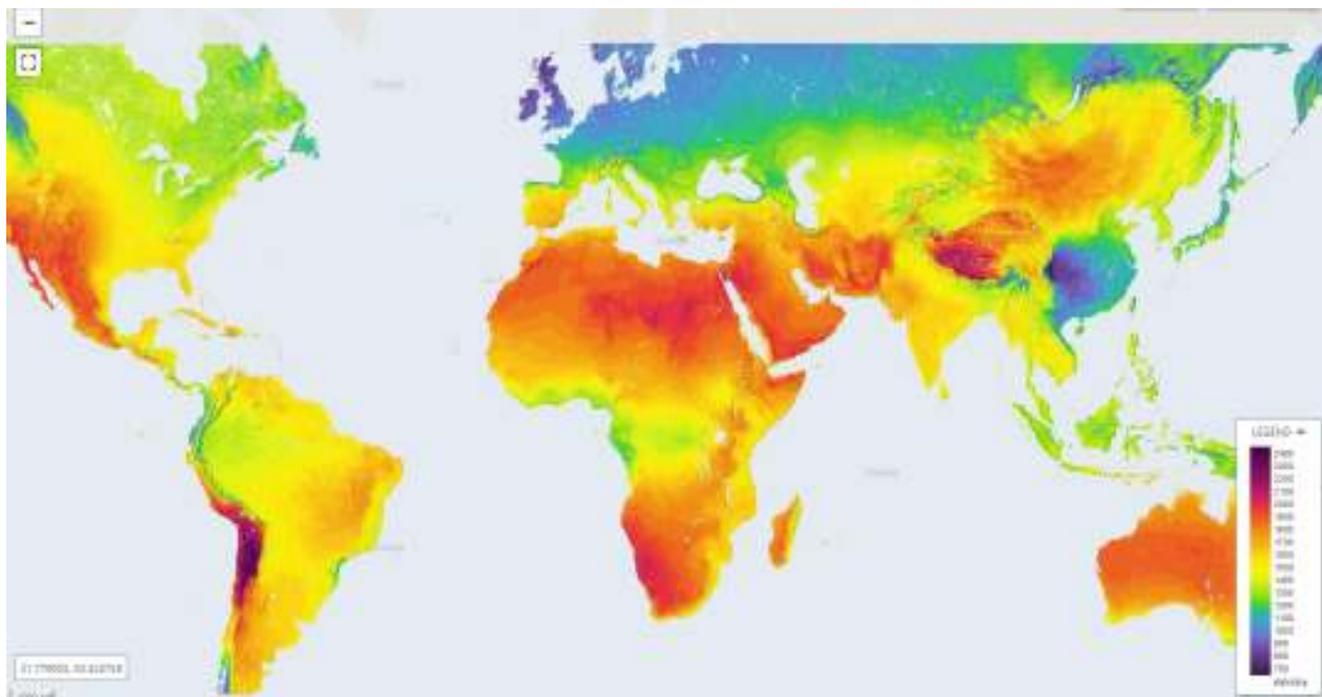


Figura 2.19 – Resultado da avaliação no mundo do fator de rendimento fotovoltaico com base na localidade – valores da legenda em kWh/kWp (SOLARGIS, 2016)

A maior parte das regiões no mundo com alto rendimento fotovoltaico (em roxo e vermelho na Figura 2.19) são regiões com baixa densidade populacional, devido a existência de desertos ou a altitudes muito elevadas, o que torna inviável a aplicação da tecnologia fotovoltaica. Entre as regiões de maior densidade populacional, o Brasil mostra condições de uso de sistemas fotovoltaicos (1500 a 1600 kWh/kWp por ano) mais favoráveis do que a maior parte da Europa, a parte norte dos EUA, Canadá, Papua-Nova Guiné e grande parte da Ásia – incluindo Japão, Indonésia, Cingapura, Filipinas, Malásia e sudeste da China.

A seção de Anexos apresenta mapas referentes às variáveis de Temperatura, Elevação de Terreno, GHI e GTI, variáveis que impactaram o mapa da Figura 2.19. Além disso, a seção apresenta mapas de Densidade Populacional e Demanda por Eletricidade, fatores não computados na Figura 2.19 e que influenciam a viabilidade do uso do sistema fotovoltaico.

O mapa é providenciado por profissionais da Solargis. Para obtenção de dados de alta precisão, o mapa combina modelos teóricos com dados obtidos em estações de medições solares, seguido de validação. O sombreamento resultante de características do terreno foi computado no

sistema, no entanto, sombreamento resultante de construções, vegetações e obstáculos, não foi computado. O albedo (coeficiente de reflexão) foi imputado para superfícies inclinadas e as posições solares foram calculadas em intervalos de 15 minutos. A performance dos módulos foi calculada utilizando a performance de módulos genéricos de Silício cristalino. O modelo considerou estimativas para perdas relacionadas a poeira, sujeira, neve, tolerância de potência dos módulos, incompatibilidade, perdas nos cabos, perdas na conversão CC/CA e perdas no transporte de energia.

Em relação ao sombreamento, vale ressaltar o estudo de Mohajeri (2016), que diz que regiões menos densamente habitadas podem receber irradiações solares anuais de 30 a 40% maiores do que regiões mais adensadas. A irradiação anual recebida aumentou uma média de 10% a 15% nas 16 amostras do estudo. Além disso a eficiência na potência de sistemas fotovoltaicos e térmico solares caíram respectivamente, de 20% para 3% e de 85% para 49% para sistemas em fachadas e a eficiência na potência de sistemas fotovoltaicos e térmicos solares caíram respectivamente, de 94% para 79% e de 100% para 95% para sistemas em telhados. O resultado indica que sistemas para fachadas são mais prejudicados em regiões urbanas compactas do que sistemas para telhados, principalmente devido ao sombreamento.

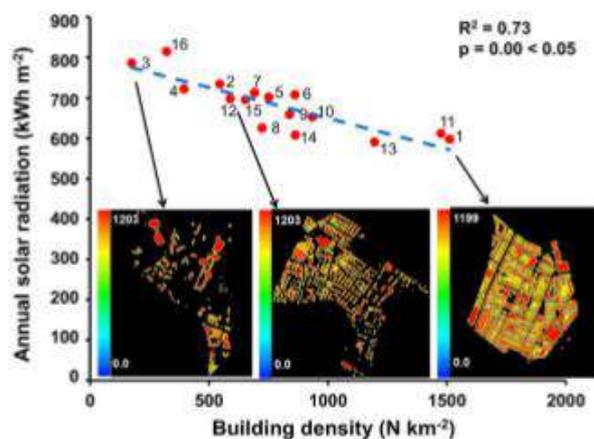


Figura 2.20 – Irradiação solar anual (kWh/m²) versus a densidade de construção (N/km²) para 16 regiões. O coeficiente de determinação (R²) e a significância associada (valor p) a 5% são apresentadas para a correlação linear (MOHAJERI et al., 2016).

De volta ao Global Solar Atlas, é importante comentar sobre a precisão dos dados obtidos. A precisão é estimada comparando o modelo meteorológico com dados de alta qualidade e bem manuseados de medições meteorológicas, utilizando métodos estatísticos. Na maior parte dos casos o desvio esperado de valores anuais está na faixa de $\pm 4\%$ a $\pm 8\%$ para o GHI. Desvios

maiores são esperados em condições geográficas complexas e em regiões pouco cobertas por medições meteorológicas de alta qualidade.

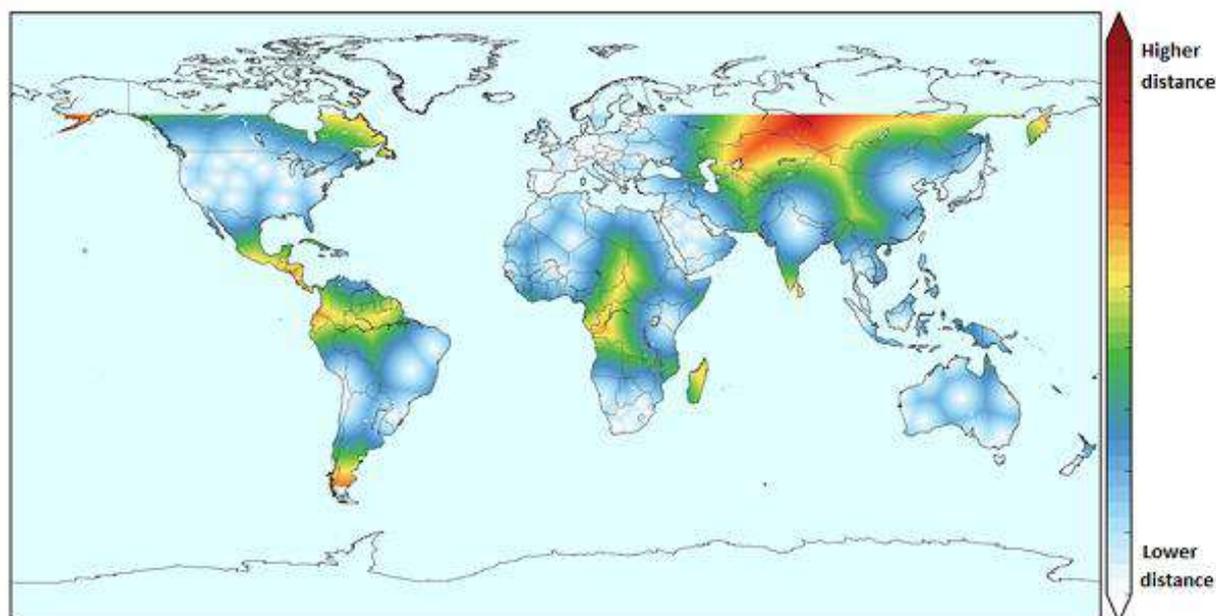


Figura 2.21 – Distância de estações de medições solares de alta qualidade utilizadas na validação do modelo de radiação solar da Solargis. (SOLARGIS 2016).

2.5 Sistema de rastreo solar

O sistema de rastreo solar aparece como uma das soluções para melhorar o desempenho e eficiência de sistemas fotovoltaicos e térmico solares. Como os painéis fotovoltaicos são mais leves do que os coletores térmicos solares, a aplicação do rastreo solar é mais adequada e menos onerosa para o sistema fotovoltaico.

O rastreo solar pode aumentar de 30 a 40% a produção de eletricidade (BOSE, 2011; SILVA, 2012). Vieira (2014) fez um experimento de uma semana (13/07/14 a 20/07/14) na cidade de Mossoró-RN, utilizando rastreador de apenas um eixo, no sentido leste-oeste, obtendo aumento de rendimento de 11% no sistema fotovoltaico.

Alves (2015) fez um experimento na cidade de Cotia-SP, com rastreador solar baseado em sistemas embarcados e obteve 4,22% de rendimento num dia nublado e 6,22% de rendimento num dia ensolarado.

Barsoum e Vasant (2010) fizeram um trabalho concluindo que sistemas de rastreamento solar de um eixo possuem ganho aproximado de 20% e sistemas de rastreamento solar com dois eixos possuem ganhos superiores a 40%.

Para validação dos resultados desses estudos, primeiramente será feita uma análise própria, utilizando a base de dados do Solargis (2016). No item 5.2 do capítulo dos resultados, essa base de dados será então comparada com bases de dados da NASA, do INPE e do CRESESB, além de uma comparação com base no modelo teórico linear de Ångström-Prèscott.

O software Global Solar Atlas providencia para cada localidade do globo, valores de GHI (Irradiação Global Horizontal), GTI (Irradiação Global Inclinada), DIF (Irradiação Global Difusa) e DNI (Irradiação Normal Direta).

A radiação difusa (DIF) é a radiação solar que alcança a superfície da Terra a partir de todas as direções, após ter sido dispersa pelas moléculas e partículas presentes na atmosfera. A radiação difusa pode ser interpretada como a claridade do céu quando o sol está totalmente encoberto por nuvens.

O DNI é calculado com um dispositivo que rastreia o sol, assim, a irradiação recebida sempre estará normal a superfície do dispositivo. Valores de DNI são importantes no uso de sistemas heliotérmicos. O valor de DNI é calculado retirando-se a energia solar difusa (DIF), uma vez que os sistemas heliotérmicos não conseguem absorver fisicamente quantidades significativas de energia difusa. Para sistemas solares fotovoltaicos estáticos, os valores de GHI são utilizados quando a superfície é horizontal e os valores de GTI são utilizados quando a superfície é inclinada.

Painéis solares fotovoltaicos são capazes de utilizar a radiação difusa para seu funcionamento, dessa forma, será considerada a hipótese de que o cálculo da absorção de irradiação de um painel fotovoltaico com rastreo solar pode ser feito somando os valores de DNI com os valores de DIF de uma dada região, uma vez que o cálculo do GHI é feito da seguinte forma:

$$GHI = DNI * \cos\delta + DIF \quad (1)$$

Sendo δ a inclinação entre o painel e a posição do sol em cada momento.

Ou seja, a hipótese foi feita porque para um painel com rastreo solar, δ é 90° em todos os momentos. Essa hipótese considera que o painel possua dois eixos de rotação e rastreie perfeita

e idealmente a posição solar. Segundo Prinsloo e Dobson (2015), o sistema de rastreamento só pode tolerar no máximo 1% de erro na precisão para não perder eficiência significativa.

O Global Solar Atlas apresenta resultados com base numa série de dados de 1999 a 2015.

Para a cidade de São José dos Campos (latitude de $-23,18^\circ$ e longitude de $-45,80^\circ$), o resultado da eficiência de rastreamento solar está apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Dados de DNI, DIF, radiação com rastreamento solar, GHI, GTI e eficiência do rastreamento para a cidade de São José dos Campos (SOLARGIS, 2016). Nota: Dados manipulados pelo autor.

	Painel com rastreamento solar		Painel horizontal	Painel com inclinação igual a latitude	
	DNI	DIF	DNI+DIF	GHI	GTI
Média Anual (kWh/m ² .dia)	4,21	2,01	6,22	4,87	5,22
Eficiência do rastreamento em relação ao painel horizontal e ao inclinado				28%	19%

Na análise do rastreamento solar, vale comentar sobre o gasto com a energia do motor que move o sistema. De acordo com Kok-Keong Chong e Chee-Woon Wong (2010), um sistema fotovoltaico de 25 m², recebendo irradiação de 800 W/m² por sete horas de sol ao dia, apresenta um gasto de 3,5% da energia de saída gerada. O experimento inclui gastos com motores de rastreamento, motorista, encoders e computador, sendo que o computador é o responsável por consumir mais energia. A Figura 2.22 mostra as especificações consideradas no sistema de rastreamento do experimento.

Total rotational angles of Elevation axis (degree/ day)	240
Total rotational angles of Azimuth axis (degree/ day)	540
Motor's rotational speed (rpm)	120
Gear ratio	1: 4400
Solar concentrator's angular speed (degree per second)	0.16
Total time for Elevation axis rotation (hour/ day)	0.41
Total time for Azimuth axis rotation (hour/ day)	0.92
Total operating time:10am-5pm (hour/ day)	7
Elevation motor's power consumption (watt)	99
Azimuth motor's power consumption (watt)	66
Power consumption of computer, encoders & motor driver (watt)	165
Energy Consumption of the Elevation motor (kW-h/day)	0.04
Energy Consumption of the Azimuth motor (kW-h/day)	0.06
Energy Consumption of computer, encoder & driver (kW-h/day)	1.16
Total Energy Consumption of the motors (kW-h/day)	1.26

Figura 2.22 – Especificação e consumo de energia de um sistema de rastreamento.

Um estudo de Vieira (2014) mostrou que o tempo estimado de retorno financeiro do investimento nos componentes de rastreio é de aproximadamente 100 dias, considerando apenas os custos iniciais. Os componentes considerados foram: Estrutura móvel; Placa Microcontrolada Arduino Mega; Motor de passo; 2 Sensores LDR e Driver do motor de passo. Os componentes foram calculados com preço de mercado.

O precursor dos sistemas de rastreamento solar industriais mais eficientes da escala de utilidade para geração de energia elétrica solar térmica é considerado o sistema Vanguard. Este sistema de 25 kWe utiliza, em média, 8% da energia gerada para fazer o rastreamento, mas alguns problemas surgiam, como ruídos, vibrações e desgaste excessivo em engrenagens não endurecidas (PRINSLOO; DOBSON, 2015).

Os resultados apresentados mostram que os gastos com o motor e o sistema de rastreio geral são significativamente menores do que os ganhos obtidos, revelando que o rastreio solar é uma opção que melhora o sistema solar fotovoltaico. No entanto, uma análise diferenciada no dimensionamento do sistema fotovoltaico deve ser feita para o caso com rastreamento, visto que os próprios painéis móveis podem gerar sombreamento em seus painéis vizinhos.

3 Embasamento teórico

3.1 Modelo Linear de Ångström-Prèscott

Essa seção mostra definições de variáveis e apresenta equações que são utilizadas no modelo linear de Ångström-Prèscott, que servirá para o cálculo de irradiação (GHI) numa dada região. As definições deste item 3.1 foram baseadas no estudo de Prado (2014).

3.1.1 Relação Terra – Sol

A distância média da Terra ao Sol é $1,496 \times 10^8$ km, r_0 , (1 unidade astronómica – AU).

A distância entre Terra e o Sol pode ser calculada através da equação da excentricidade, E_0 ,

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(2\pi * \frac{nda}{365}\right) \quad (2)$$

Onde nda é o dia do ano, tomando o valor de 1 no dia 1 de janeiro e de 365 no dia 31 de dezembro. Para a contagem do dia do ano considera-se que fevereiro tem sempre 28 dias.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

Figura 3.1 – Valor de nda para cada dia do ano

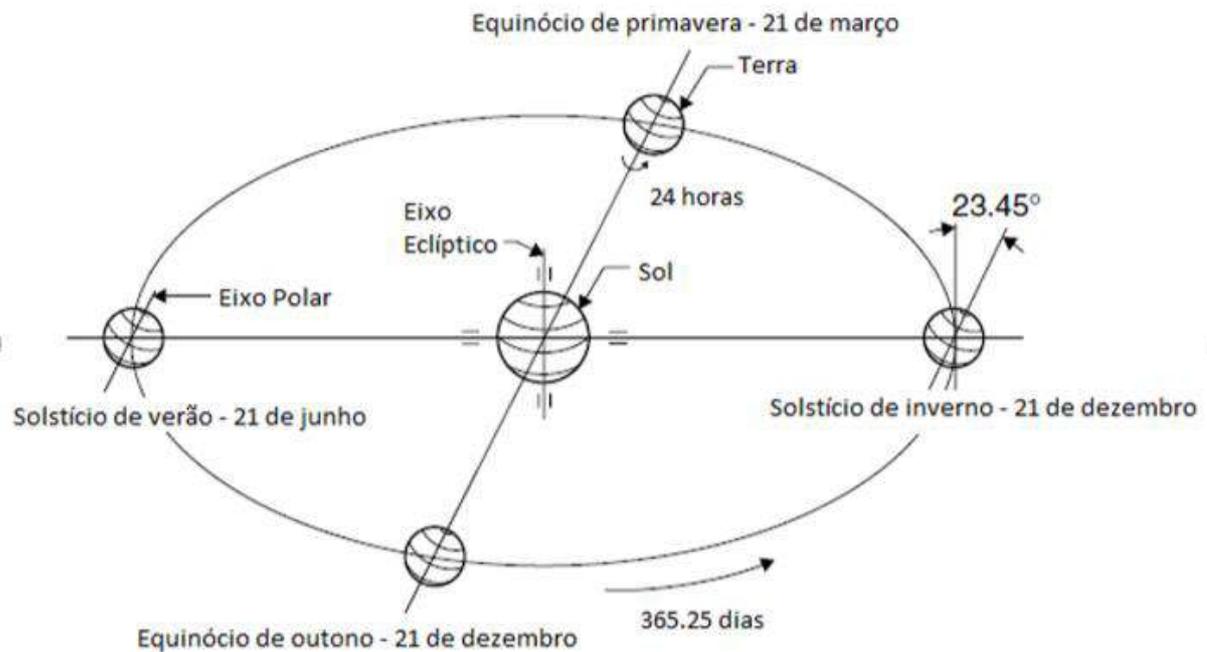


Figura 3.2 – Movimento da Terra em torno do Sol e dos Solstícios e Equinócios.

3.1.2 Declinação

O eixo polar está inclinado $23,45^\circ$ em relação à normal do Plano Eclíptico (Figura 3.2). Esta inclinação causa a variação sazonal da radiação Solar (estações). A orientação do eixo polar em relação ao sol varia devido à rotação em torno do mesmo, modificando a diferença angular entre a linha imaginária que une os centros do sol e da Terra e o plano equatorial da Terra. O ângulo referido é chamado de declinação solar (δ). A declinação varia ao longo do ano entre $23,45^\circ$ e $-23,45^\circ$, visível na Figura 3.3, sendo positivo a norte do equador. A declinação é 0° nos equinócios, e toma o valor de $\pm 23,45^\circ$ nos solstícios. A declinação pode ser calculada através da seguinte expressão, em graus:

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} (nda - 80) \right) \quad (3)$$

A declinação pode ser considerada constante ao longo de um dia.

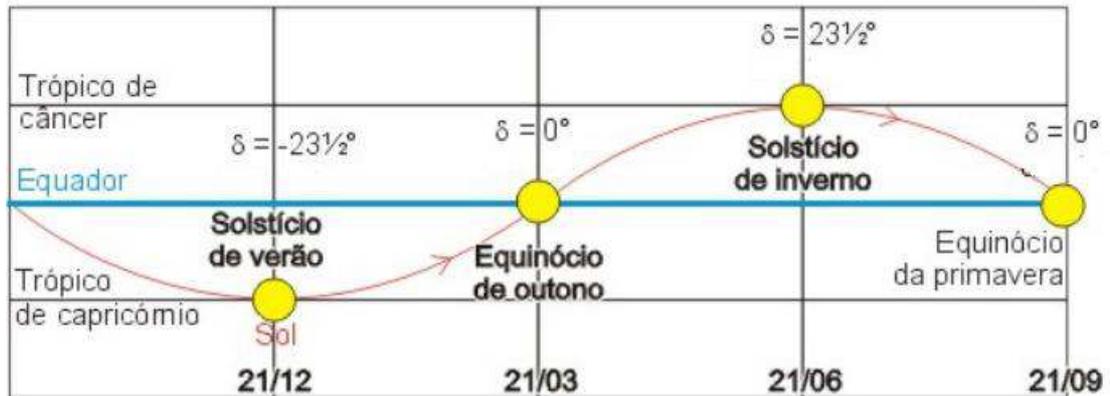


Figura 3.3 – Gráfico da declinação da Terra para cada dia do ano, com destaque para Solstícios e Equinócios.

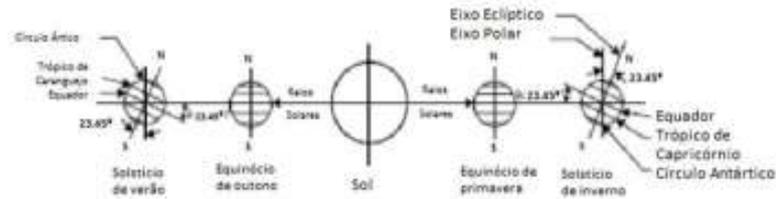


Figura 3.4 – Ilustração da Terra nos Solstícios e Equinócios

3.1.3 Ângulo zenital

O ângulo zenital é o ângulo positivo entre os raios solares e o plano vertical e pode ser calculado pela equação

$$\cos(z) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(h) \quad (4)$$

Onde φ é a latitude do local, positivo para norte e negativo para sul. O ângulo zenital está relacionado com o ângulo de altitude solar (α), pois o ângulo de altitude solar é o ângulo entre os raios solares e o plano horizontal. Assim,

$$z + \alpha = 90^\circ \quad (5)$$

Quando o sol passa pelo meridiano no local: $h = 0$, portanto:

$$\cos(z) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta)$$

$$\cos(z) = \cos(\delta - \varphi)$$

$$z = |\delta - \varphi|, \text{ sabendo que } z > 0 \quad (6)$$

3.1.4 Ângulo horário

h é ângulo horário do sol – ângulo formado pelo plano meridiano do sol e o plano meridiano do local determinado.

$$h = (\text{hora local} - 12) \cdot 15^\circ \cdot \text{hora}^{-1} \quad (7)$$

3.1.5 Fotoperíodo (N) e pôr do sol

Fotoperíodo é a duração astronômica do período diurno, isto é:

$$N = \text{hora do pôr do sol} - \text{hora do nascer do sol}$$

Considerando a trajetória simétrica do solo em relação ao meio-dia, podemos admitir que:

$$N = 2 * hp/15 \quad (8)$$

Em que hp é o ângulo horário do sol no momento em que se põe.

Ao se pôr, o ângulo zenital é 90° e $\cos 90^\circ = 0$. Assim:

$$0 = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos hp$$

$$\cos hp = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta$$

$$hp = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

3.1.6 Irradiação e Irradiância Solar no topo da atmosfera

A energia por tempo e por área perpendicular aos raios solares que é recebida a meia distância entre a Terra e o Sol é chamada de Constante Solar, J_0 , e tem o valor de 1367 W/m . A radiação que chega ao topo da atmosfera (J_0'), num plano perpendicular aos raios, varia consoante a proximidade do planeta ao sol, dessa forma, o planeta recebe mais energia no periélio

(~1400W/m²) do que no afélio (~1330W/m²). Assim, essa irradiância depende apenas do dia do ano e pode ser calculada por

$$Jo' = Jo [1 + 0,033 * \cos(\frac{360nda}{365})] \quad (10)$$

Quando a radiação é medida num plano paralelo à superfície num determinado local e instante, a irradiância é dada por

$$Isup = Jo' \cos(z) \quad (11)$$

3.1.7 Irradiação solar global diária no topo da atmosfera

Basta integrar I_{sup} com o ângulo zenital variando desde o nascer do sol até o pôr do sol (irradiância ao longo do fotoperíodo).

Com isso, chega-se à seguinte equação:

$$Ro = 37,6 \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360nda}{365}\right) \right] * \left(\frac{\pi}{180}\right) hp \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin hp \quad (12)$$

3.1.8 Irradiação solar global diária na superfície

A melhor maneira de quantificar a irradiância solar global é a piranométrica, ou seja, medindo-se diretamente a grandeza. Entretanto, em virtude muitas vezes da escassez desse dado meteorológico, torna-se necessário recorrer a formulações empíricas que permitem estimar a irradiância solar em termos de outros elementos meteorológicos, tais como nebulosidade, duração do número de horas de brilho solar, etc.

Dentre as diversas expressões empíricas apresentadas na literatura para estimar a irradiância solar global ao nível do solo, em escala de tempo diária, a de uso mais difundido é aquela proposta em 1924, por Ångström e mais tarde modificada por Prèscott (citado por Vianello e Alves, 1991):

$$\frac{Rg}{Ro} = (a + b * \frac{n}{N}) \quad (13)$$

Onde a e b são coeficientes empíricos, obtidos por análise de regressão linear para uma determinada localidade; n é a duração do brilho solar observado e N é o fotoperíodo. A razão n/N é referida como razão de insolação. A razão Rg/Ro é referida como transmissividade global da atmosfera.

3.2 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos com inversor

Neste tópico será visto como fazer o dimensionamento dos módulos e do inversor interativo para o sistema fotovoltaico. Deve-se determinar tanto a quantidade de inversores quanto a quantidade de módulos fotovoltaicos necessária ao projeto. As definições apresentadas nesse item 3.2 foram baseadas em: (LIGADOS; SISTEMAS, 2009).

3.2.1 Consumo de Eletricidade em Média Mensal

O consumo de eletricidade é o primeiro dado necessário para se iniciar o processo de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

3.2.2 Custo de disponibilidade (Mensal)

É o consumo mínimo mensal que não pode ser compensado por produção de energia solar e é determinado pela empresa distribuidora de energia.

3.2.3 Energia de Compensação Média Mensal

É a diferença entre o consumo de eletricidade em média mensal e o custo de disponibilidade mensal.

Além disso, a energia de compensação diária é a energia de compensação mensal dividida por 30.

3.2.4 Radiação Solar Diária em média anual

A irradiância que incide na superfície de um módulo fotovoltaico determina, primariamente, a intensidade da corrente elétrica que será produzida por ele. Isso porque quanto mais raios solares incidem (isto é, quanto mais fótons incidem nas células fotovoltaicas), mais elétrons são liberados, o que aumenta a corrente. A irradiância influencia também em parâmetros importantes, como potência e tensão do sistema.

3.2.5 Potência de saída do inversor

Para fazer o dimensionamento, um dado importante é a potência de saída do inversor ou do conjunto de inversores.

$$P_{AC} = \frac{E_{CD}}{HSP} \quad (14)$$

Onde:

P_{AC}	É a potência de saída do inversor [W].
E_{CD}	É a quantidade de energia elétrica a ser compensada por dia [Wh/dia].
HSP	É a média anual de horas sol pico diárias do recurso. Este valor já deve estar ajustado para considerar as influências da inclinação, a poluição e da orientação do local da superfície.

Figura 3.5 – Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação da potência de saída do inversor.

3.2.6 Eficiência média do inversor (Rendimento europeu)

É o valor da eficiência do inversor segundo a norma europeia, e encontra-se no datasheet (folha de dados) do inversor. A função de um inversor é transferir a potência elétrica gerada em corrente contínua pelo arranjo fotovoltaico para um circuito de corrente alternada ligado junto à rede de energia elétrica. Esta conversão é realizada por meio de um sistema eletrônico de controle aliado a um circuito composto por chaves de potência. Como qualquer equipamento

que faça conversão de energia, esta transformação de corrente contínua para corrente alternada ocorre mediante perdas inevitáveis que são transformadas em calor.

3.2.7 Potência de Entrada no Inversor

Para o arranjo fotovoltaico ser capaz de fornecer a quantidade de energia elétrica esperada, precisará desenvolver uma potência adequada a este valor. Esta potência é determinada a partir do valor da potência elétrica disponibilizada na saída do inversor e da sua eficiência, conforme mostra a seguinte equação:

$$P_{PV} = \frac{P_{AC}}{\eta_{EURO}} \quad (15)$$

Onde:

P_{PV} É a potência elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico necessário [W_p].

P_{AC} É a potência elétrica disponível na saída do inversor [W].

η_{EURO} É o valor da eficiência do Inversor segundo a norma europeia, encontra-se no *datasheet*.

Figura 3.6 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação da potência de entrada do inversor.

3.2.8 Influência da temperatura na operação

Sabe-se que o desempenho do módulo depende da temperatura de operação das células. Dificilmente a temperatura de operação de um módulo fotovoltaico será igual à temperatura das condições padrão de teste (25°C). Por isso a correção da temperatura é imprescindível para avaliar o desempenho real dos módulos.

De acordo com critérios internacionalmente aceitos de projeto, pode-se considerar a temperatura da célula como sendo na média igual a temperatura ambiente mais 25°C, e como as especificações de módulos fotovoltaicos são dadas sob as condições padrão de teste (STC), que é também igual a 25°C, então a diferença de temperatura da célula para o STC vai ser igual a própria temperatura ambiente ($T_{amb} + 25 - 25 = T_{amb}$). Então, o valor de diferença de

temperatura utilizado para corrigir as especificações dos módulos fotovoltaicos será a própria temperatura ambiente do local de análise.

Os fabricantes determinam, em ambiente de laboratório, os coeficientes de temperatura dos módulos. Estes coeficientes permitem calcular as características do módulo (corrente, tensão, potência) em qualquer situação. Estes valores não vêm fixados nas etiquetas presentes na parte traseira dos módulos, mas sempre estarão presentes nos seus datasheets.

Parâmetro	Valor
Temperatura nominal de operação da célula (NOCT)	45 ±2 °C
Coeficiente de temperatura para P_{max}	-0,400 %/°C
Coeficiente de temperatura para V_{OC}	-0,314 %/°C
Coeficiente de temperatura para I_{SC}	+0,051 %/°C

Figura 3.7 – Exemplos de coeficientes de temperatura de um módulo fotovoltaico comercial.

3.2.9 Especificações de Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são escolhidos para um projeto de acordo com a suas especificações técnicas. As especificações mais importantes são:

- Potência Pico do módulo fotovoltaico (corrigida pela temperatura);
- Tensão em circuito aberto do módulo fotovoltaico (STC);

Observação: STC significa Standard Test Conditions, isto é, $T_{stc} = 25^{\circ}\text{C}$ e $G_{stc} = 1000\text{W}/\text{m}^2$

- Tensão em máxima potência do módulo fotovoltaico (corrigida pela temperatura);
- Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico (corrigida pela temperatura).

3.2.10 Quantidade de módulos no painel

Com a potência do arranjo fotovoltaico total, pode-se calcular o número preciso de módulos. A potência pico do módulo, medida nas condições padrão de teste, encontra-se no datasheet. Para determinar a quantidade dos módulos deve-se usar a potência pico P_{PEAK} que foi corrigida para a temperatura média de operação.

$$M_{TOTAL} = \frac{P_{PV}}{P_{PEAK}} \quad (16)$$

Onde:	
M_{TOTAL}	É o número total de módulos fotovoltaicos necessários.
P_{PEAK}	É o valor da potência pico do tipo de módulo escolhido [W_p]. Esta potência sob as condições padrões de teste (STC) encontra-se no <i>datasheet</i> , uma correção deve ser feita para as condições climáticas do local.

Figura 3.8 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação da quantidade de módulos no painel.

3.2.11 Tensão máxima de entrada do inversor

$U_{CC,INV}$ = Tensão CC máx: É a tensão máxima que o arranjo FV fornece que deve ser ligado na entrada do inversor. Vale ressaltar que a tensão fica alta quando a temperatura ambiente fica baixa.

3.2.12 Tensão mínima de entrada do inversor

$U_{min\ MPP,INV}$: Limite mínimo de faixa de tensão para operação no MPPT. Se o arranjo FV fornece tensão abaixo deste valor, o inversor não liga.

3.2.13 Corrente máxima de entrada do inversor

É a máxima corrente que deve ser fornecida pelo arranjo FV. Depende da irradiância.

3.2.14 Máximo de módulos em série no inversor

Para determinar o número máximo de módulos associados em série no inversor utiliza-se a seguinte expressão:

$$N_{max} = \frac{U_{CC,INV}}{V_{OC}} \quad (17)$$

Onde:	
N_{max}	É o número máximo de módulos associados em série de modo a não ultrapassar a tensão máxima.
$U_{CC,INV}$	É a Tensão máxima de entrada do inversor [V]. Nunca deve ser ultrapassada.
V_{OC}	É a tensão de circuito aberto do módulo [V]. Para temperatura ambiente de 0° C não é necessário fazer correção.

Figura 3.9 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação do máximo de módulos em série no inversor.

3.2.15 Mínimo de módulos em série no inversor

Para determinar o número mínimo de módulos associados em série no inversor utiliza-se a seguinte expressão:

$$N_{min,MPPT} = \frac{U_{minMPPT,INV}}{V_{MPP}} \quad (18)$$

Onde:	
$N_{min,MPPT}$	Número mínimo de módulos fotovoltaicos associados em série para que o inversor opere no modo MPPT.
$U_{minMPPT,INV}$	É a tensão mínima com a qual o inversor é capaz de operar em MPPT [V].
V_{mpp}	É a tensão produzida pelo módulo no ponto de máxima potência [V]. O valor referenciado no <i>datasheet</i> precisa ser adaptado às temperaturas máximas de operação.

Figura 3.10 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação do mínimo de módulos em série no inversor

3.2.16 Máximo de fileiras (strings) em paralelo

Para determinar o número máximo de fileiras em paralelo, utiliza-se a seguinte expressão:

$$N_{strings} = \frac{I_{max,INV}}{I_{SC,string}} \quad (19)$$

Onde:	
$N_{strings}$	É o número máximo de fileiras que podem ser associadas em paralelo
$I_{max,INV}$	É a corrente máxima de entrada CC do inversor [A].
$I_{SC,string}$	É a corrente de curto circuito de uma fileira [A]. É sempre igual à corrente circuito de um módulo (I_{SC}), que encontra-se especificada no <i>datasheet</i> .

Figura 3.11 - Denominação das variáveis (com indicação das unidades) da equação do máximo de fileiras em paralelo.

3.3 Dimensionamento de coletor solar para aquecimento de água

Para efetuar o dimensionamento do Sistema de aquecimento solar, deve-se considerar os seguintes fatores:

- Vazão das peças de utilização;
- Tempo e frequência de uso;
- Dados de Temperatura;
- Demanda de energia útil;
- Irradiação global.

3.3.1 Cálculo do volume de consumo

Inicialmente deve-se efetuar o cálculo do volume de água quente consumida diariamente. Tal volume pode variar em função da vazão das peças de utilização, tempo médio e frequência de uso. O volume para consumo é definido pela seguinte expressão:

$$V_{consumo} = \Sigma(Q_{pu} \times T_u \times \text{frequência de uso}) \quad (20)$$

Onde,

V consumo: é o volume total de água quente consumido diariamente (m³);

Q_{pu} : vazão da peça de utilização (m^3/s);

T_u : tempo médio de uso diária da peça de utilização (s);

Frequência de uso: é o número total de utilização de peças por dia.

3.3.2 Cálculo do sistema de armazenamento

O volume do sistema de armazenamento é definido pela seguinte expressão:

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz.} - T_{ambiente}} \quad (21)$$

$V_{armaz.}$: é o volume do sistema de armazenamento (m^3). Sugere-se que o volume de armazenamento seja maior ou igual a 75% do volume de consumo.

$T_{consumo}$: é a temperatura de consumo de utilização ($^{\circ}C$). Sugere-se a utilização de $40^{\circ}C$.

$T_{armaz.}$: corresponde a temperatura de armazenamento da água ($^{\circ}C$). Sugere-se que a temperatura de armazenamento seja igual ou maior do que a temperatura de consumo.

$T_{ambiente}$: é a temperatura média anual do local de instalação.

3.3.3 Cálculo da demanda de energia útil

Deve-se ainda calcular a demanda útil de energia, de acordo com a seguinte expressão:

$$E_{\acute{u}til} = \frac{V_{armaz} \times \rho \times C_p \times (T_{armaz} - T_{ambiente})}{3600} \quad (22)$$

$E_{\acute{u}til}$: é a energia útil, expressa em kilowatts hora por dia (kWh/dia).

ρ : corresponde a massa específica da água igual a 1000 (kg/m^3).

C_p : é o calor específico da água, igual a 4,18 (Kj/Kg).

3.3.4 Cálculo da área coletora

Para finalizar, basta efetuar o cálculo da área coletora, para que desta forma possa ser definido o modelo da placa e quantas placas serão necessárias no projeto.

O cálculo da área coletora é definido em função da seguinte expressão:

$$A_{coletora} = \frac{(E_{\acute{u}til} + E_{perdas}) \times FC_{instal} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad (23)$$

$A_{coletora}$: é a área coletora (m²)

I_G : é o valor da irradiação global média anual para o local da instalação (kWh;m².dia)

E_{perdas} : é o valor das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário (kWh/dia), calculado pela soma das perdas ou por:

$$E_{perdas} = 0,15E_{\acute{u}til}$$

PMDEE: é a produção média diária de energia específica do coletor solar (kWh/m²).

No dimensionamento que será feito nesse trabalho, será considerado um coletor solar de classe A, com PMDEE de 2,6 kWh/m².

FC_{instal} : é o fator de correção para a inclinação e orientação do coletor solar dado pela equação:

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\acute{o}timo})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (24)$$

Assim, com esses cálculos, é possível dimensionar o sistema que utiliza energia solar para aquecimento

4 Materiais e métodos

4.1 População de projeto

O projeto considerado será um prédio com dois pavimentos e 4 apartamentos em cada pavimento, foi considerada a hipótese de haver 3 pessoas por apartamento.

4.2 Consumo de Eletricidade em Média Mensal

Será calculado o consumo de eletricidade apenas referente ao aquecimento de água, isso é, o consumo de chuveiros, lavatórios, pias de cozinha, máquinas de lavar roupa e de lavar pratos.

Os parâmetros apresentados na Figura 4.1 foram retirados da ABNT.

Uso interno	Unidades	Parâmetros		
		Inferior	Superior	Mais provável
Gasto mensal	m ³ /pessoa/mês	3	5	5
Número pessoas na casa	pessoa	2	5	3
Descarga na bacia	Descarga/pessoa/dia	4	6	5
Volume de descarga	Litros/descarga	6,8	18	9
Vazamento bacias sanitárias	Porcentagem	0	30	9
Frequência de banho	Banho/pessoa/dia	0	1	1
Duração do banho	Minutos	5	15	7,3
Vazão dos chuveiros	Litros/segundo	0,08	0,30	0,15
Uso da banheira	Banho/pessoa/dia	0	0,2	0,1
Volume de água	Litros/banho	113	189	113
Máquina de lavar pratos	Carga/pessoa/dia	0,1	0,3	0,1
Volume de água	Litro/ciclo	18	70	18
Máquina de lavar roupa	Carga/pessoa/dia	0,2	0,37	0,37
Volume de água	Litro/ciclo	108	189	108
Torneira da cozinha	Minuto/pessoa/dia	0,5	4	4
Vazão da torneira	Litros/segundo	0,126	0,189	0,15
Torneira de banheiro	Minuto/pessoa/dia	0,5	4	4
Vazão da torneira	Litros/segundo	0,126	0,189	0,15

Nota: foi considerada a pressão nas instalações de 40m.ca.

Figura 4.1 – Parâmetros utilizados para cálculo de volume de consumo de água numa residência.

4.3 Custo de disponibilidade

Será considerado nulo, uma vez que o sistema solar não está sendo dimensionado para fornecer 100% do consumo de eletricidade dos apartamentos, mas apenas a parte referente a aquecimento de água.

4.4 Dados do inversor

Nesse item são apresentados parâmetros de saída e de eficiência do inversor selecionado para o dimensionamento.

Parâmetros de Saída		
Parâmetro	Símbolo	Especificação
Potência CA nominal	$P_{N,CA,INV}$	2300 W
Potência CA máxima aparente	$P_{max,CA,INV}$	2500 VA
Corrente CA máxima	$I_{max,CA,INV}$	12,5 A
Faixa de tensão de entrada	$U_{min,CA,INV}$	180 V
	$U_{max,CA,INV}$	até 265 V
Frequência de rede CA (auto-ajustada)	f_{rede}	50 ± 4,5 Hz ou 60 ± 4,5 Hz
Fator de potência	$\cos(\varphi)$	1
Tipo de ligação com a rede	—	Monofásica

Características CA de um inversor SMA modelo SB 2500

Figura 4.2 – Valores dos Parâmetros de Saída do inversor especificado (SMA modelo SB 2500)

Parâmetro	Símbolo	Especificação
Eficiência de conversão máxima	η_{max}	94,1 %
Eficiência de conversão conforme a norma europeia	η_{euro}	93,2 %

Eficiência de conversão para o inversor SMA modelo SB2500.

Figura 4.3 – Valores dos parâmetros de eficiência do inversor SMA – modelo SB2500.

Observação: Para dimensionar sistemas fotovoltaicos no Brasil utiliza-se o valor de η_{euro} para os cálculos.

4.5 Dados dos módulos dos painéis fotovoltaicos

Nesse item são apresentadas as especificações técnicas e mecânicas do painel selecionado para o dimensionamento.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PAINEL DE 265 Wp DE ENERGIA SOLAR

Máxima Potência (Pm):	265 Watts
Tolerância:	0 / 5 Watts
Voltagem de Máxima Potência (Vm) :	30,6 Volts
Corrente de Máxima Potência (Im):	8,66 Amps
Voltagem de Circuito Aberto (Voc):	37,7 Volts
Corrente de Curto-Circuito (Isc):	9,23 Amps
Voltagem Máxima do Sistema:	1000 Volts
Eficiência do Painel:	16,47%
Coefficiente de Temperatura da Potência(Pm):	-0,41 %/°C
Coefficiente de Temperatura da Corrente(Isc):	0,053 %/°C
Coefficiente de Temperatura da Voltagem(Voc):	-0,31 %/°C
Temperatura Nominal de Operação de Célula (TNOC/NOCT):	45±2°C

* Condição padrão de teste STC/CPT: Irradiação de 1.000 W/m², Espectro de Massa de Ar 1.5 e Temperatura de Célula de 25°C

Figura 4.4 – Especificações técnicas do painel especificado (265 Wp) de energia solar.

Especificações Mecânicas do Painel Solar:

Dimensões do painel:	(1638 x 982 x 40) mm
Código IP da caixa de junção:	IP 67, 3 diodos
Número de células e tipo:	60, Silício Policristalino
Peso do módulo:	18,0 kg
Vidro, tipo e espessura:	Vidro Temperado de Alta Transmissividade, liga de alumínio anodizado, Vidro Temperado 3,2mm

Figura 4.5 – Especificações Mecânicas do painel especificado (265 Wp) de energia solar.

Tabela 4.1 – Dados de especificações técnicas do painel selecionado corrigidos com a temperatura de São José dos Campos

Varição entre a temperatura de operação e o STC	ΔT	19,3	°C
Potência Pico do módulo fotovoltaico (corrigida)	W_p	244,03055	W
Tensão em circuito aberto do módulo fotovoltaico (STC)	V_{oc}	37,7	V
Tensão em máxima potência do módulo fotovoltaico (Corrigida)	V_{MPP}	28,769202	V
Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico (corrigida)	I_{sc}	9,32441367	A

4.6 Dados necessários para o dimensionamento do coletor solar

Para esta edificação, tem-se os seguintes parâmetros:

- Chuveiro: 7 litros/min, considerando 10 minutos de uso por dia.
- Lavatório: 20 litros/pessoa/dia;
- Pia de cozinha: 25 litros/pessoa/dia.

5 Resultados e discussões

5.1 Cálculo de radiância global horizontal pela expressão de Ångström-Prèscott

O primeiro dado necessário é a latitude de São José dos Campos, que é dada por -23,185 graus, segundo o Google Maps.

Com base em cada dia do ano, poderá ser calculado:

Declinação solar δ por meio de

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} (nda-80) \right) \quad (3)$$

Ângulo do pôr do sol hp por meio de

$$hp = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

Fotoperíodo N por meio de

$$N = 2 * hp/15 \quad (8)$$

Irradiação solar diária incompleta R_o por meio de

$$R_o = 37,6 \left[1 + 0,033 * \cos \left(\frac{360nda}{365} \right) \right] * \left(\frac{\pi}{180} hp \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin hp \right) \quad (12)$$

Irradiação solar diária final R_g por meio de

$$\frac{R_g}{R_o} = \left(a + b * \frac{n}{N} \right) \quad (13)$$

Os valores de a e b foram obtidos para a cidade de Pindamonhangaba de Fontana & Oliveira (1996).

O valor da insolação n, foi obtido do Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), e considerado aproximadamente igual durante os dias de um mesmo mês. Os números não inteiros foram colocados quando a cidade de SJC estava entre duas regiões de insolações diferentes. Os valores estão dispostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de média mensal de insolação em São José dos Campos.

Mês	Insolação n (sjc)
1	6,0
2	5,0
3	5,0
4	5,5
5	5,0
6	5,0
7	6,0
8	5,5
9	4,5
10	4,5
11	5,5
12	4,5
Média	5,16

Com o uso da latitude de SJC e dos dias do ano, e com as equações apresentadas, foi possível obter os resultados da Tabela 5.2

Tabela 5.2 – Valores de declinação (graus), angulação da hora do por sol (graus), fotoperíodo (h), insolação média mensal (h), irradiação solar diária incompleta (R_o) e final (R_g) para cada dia do ano.

	δ (graus)	hp (graus)	N (h)	n (h)	R_o (MJ/m ² .dia)	R_g (MJ/m ² .dia)
1	-22,93	100,44	13,39	5,50	42,78	20,94
2	-22,84	100,39	13,39	5,50	42,76	20,94
3	-22,75	100,35	13,38	5,50	42,75	20,93

4	-22,65	100,29	13,37	5,50	42,72	20,92
5	-22,54	100,24	13,37	5,50	42,70	20,92
6	-22,42	100,18	13,36	5,50	42,68	20,91
7	-22,30	100,12	13,35	5,50	42,65	20,90
8	-22,17	100,05	13,34	5,50	42,62	20,90
9	-22,04	99,98	13,33	5,50	42,59	20,89
10	-21,90	99,91	13,32	5,50	42,56	20,88
11	-21,75	99,84	13,31	5,50	42,52	20,87
12	-21,60	99,76	13,30	5,50	42,49	20,86
13	-21,44	99,68	13,29	5,50	42,45	20,84
14	-21,27	99,60	13,28	5,50	42,41	20,83
15	-21,10	99,51	13,27	5,50	42,37	20,82
16	-20,92	99,42	13,26	5,50	42,32	20,81
17	-20,73	99,33	13,24	5,50	42,28	20,79
18	-20,54	99,23	13,23	5,50	42,23	20,78
19	-20,34	99,14	13,22	5,50	42,18	20,76
20	-20,14	99,04	13,20	5,50	42,13	20,74
21	-19,93	98,93	13,19	5,50	42,07	20,73
22	-19,71	98,83	13,18	5,50	42,01	20,71
23	-19,49	98,72	13,16	5,50	41,96	20,69
24	-19,26	98,61	13,15	5,50	41,89	20,67
25	-19,03	98,50	13,13	5,50	41,83	20,65
26	-18,79	98,38	13,12	5,50	41,77	20,63
27	-18,55	98,26	13,10	5,50	41,70	20,60
28	-18,30	98,14	13,09	5,50	41,63	20,58
29	-18,04	98,02	13,07	5,50	41,56	20,55
30	-17,78	97,90	13,05	5,50	41,48	20,53
31	-17,52	97,77	13,04	5,50	41,40	20,50
32	-17,25	97,64	13,02	5,00	41,33	19,67
33	-16,97	97,51	13,00	5,00	41,24	19,64
34	-16,69	97,38	12,98	5,00	41,16	19,61
35	-16,40	97,24	12,97	5,00	41,07	19,58
36	-16,11	97,11	12,95	5,00	40,99	19,55
37	-15,82	96,97	12,93	5,00	40,89	19,52
38	-15,52	96,83	12,91	5,00	40,80	19,48
39	-15,21	96,69	12,89	5,00	40,70	19,45
40	-14,90	96,54	12,87	5,00	40,61	19,41
41	-14,59	96,40	12,85	5,00	40,51	19,38
42	-14,27	96,25	12,83	5,00	40,40	19,34
43	-13,95	96,11	12,81	5,00	40,30	19,30
44	-13,62	95,96	12,79	5,00	40,19	19,26
45	-13,29	95,81	12,77	5,00	40,08	19,22
46	-12,95	95,65	12,75	5,00	39,97	19,18
47	-12,62	95,50	12,73	5,00	39,85	19,14
48	-12,27	95,35	12,71	5,00	39,73	19,09
49	-11,93	95,19	12,69	5,00	39,61	19,05

50	-11,58	95,03	12,67	5,00	39,49	19,00
51	-11,23	94,88	12,65	5,00	39,36	18,96
52	-10,87	94,72	12,63	5,00	39,24	18,91
53	-10,51	94,56	12,61	5,00	39,11	18,86
54	-10,15	94,40	12,59	5,00	38,97	18,81
55	-9,78	94,24	12,56	5,00	38,84	18,76
56	-9,41	94,07	12,54	5,00	38,70	18,70
57	-9,04	93,91	12,52	5,00	38,56	18,65
58	-8,67	93,74	12,50	5,00	38,42	18,60
59	-8,29	93,58	12,48	5,00	38,28	18,54
60	-7,91	93,41	12,46	5,00	38,13	18,48
61	-7,53	93,25	12,43	5,00	37,98	18,43
62	-7,15	93,08	12,41	5,00	37,83	18,37
63	-6,76	92,91	12,39	5,00	37,68	18,31
64	-6,38	92,74	12,37	5,00	37,52	18,24
65	-5,99	92,57	12,34	5,00	37,37	18,18
66	-5,60	92,41	12,32	5,00	37,21	18,12
67	-5,20	92,24	12,30	5,00	37,05	18,05
68	-4,81	92,07	12,28	5,00	36,88	17,99
69	-4,41	91,89	12,25	5,00	36,72	17,92
70	-4,02	91,72	12,23	5,00	36,55	17,85
71	-3,62	91,55	12,21	5,00	36,38	17,79
72	-3,22	91,38	12,18	5,00	36,21	17,72
73	-2,82	91,21	12,16	5,00	36,04	17,65
74	-2,42	91,04	12,14	5,00	35,86	17,58
75	-2,02	90,86	12,12	5,00	35,69	17,50
76	-1,61	90,69	12,09	5,00	35,51	17,43
77	-1,21	90,52	12,07	5,00	35,33	17,36
78	-0,81	90,35	12,05	5,00	35,15	17,28
79	-0,40	90,17	12,02	5,00	34,97	17,21
80	0,00	90,00	12,00	5,00	34,78	17,13
81	0,40	89,83	11,98	5,00	34,60	17,05
82	0,81	89,65	11,95	5,00	34,41	16,98
83	1,21	89,48	11,93	5,00	34,23	16,90
84	1,61	89,31	11,91	5,00	34,04	16,82
85	2,02	89,14	11,88	5,00	33,85	16,74
86	2,42	88,96	11,86	5,00	33,66	16,66
87	2,82	88,79	11,84	5,00	33,47	16,58
88	3,22	88,62	11,82	5,00	33,27	16,50
89	3,62	88,45	11,79	5,00	33,08	16,42
90	4,02	88,28	11,77	5,00	32,89	16,33
91	4,41	88,11	11,75	5,50	32,69	16,96
92	4,81	87,93	11,72	5,50	32,50	16,88
93	5,20	87,76	11,70	5,50	32,31	16,79
94	5,60	87,59	11,68	5,50	32,11	16,70
95	5,99	87,43	11,66	5,50	31,92	16,62

96	6,38	87,26	11,63	5,50	31,72	16,53
97	6,76	87,09	11,61	5,50	31,52	16,44
98	7,15	86,92	11,59	5,50	31,33	16,36
99	7,53	86,75	11,57	5,50	31,13	16,27
100	7,91	86,59	11,54	5,50	30,94	16,18
101	8,29	86,42	11,52	5,50	30,74	16,09
102	8,67	86,26	11,50	5,50	30,55	16,00
103	9,04	86,09	11,48	5,50	30,36	15,92
104	9,41	85,93	11,46	5,50	30,16	15,83
105	9,78	85,76	11,44	5,50	29,97	15,74
106	10,15	85,60	11,41	5,50	29,78	15,66
107	10,51	85,44	11,39	5,50	29,59	15,57
108	10,87	85,28	11,37	5,50	29,39	15,48
109	11,23	85,12	11,35	5,50	29,20	15,40
110	11,58	84,97	11,33	5,50	29,02	15,31
111	11,93	84,81	11,31	5,50	28,83	15,22
112	12,27	84,65	11,29	5,50	28,64	15,14
113	12,62	84,50	11,27	5,50	28,46	15,05
114	12,95	84,35	11,25	5,50	28,27	14,97
115	13,29	84,19	11,23	5,50	28,09	14,88
116	13,62	84,04	11,21	5,50	27,91	14,80
117	13,95	83,89	11,19	5,50	27,73	14,72
118	14,27	83,75	11,17	5,50	27,55	14,64
119	14,59	83,60	11,15	5,50	27,38	14,56
120	14,90	83,46	11,13	5,50	27,21	14,48
121	15,21	83,31	11,11	5,00	27,03	13,78
122	15,52	83,17	11,09	5,00	26,86	13,70
123	15,82	83,03	11,07	5,00	26,70	13,62
124	16,11	82,89	11,05	5,00	26,53	13,55
125	16,40	82,76	11,03	5,00	26,37	13,48
126	16,69	82,62	11,02	5,00	26,21	13,40
127	16,97	82,49	11,00	5,00	26,05	13,33
128	17,25	82,36	10,98	5,00	25,89	13,26
129	17,52	82,23	10,96	5,00	25,74	13,19
130	17,78	82,10	10,95	5,00	25,59	13,13
131	18,04	81,98	10,93	5,00	25,44	13,06
132	18,30	81,86	10,91	5,00	25,29	12,99
133	18,55	81,74	10,90	5,00	25,15	12,93
134	18,79	81,62	10,88	5,00	25,01	12,86
135	19,03	81,50	10,87	5,00	24,88	12,80
136	19,26	81,39	10,85	5,00	24,74	12,74
137	19,49	81,28	10,84	5,00	24,61	12,68
138	19,71	81,17	10,82	5,00	24,48	12,62
139	19,93	81,07	10,81	5,00	24,36	12,57
140	20,14	80,96	10,80	5,00	24,24	12,51
141	20,34	80,86	10,78	5,00	24,12	12,46

142	20,54	80,77	10,77	5,00	24,00	12,40
143	20,73	80,67	10,76	5,00	23,89	12,35
144	20,92	80,58	10,74	5,00	23,78	12,30
145	21,10	80,49	10,73	5,00	23,68	12,26
146	21,27	80,40	10,72	5,00	23,58	12,21
147	21,44	80,32	10,71	5,00	23,48	12,16
148	21,60	80,24	10,70	5,00	23,38	12,12
149	21,75	80,16	10,69	5,00	23,29	12,08
150	21,90	80,09	10,68	5,00	23,21	12,04
151	22,04	80,02	10,67	5,00	23,12	12,00
152	22,17	79,95	10,66	5,00	23,04	11,96
153	22,30	79,88	10,65	5,00	22,97	11,93
154	22,42	79,82	10,64	5,00	22,89	11,90
155	22,54	79,76	10,63	5,00	22,83	11,86
156	22,65	79,71	10,63	5,00	22,76	11,83
157	22,75	79,65	10,62	5,00	22,70	11,81
158	22,84	79,61	10,61	5,00	22,64	11,78
159	22,93	79,56	10,61	5,00	22,59	11,76
160	23,01	79,52	10,60	5,00	22,54	11,73
161	23,09	79,48	10,60	5,00	22,50	11,71
162	23,15	79,45	10,59	5,00	22,45	11,69
163	23,21	79,42	10,59	5,00	22,42	11,67
164	23,27	79,39	10,59	5,00	22,38	11,66
165	23,31	79,36	10,58	5,00	22,35	11,65
166	23,35	79,34	10,58	5,00	22,33	11,63
167	23,39	79,33	10,58	5,00	22,31	11,62
168	23,41	79,31	10,57	5,00	22,29	11,62
169	23,43	79,30	10,57	5,00	22,28	11,61
170	23,44	79,30	10,57	5,00	22,27	11,60
171	23,45	79,29	10,57	5,00	22,26	11,60
172	23,45	79,29	10,57	5,00	22,26	11,60
173	23,44	79,30	10,57	5,00	22,26	11,60
174	23,42	79,31	10,57	5,00	22,27	11,60
175	23,40	79,32	10,58	5,00	22,28	11,61
176	23,37	79,33	10,58	5,00	22,29	11,62
177	23,34	79,35	10,58	5,00	22,31	11,62
178	23,29	79,38	10,58	5,00	22,33	11,63
179	23,24	79,40	10,59	5,00	22,36	11,65
180	23,18	79,43	10,59	5,00	22,39	11,66
181	23,12	79,46	10,60	5,00	22,42	11,68
182	23,05	79,50	10,60	6,00	22,46	12,77
183	22,97	79,54	10,61	6,00	22,51	12,80
184	22,89	79,58	10,61	6,00	22,55	12,82
185	22,80	79,63	10,62	6,00	22,60	12,84
186	22,70	79,68	10,62	6,00	22,66	12,87
187	22,59	79,73	10,63	6,00	22,71	12,90

188	22,48	79,79	10,64	6,00	22,77	12,93
189	22,36	79,85	10,65	6,00	22,84	12,96
190	22,24	79,91	10,66	6,00	22,91	12,99
191	22,11	79,98	10,66	6,00	22,98	13,03
192	21,97	80,05	10,67	6,00	23,06	13,07
193	21,83	80,12	10,68	6,00	23,14	13,11
194	21,67	80,20	10,69	6,00	23,22	13,15
195	21,52	80,28	10,70	6,00	23,31	13,19
196	21,35	80,36	10,71	6,00	23,40	13,23
197	21,18	80,45	10,73	6,00	23,49	13,28
198	21,01	80,53	10,74	6,00	23,59	13,33
199	20,82	80,62	10,75	6,00	23,69	13,38
200	20,64	80,72	10,76	6,00	23,80	13,43
201	20,44	80,81	10,78	6,00	23,91	13,48
202	20,24	80,91	10,79	6,00	24,02	13,54
203	20,03	81,02	10,80	6,00	24,13	13,59
204	19,82	81,12	10,82	6,00	24,25	13,65
205	19,60	81,23	10,83	6,00	24,37	13,71
206	19,38	81,34	10,84	6,00	24,49	13,77
207	19,15	81,45	10,86	6,00	24,62	13,83
208	18,91	81,56	10,87	6,00	24,75	13,90
209	18,67	81,68	10,89	6,00	24,88	13,96
210	18,42	81,80	10,91	6,00	25,02	14,03
211	18,17	81,92	10,92	6,00	25,16	14,09
212	17,91	82,04	10,94	6,00	25,30	14,16
213	17,65	82,17	10,96	5,50	25,44	13,64
214	17,38	82,30	10,97	5,50	25,59	13,71
215	17,11	82,42	10,99	5,50	25,74	13,78
216	16,83	82,56	11,01	5,50	25,89	13,85
217	16,55	82,69	11,03	5,50	26,05	13,92
218	16,26	82,83	11,04	5,50	26,20	13,99
219	15,96	82,96	11,06	5,50	26,36	14,07
220	15,67	83,10	11,08	5,50	26,52	14,14
221	15,36	83,24	11,10	5,50	26,69	14,22
222	15,06	83,38	11,12	5,50	26,85	14,29
223	14,74	83,53	11,14	5,50	27,02	14,37
224	14,43	83,67	11,16	5,50	27,19	14,45
225	14,11	83,82	11,18	5,50	27,36	14,53
226	13,78	83,97	11,20	5,50	27,53	14,61
227	13,45	84,12	11,22	5,50	27,71	14,69
228	13,12	84,27	11,24	5,50	27,88	14,77
229	12,79	84,42	11,26	5,50	28,06	14,85
230	12,45	84,58	11,28	5,50	28,24	14,93
231	12,10	84,73	11,30	5,50	28,42	15,01
232	11,75	84,89	11,32	5,50	28,60	15,10
233	11,40	85,04	11,34	5,50	28,78	15,18

234	11,05	85,20	11,36	5,50	28,97	15,26
235	10,69	85,36	11,38	5,50	29,15	15,35
236	10,33	85,52	11,40	5,50	29,34	15,43
237	9,97	85,68	11,42	5,50	29,53	15,52
238	9,60	85,85	11,45	5,50	29,71	15,60
239	9,23	86,01	11,47	5,50	29,90	15,69
240	8,86	86,17	11,49	5,50	30,09	15,77
241	8,48	86,34	11,51	5,50	30,28	15,86
242	8,10	86,50	11,53	5,50	30,47	15,94
243	7,72	86,67	11,56	5,50	30,66	16,03
244	7,34	86,84	11,58	4,50	30,85	14,75
245	6,96	87,00	11,60	4,50	31,04	14,83
246	6,57	87,17	11,62	4,50	31,24	14,91
247	6,18	87,34	11,65	4,50	31,43	14,99
248	5,79	87,51	11,67	4,50	31,62	15,07
249	5,40	87,68	11,69	4,50	31,81	15,15
250	5,01	87,85	11,71	4,50	32,00	15,23
251	4,61	88,02	11,74	4,50	32,19	15,31
252	4,22	88,19	11,76	4,50	32,38	15,39
253	3,82	88,36	11,78	4,50	32,57	15,47
254	3,42	88,53	11,80	4,50	32,76	15,54
255	3,02	88,71	11,83	4,50	32,95	15,62
256	2,62	88,88	11,85	4,50	33,14	15,70
257	2,22	89,05	11,87	4,50	33,33	15,77
258	1,81	89,22	11,90	4,50	33,51	15,85
259	1,41	89,40	11,92	4,50	33,70	15,92
260	1,01	89,57	11,94	4,50	33,89	16,00
261	0,61	89,74	11,97	4,50	34,07	16,07
262	0,20	89,91	11,99	4,50	34,25	16,15
263	-0,20	90,09	12,01	4,50	34,43	16,22
264	-0,61	90,26	12,03	4,50	34,62	16,29
265	-1,01	90,43	12,06	4,50	34,80	16,37
266	-1,41	90,60	12,08	4,50	34,97	16,44
267	-1,81	90,78	12,10	4,50	35,15	16,51
268	-2,22	90,95	12,13	4,50	35,33	16,58
269	-2,62	91,12	12,15	4,50	35,50	16,65
270	-3,02	91,29	12,17	4,50	35,67	16,71
271	-3,42	91,47	12,20	4,50	35,84	16,78
272	-3,82	91,64	12,22	4,50	36,01	16,85
273	-4,22	91,81	12,24	4,50	36,18	16,91
274	-4,61	91,98	12,26	4,50	36,35	16,98
275	-5,01	92,15	12,29	4,50	36,51	17,04
276	-5,40	92,32	12,31	4,50	36,67	17,11
277	-5,79	92,49	12,33	4,50	36,83	17,17
278	-6,18	92,66	12,35	4,50	36,99	17,23
279	-6,57	92,83	12,38	4,50	37,15	17,29

280	-6,96	93,00	12,40	4,50	37,30	17,35
281	-7,34	93,16	12,42	4,50	37,46	17,41
282	-7,72	93,33	12,44	4,50	37,61	17,47
283	-8,10	93,50	12,47	4,50	37,76	17,52
284	-8,48	93,66	12,49	4,50	37,90	17,58
285	-8,86	93,83	12,51	4,50	38,05	17,63
286	-9,23	93,99	12,53	4,50	38,19	17,69
287	-9,60	94,15	12,55	4,50	38,33	17,74
288	-9,97	94,32	12,58	4,50	38,47	17,79
289	-10,33	94,48	12,60	4,50	38,60	17,84
290	-10,69	94,64	12,62	4,50	38,74	17,89
291	-11,05	94,80	12,64	4,50	38,87	17,94
292	-11,40	94,96	12,66	4,50	39,00	17,99
293	-11,75	95,11	12,68	4,50	39,13	18,04
294	-12,10	95,27	12,70	4,50	39,25	18,08
295	-12,45	95,42	12,72	4,50	39,37	18,13
296	-12,79	95,58	12,74	4,50	39,49	18,17
297	-13,12	95,73	12,76	4,50	39,61	18,21
298	-13,45	95,88	12,78	4,50	39,73	18,25
299	-13,78	96,03	12,80	4,50	39,84	18,30
300	-14,11	96,18	12,82	4,50	39,95	18,34
301	-14,43	96,33	12,84	4,50	40,06	18,37
302	-14,74	96,47	12,86	4,50	40,17	18,41
303	-15,06	96,62	12,88	4,50	40,27	18,45
304	-15,36	96,76	12,90	4,50	40,37	18,49
305	-15,67	96,90	12,92	5,50	40,47	20,12
306	-15,96	97,04	12,94	5,50	40,57	20,15
307	-16,26	97,17	12,96	5,50	40,66	20,19
308	-16,55	97,31	12,97	5,50	40,76	20,22
309	-16,83	97,44	12,99	5,50	40,85	20,26
310	-17,11	97,58	13,01	5,50	40,94	20,29
311	-17,38	97,70	13,03	5,50	41,02	20,32
312	-17,65	97,83	13,04	5,50	41,11	20,35
313	-17,91	97,96	13,06	5,50	41,19	20,38
314	-18,17	98,08	13,08	5,50	41,27	20,41
315	-18,42	98,20	13,09	5,50	41,35	20,43
316	-18,67	98,32	13,11	5,50	41,42	20,46
317	-18,91	98,44	13,13	5,50	41,49	20,49
318	-19,15	98,55	13,14	5,50	41,57	20,51
319	-19,38	98,66	13,16	5,50	41,63	20,54
320	-19,60	98,77	13,17	5,50	41,70	20,56
321	-19,82	98,88	13,18	5,50	41,77	20,58
322	-20,03	98,98	13,20	5,50	41,83	20,60
323	-20,24	99,09	13,21	5,50	41,89	20,62
324	-20,44	99,19	13,22	5,50	41,95	20,64
325	-20,64	99,28	13,24	5,50	42,01	20,66

326	-20,82	99,38	13,25	5,50	42,06	20,68
327	-21,01	99,47	13,26	5,50	42,11	20,70
328	-21,18	99,55	13,27	5,50	42,17	20,72
329	-21,35	99,64	13,29	5,50	42,21	20,73
330	-21,52	99,72	13,30	5,50	42,26	20,75
331	-21,67	99,80	13,31	5,50	42,31	20,76
332	-21,83	99,88	13,32	5,50	42,35	20,78
333	-21,97	99,95	13,33	5,50	42,39	20,79
334	-22,11	100,02	13,34	5,50	42,43	20,81
335	-22,24	100,09	13,34	4,50	42,47	19,20
336	-22,36	100,15	13,35	4,50	42,51	19,21
337	-22,48	100,21	13,36	4,50	42,54	19,22
338	-22,59	100,27	13,37	4,50	42,57	19,23
339	-22,70	100,32	13,38	4,50	42,60	19,24
340	-22,80	100,37	13,38	4,50	42,63	19,25
341	-22,89	100,42	13,39	4,50	42,66	19,26
342	-22,97	100,46	13,39	4,50	42,68	19,27
343	-23,05	100,50	13,40	4,50	42,71	19,27
344	-23,12	100,54	13,40	4,50	42,73	19,28
345	-23,18	100,57	13,41	4,50	42,75	19,29
346	-23,24	100,60	13,41	4,50	42,77	19,29
347	-23,29	100,62	13,42	4,50	42,79	19,30
348	-23,34	100,65	13,42	4,50	42,80	19,30
349	-23,37	100,67	13,42	4,50	42,81	19,31
350	-23,40	100,68	13,42	4,50	42,83	19,31
351	-23,42	100,69	13,43	4,50	42,84	19,32
352	-23,44	100,70	13,43	4,50	42,84	19,32
353	-23,45	100,71	13,43	4,50	42,85	19,32
354	-23,45	100,71	13,43	4,50	42,86	19,32
355	-23,44	100,70	13,43	4,50	42,86	19,33
356	-23,43	100,70	13,43	4,50	42,86	19,33
357	-23,41	100,69	13,43	4,50	42,86	19,33
358	-23,39	100,67	13,42	4,50	42,86	19,33
359	-23,35	100,66	13,42	4,50	42,86	19,33
360	-23,31	100,64	13,42	4,50	42,85	19,33
361	-23,27	100,61	13,41	4,50	42,84	19,33
362	-23,21	100,58	13,41	4,50	42,83	19,32
363	-23,15	100,55	13,41	4,50	42,82	19,32
364	-23,09	100,52	13,40	4,50	42,81	19,32
365	-23,01	100,48	13,40	4,50	42,80	19,31

5.2 Validação da base de dados do Global Solar Atlas

Para validação da base de dados do Global Solar Atlas, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos do Global Solar Atlas e de outras bases de dados, entre elas o CRESESB, o INPE e a NASA, além de comparar também com o modelo linear teórico de Ångström-Prèscott. O CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, foi criado em 1994, e sua base de dados foi obtida com base num estudo de 1982.

O INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, lançou um programa de análise de dados solares em 2006, e utiliza série de dados de satélites obtidos durante 17 anos. O INPE e o CRESESB, por serem nacionais, possuem dados referentes apenas à região brasileira.

A NASA – National Aeronautics and Space Administration, possui uma série de dados de 1983 a 2005 e com cobertura internacional.

Vale destacar que o Global Solar Atlas possui uma série de dados de 1999 a 2015, além de possuir cobertura internacional e de mostrar com transparência os modelos e métodos de obtenção dos resultados.

Na Figura 5.1 até a Figura 5.4, Swera significa Solar and Wind Energy Resource Assessment, que foi a plataforma de onde os dados da NASA e do INPE foram retirados. Cresesb 0° significa dados do CRESESB que foram obtidos para painel horizontal (GHI). O Global Solar Atlas apresenta apenas dados de média anual, mas esses dados podem ser comparados com todas as outras bases de dados e com o modelo linear teórico (no caso do GHI apenas). TILT significa irradiação global inclinada na latitude.

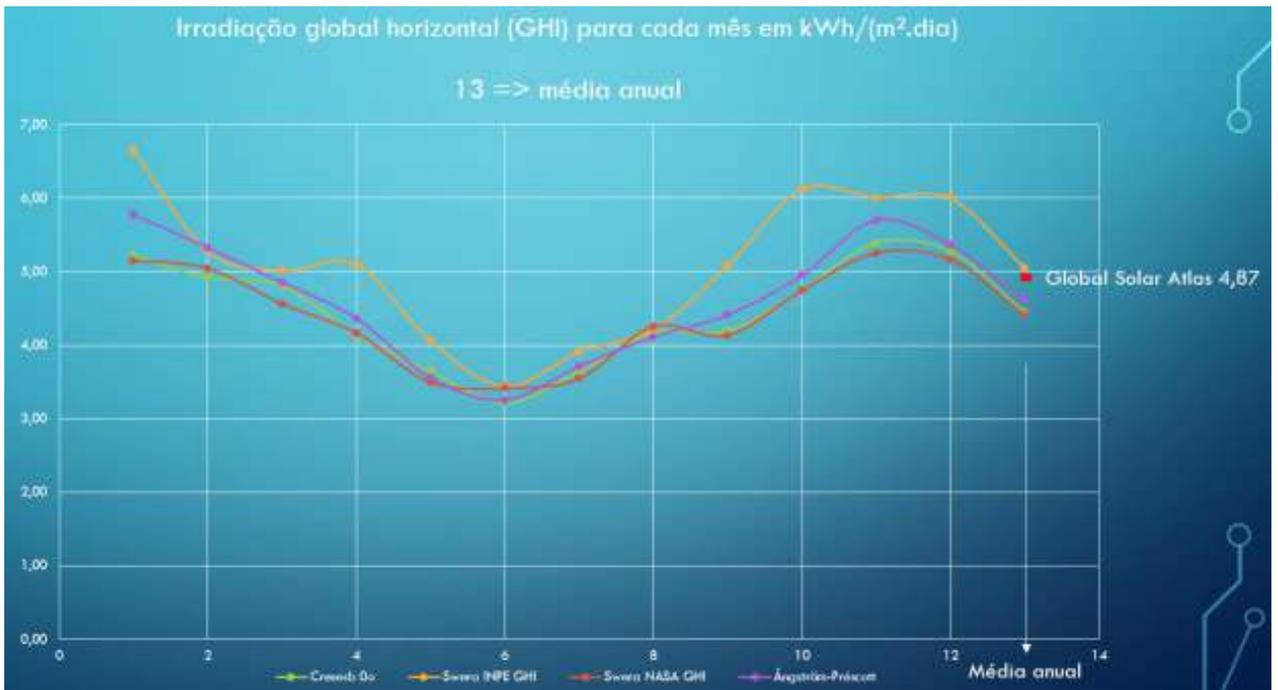


Figura 5.1 – Comparação de valores de Irradiação Global Horizontal entre bases de dados do Global Solar Atlas, CRESESB, INPE, NASA e modelo teórico linear de Ångström-Prèscott.

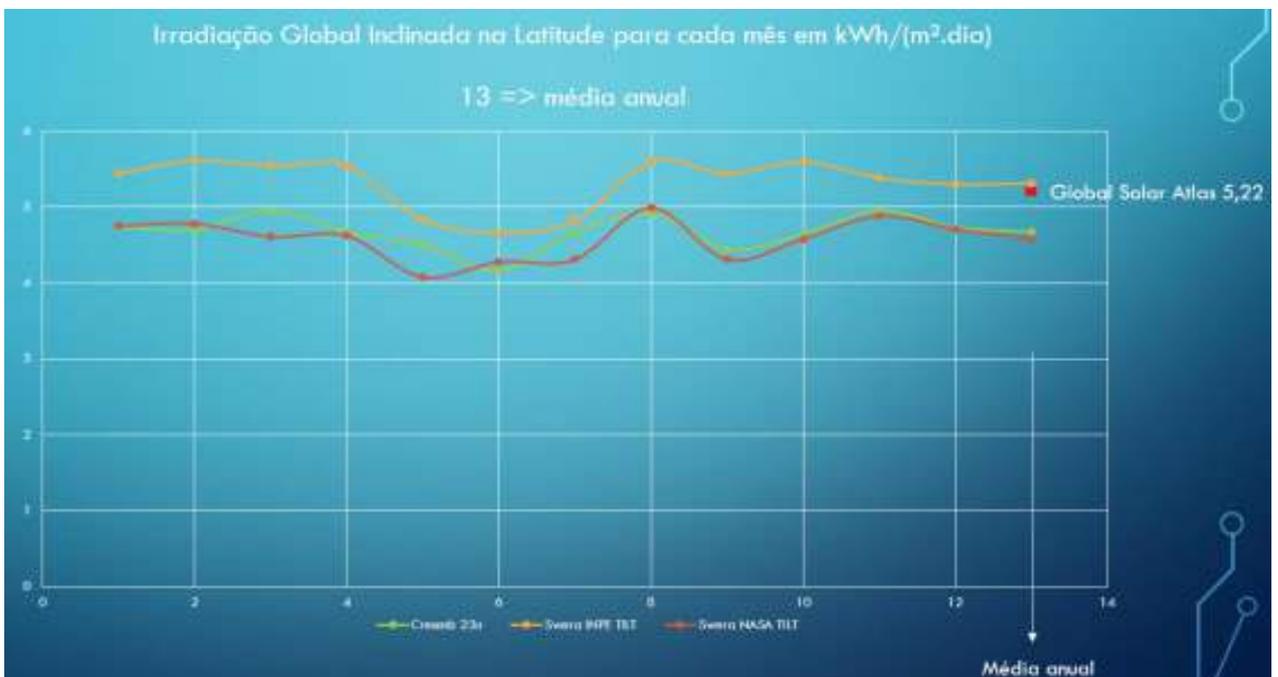


Figura 5.2 - Comparação de valores de Irradiação Global Inclinada na Latitude entre bases de dados do Global Solar Atlas, CRESESB, INPE, NASA.

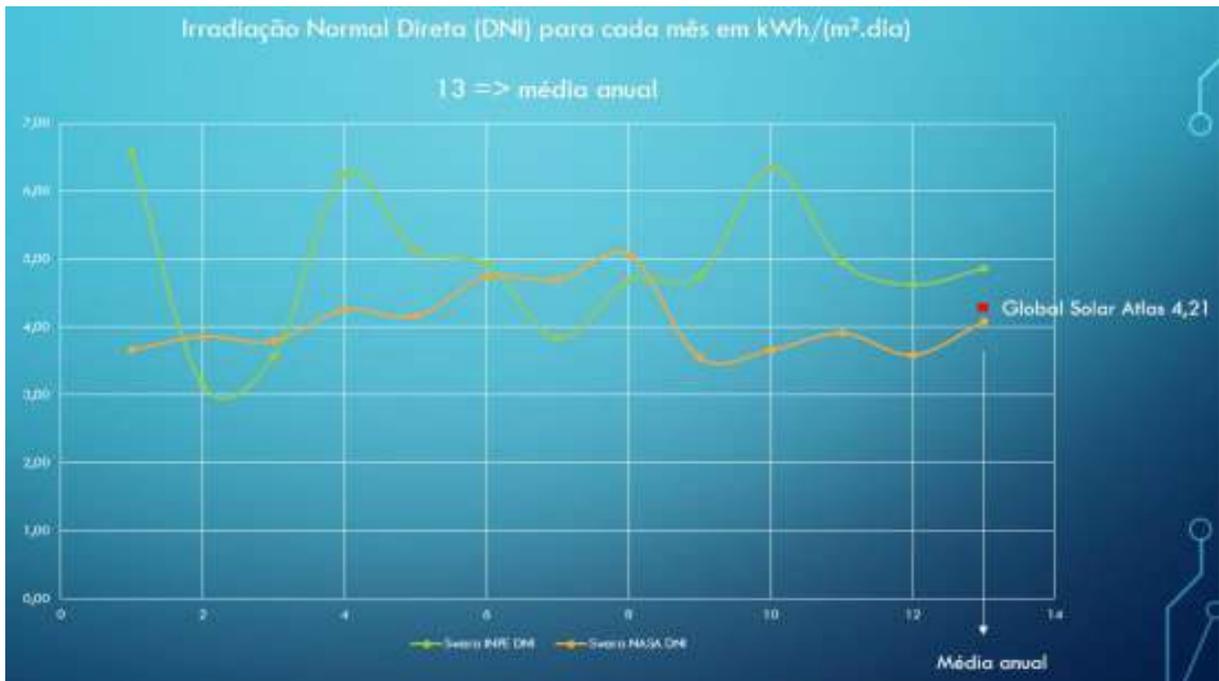


Figura 5.3 - Comparação de valores de Irradiação Normal Direta entre bases de dados do Global Solar Atlas, INPE, NASA.

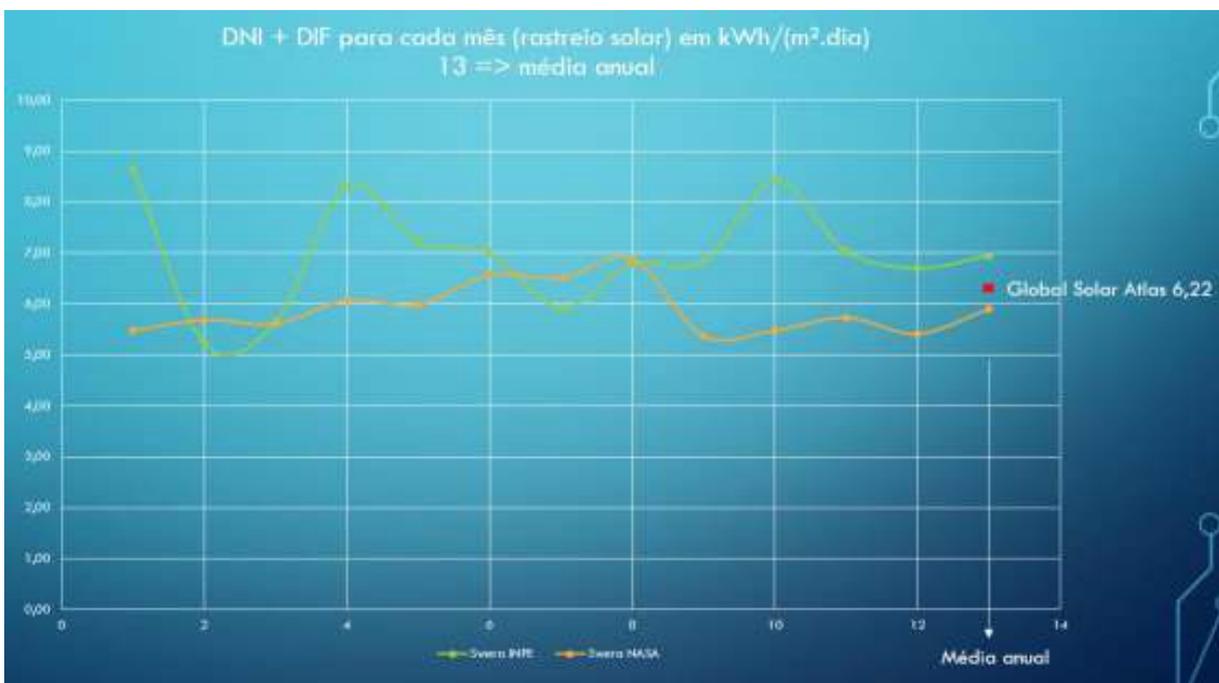


Figura 5.4 - Comparação de valores da soma da Irradiação Normal Direta com a Irradiação Difusa entre bases de dados do Global Solar Atlas, INPE, NASA.

Pode-se concluir que os dados do Global Solar Atlas permaneceram próximos dos dados das outras bases para o GHI, DNI, Irradiação Global Inclinada e para o caso do rastreo solar, além de permanecerem próximos ao modelo teórico linear.

A mesma análise de eficiência do rastreamento solar foi feita para as bases de dados do INPE e da NASA, obtendo os resultados expressos na Tabela 5.3. Vale destacar que a NASA e o INPE não possuíam dados a respeito da irradiação difusa (DIF) das regiões, e, portanto, as irradiações difusas foram calculadas com base nos dados de irradiação difusa do Global Solar Atlas, por isso e por outros motivos – como possuir uma série de dados mais extensa e mais recente – o Global Solar Atlas apresenta os resultados com maior precisão.

Tabela 5.3 – Ganho de eficiência do rastreamento solar em relação a painel horizontal e a painel inclinado na latitude, utilizando as bases de dados do INPE, NASA E Global Solar Atlas.

	Swera INPE	Swera NASA	Global Solar Atlas
Eficiência ao inclinado	31%	29%	19%
Eficiência ao horiz.	38%	34%	28%

5.3 Método de cálculo dos dimensionamentos

Conforme os dados da Figura 4.1 e com a população de projeto, foi possível estimar o consumo de água diário, que está apresentado na Tabela 5.4. Foram utilizadas no cálculo a equação:

$$V_{consumo} = \sum(Q_{pu} \times T_u \times \text{frequência de uso}) \quad (20)$$

Tabela 5.4 – Parâmetros de consumo de água aplicados para uma população de 24 pessoas para obtenção do volume de consumo diário.

Pessoas	24
Chuveiro	
Litros/dia/pessoa	113
Litros/dia (total)	2712
Litros/mês (total)	81360
Máquina de lavar pratos	
Carga/pessoa/dia	0,1
Litros/carga	18
Litros/mês (total)	1296
Máquina de lavar roupa	
Carga/pessoa/dia	0,37
Litro/ciclo	108
Litros/mês (total)	28771,2
Torneira da cozinha	
Minuto/pessoa/dia	4
Litros/minuto	9

Litros/mês (total)	25920
Torneira do banheiro	
Minuto/pessoa/dia	4
Litros/minuto	9
Litros/mês (total)	25920
Total	
L/dia	5442,24

E do consumo, obtém-se o volume armazenado de água necessário, por meio da equação:

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz.} - T_{ambiente}} \quad (21)$$

A temperatura média anual da cidade de SJC equivale a 19,3°C. Sugere-se a utilização de 40°C para a temperatura de consumo e 50°C para a temperatura de armazenamento. Além disso, sugere-se que o volume de armazenamento seja maior ou igual a 75% do volume de consumo. Com isso, pode-se obter a Tabela 5.5

Tabela 5.5 – Cálculo do volume armazenado a partir do volume de consumo.

Vconsumo	5442,24	L
Tconsumo	40	oC
Tambiente	19,3	oC
Tarmaz.	50	oC
Varmaz calculado	3669,5234	L
75% de Vconsumo	4081,68	L
Varmaz final	4081,68	L

Por fim calcula-se a energia útil diária por meio da equação:

$$E_{\acute{u}til} = V_{armaz} \times \rho \times C_p \times (T_{armaz} - T_{ambiente})3600 \quad (22)$$

O resultado está apresentado na Tabela 5.6

Tabela 5.6 – Obtenção da Energia Útil mensal a partir do volume armazenado.

Varmaz	4081,68	L
ρ	1	kg/L
C_p	4,18	kJ/kg.K
Tarmaz	50	oC
Tambiente	19,3	oC
Eútil diário	145,49602	kWh/dia
Eútil mensal	4364,8806	kWh/mês

Obtido o consumo de energia e a radiação solar necessária, e com o inversor e os módulos fotovoltaicos determinados, já mostrados nos itens 4.4 e 4.5, os dimensionamentos podem ser efetuados, e as variáveis serão obtidas da seguinte forma:

A potência de saída será calculada por meio de:

$$P_{AC} = \frac{E_{CD}}{HSP} \quad (14)$$

A potência de entrada no inversor será calculada por meio de:

$$P_{PV} = \frac{P_{AC}}{\eta_{EURO}} \quad (15)$$

A quantidade de módulos no painel será calculada por meio de:

$$P_{PV} = \frac{P_{AC}}{\eta_{EURO}} \quad (15)$$

$$M_{TOTAL} = \frac{P_{PV}}{P_{PEAK}} \quad (16)$$

O máximo de módulos em série no inversor é dado por:

$$N_{max} = \frac{U_{CC,INV}}{V_{OC}} \quad (17)$$

O mínimo de módulos em série no inversor é dado por:

$$N_{min,MPPT} = \frac{U_{minMPPT,INV}}{V_{MPP}} \quad (18)$$

O máximo de fileiras (strings) em paralelo é dado por:

$$N_{strings} = \frac{I_{max,INV}}{I_{SC,string}} \quad (19)$$

5.4 Dimensionamento de módulo fotovoltaico estático

Para fazer uma comparação adequada entre o sistema fotovoltaico e o sistema térmico solar, o sistema fotovoltaico foi dimensionado para um mesmo consumo de eletricidade do que o sistema térmico solar, apesar da produção de eletricidade também poder ser aplicada no uso de todos os aparelhos elétricos. Vale ressaltar que o sistema fotovoltaico não precisa sustentar 100% do consumo de eletricidade de uma casa, uma vez que a residência está conectada também à fonte de eletricidade convencional.

Os resultados do dimensionamento estão apresentados na Tabela 5.7, lembrando que o custo de disponibilidade é nulo, conforme o item 3.2.2.

Tabela 5.7 – Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento de módulo estático e resultados obtidos.

Elemento	Símbolo	Valor	Unidade
Consumo de Eletricidade em Média Mensal	F_{MM}	4364,8806	kWh/mês
Custo de Disponibilidade (Mensal)	F_{min}	0	kWh/mês
Energia de compensação Mensal = $F_{mm} - F_{min}$	E_c	4364,8806	kWh/mês
Energia de Compensação Média Diária =	E_{cd}	145,50	kWh/dia
Radiação Solar diária em média anual	HSP	5,22	kWh/m ² .dia ⁻¹
Potência de Saída do inversor =	P_{AC}	27,87	kW
Eficiência média do inversor (Rendimento europeu)	η_{EURO}	93%	%
Potência de Entrada no Inversor =	P_{PV}	29,91	kWp
Potência Pico do módulo fotovoltaico (corrigida)	W_p	241,3143	W
Tensão em circuito aberto do módulo fotovoltaico (STC)	V_{oc}	37,7	V
Tensão em máxima potência do módulo fotovoltaico (Corrigida)	V_{MPP}	28,532052	V
Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico (corrigida)	I_{sc}	9,33664342	A
Quantidade módulos no painel =	M_{TOTAL}	124	UN
Tensão máxima de entrada do inversor	$U_{DC,inv}$	600	V
Tensão mínima de entrada do inversor	$U_{minMPP,inv}$	224	V
Corrente máxima de entrada do inversor	$I_{max,inv}$	12	A
Máximo de módulos em série no inversor =	N_{max}	15	UN
Mínimo de módulos em série no inversor =	N_{min}	8	UN
Máximo de fileiras (<i>strings</i>) em paralelo =	$N_{strings}$	1	UN

Observação: a radiação solar diária necessária foi calculada utilizando o mês de menor média de radiação solar diária, e considerando o painel solar com inclinação de 32°.

A área de cada módulo, pelas especificações mecânicas, é dada por 1,6085 m², logo para 124 módulos, será necessária uma área ocupada de 199,45 m².

5.5 Dimensionamento de módulo fotovoltaico com rastreamento solar

Cálculo idêntico ao item 5.4, com alteração somente da radiação solar necessária. Os resultados do dimensionamento estão apresentados na Tabela 5.8 e a radiação solar diária necessária foi calculada utilizando o mês de menor média de radiação solar diária.

Tabela 5.8 - Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento de módulo com rastreo solar e resultados obtidos.

Elemento	Símbolo	Valor	Unidade
Consumo de Eletricidade em Média Mensal	F_{MM}	4364,8806	kWh/mês
Custo de Disponibilidade (Mensal)	F_{min}	0	kWh/mês
Energia de compensação Mensal = $F_{mm} - F_{min}$	E_c	4364,8806	kWh/mês
Energia de Compensação Média Diária =	E_{cd}	145,50	kWh/dia
Radiação Solar diária em média anual	HSP	6,22	kWh/m ² .dia ⁻¹
Potência de Saída do Inversor =	P_{AC}	23,39	kW
Eficiência média do inversor (Rendimento europeu)	η_{EURO}	93%	%
Potência de Entrada no Inversor =	P_{PV}	25,10	kWp
Potência Pico do módulo fotovoltaico (corrigida)	W_p	241,3143	W
Tensão em circuito aberto do módulo fotovoltaico (STC)	V_{oc}	37,7	V
Tensão em máxima potência do módulo fotovoltaico (Corrigida)	V_{MPP}	28,532052	V
Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico (corrigida)	I_{sc}	9,33664342	A
Quantidade módulos no painel =	M_{TOTAL}	104	UN
Tensão máxima de entrada do inversor	$U_{DC,inv}$	600	V
Tensão mínima de entrada do inversor	$U_{minMPP,inv}$	224	V
Corrente máxima de entrada do inversor	$I_{max,inv}$	12	A
Máximo de módulos em série no inversor =	N_{max}	15	UN
Mínimo de módulos em série no inversor =	N_{min}	8	UN
Máximo de fileiras (<i>strings</i>) em paralelo =	$N_{strings}$	1	UN

Para 104 módulos solares, será necessária uma área ocupada de 167,28 m².

5.6 Dimensionamento de coletor convencional com painel estático

Tabela 5.9 - Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento de coletor solar convencional e resultados obtidos.

Eperdas	21,8244	kWh/dia
Frta	0,83	
Frul	7,11	
PMDEE	2,6	kWh/(m ² .dia)
Ig	5,22	kWh/(m ² .dia)
$\beta - \beta_{ot}$	0	graus
γ	0	graus
FC instal	1	
Acoletora	60,42126	m ²

Custo de investimento do sistema convencional com painel estático:

O custo de investimento no Brasil para sistemas de aquecimento de água para residências multifamiliares é de 210 a 270 euros por metro quadrado de coletor.

Logo o custo de investimento para 60,42 m² estará entre 48596 e 62482 reais.

Fazendo as proporções entre o LCOH do sistema de aquecimento de água para residências multifamiliares no Brasil (0,025 euro/kWh) com o LCOE do sistema fotovoltaico no país (0,13-0,2 dólar/kWh), tem-se que o custo de investimento para o sistema fotovoltaico está entre 215095 e 425462 reais para o sistema sem rastreamento, e para o sistema fotovoltaico com rastreio solar está entre 180402,144 e 356839 reais, desconsiderando os gastos com motor e o sistema de controle.

6 Conclusão

No caso de São José dos Campos, o sistema térmico solar de aquecimento de água mostrou-se aparentemente mais viável do que o sistema fotovoltaico, mesmo que esse tenha o rastreamento solar, o custo do sistema fotovoltaico, calculado no item 5.6, é cerca de 4 a 6 vezes maior do que o sistema por coletores solares convencionais, mostrando o quão mais forte é a indústria térmico solar em relação à indústria fotovoltaica no país.

O rastreamento solar é uma tecnologia eficiente, que não possui custos muito altos de implantação e manutenção e que pode fornecer um aumento de eficiência de 19% em relação a painéis com inclinação ótima e aumento de eficiência de 28% em relação a painéis horizontais, de acordo com dados do Global Solar Atlas e aumento de eficiência de 31% em relação a painéis com inclinação ótima e aumento de eficiência de 38% em relação a painéis horizontais, de acordo com dados do INPE e portanto é uma tecnologia que precisa ser mais difundida na indústria para que haja mais mão de obra especializada capaz de utilizá-la e para que haja ganhos de escala em relação a utilização da mesma. Por mais que o sistema térmico solar no país ainda seja mais viável do que o sistema fotovoltaico, as perspectivas futuras mostram que esse quadro se inverterá, assim como já está acontecendo na maior parte do mundo.

Assim, o rastreamento solar mostra-se promissor para o futuro do país. Mas é necessário ainda um investimento maior em pesquisas, estudos e desenvolvimento do sistema de rastreamento para que esse sistema tenha força para fazer parte do mercado e contribuir com ganhos de eficiência para o sistema fotovoltaico.

7 Referências

- ALVES, E. Painéis Fotovoltaicos usando Rastreamento Solar Baseado em Sistemas Embarcados Estudo do Ganho de Energia Elétrica em. 2015.
- BLAKERS, A. Sustainable Energy Options. v. 39, p. 559–589, 2015.
- CHANG, H. et al. Experimental study on comprehensive utilization of solar energy and energy balance in an integrated solar house. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 967–976, 2015.
- IEA, I. E. A. Renewables information: Overview 2017. **IEA Statistics**, p. 8, 2017.
- IEA SHC. Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme Annual Report. p. 2–84, 2016.
- IRENA. **REthinking Energy**. [s.l: s.n.]. v. 55
- KHETARPAL, D. World Energy Resources: Solar 2016. **World Energy Council**, p. 78, 2016.
- LENZ, A. M. et al. Análise da energia absorvida e eficiência de um coletor solar de placa plana. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 39, n. 3, p. 279–284, 2017.
- LIGADOS, S.; SISTEMAS, À. R. E. Projecto interdisciplinar ii. 2009.
- MOHAJERI, N. et al. Effects of urban compactness on solar energy potential. **Renewable Energy**, v. 93, p. 469–482, 2016.
- NASCIMENTO, R. Energia Solar No Brasil: Situação E Perspectivas. 2017.
- PANDEY, A. K. et al. Energy and exergy performance evaluation of a typical solar photovoltaic module. **Thermal Science**, v. 19, p. 147, 2015.
- PAPAEFTHIMIOU, S.; SOULIOTIS, M.; ANDRIOSOPOULOS, K. Grid Parity of Solar Energy: Imminent Fact or Future’s Fiction? **The Energy Journal**, v. 37, p. 263–276, 2016.
- PRADO, G. O. et al. Estado da arte em mecanismos de rastreamento solar. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, p. 1–8, 2014.
- PRINSLOO, G. J.; DOBSON, R. T. **Solar Tracking**. [s.l: s.n.].
- RAMOS, A. et al. Solar-Thermal and Hybrid Photovoltaic-Thermal Systems for Renewable Heating. **Grantham Institute, Briefing paper No 22. Imperial College London**, n. 22, p. 1–20, 2017.
- REN21. Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial. **Ren21**, p. 1–31, 2016.
- REN21. **Renewables 2017: global status report**. [s.l: s.n.]. v. 72
- SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual

framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, n. June 2016, p. 590–601, 2017.

SCHMALENSEE, R. The future of solar energy: A personal assessment. **Energy Economics**, v. 52, p. S142–S148, 2015.

VIEIRA, R. G. Análise Comparativa Do Desempenho Entre Um Pannel Solar Estático E Com Rastreamento No Município De Mossoró-Rn. p. 86, 2014.

WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M.; MAUTHNER, F. Solar Heat Worldwide Global Market Development and Trends in 2016. **Shc**, p. 86, 2017.

A Anexos

A.1 Mapas do mundo com valores das variáveis que contribuem para boas condições de instalação de sistema fotovoltaico.

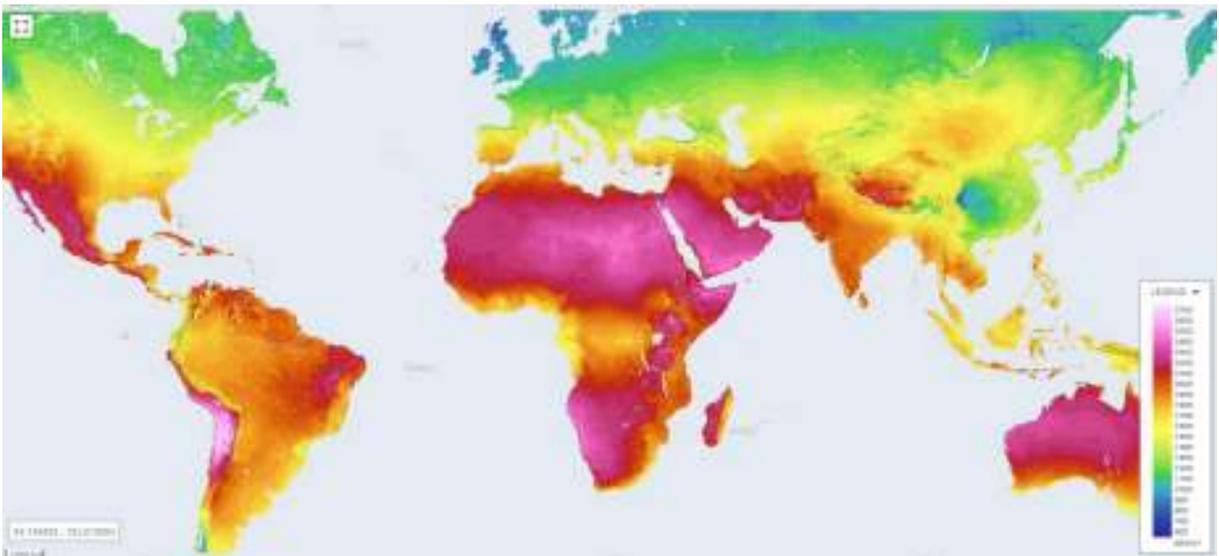


Figura A.0.1 – Mapa de Irradiação Global Horizontal (GHI) em kWh/m² no mundo (SOLARGIS, 2016).

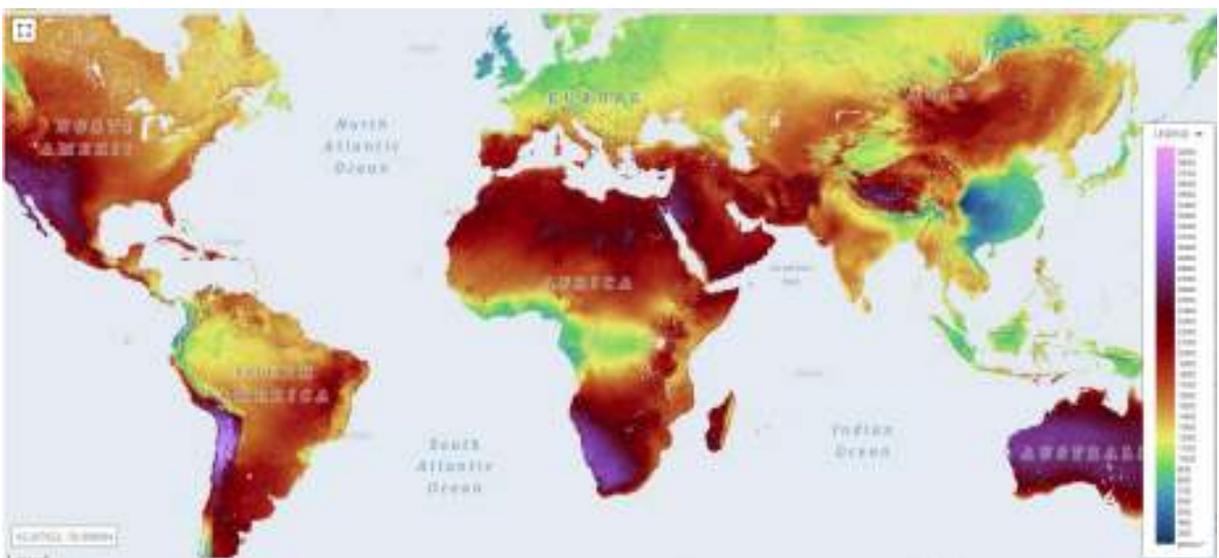


Figura A.0.2 – Mapa de Irradiação Normal Direta (DNI) em kWh/m² no mundo (SOLARGIS, 2016).

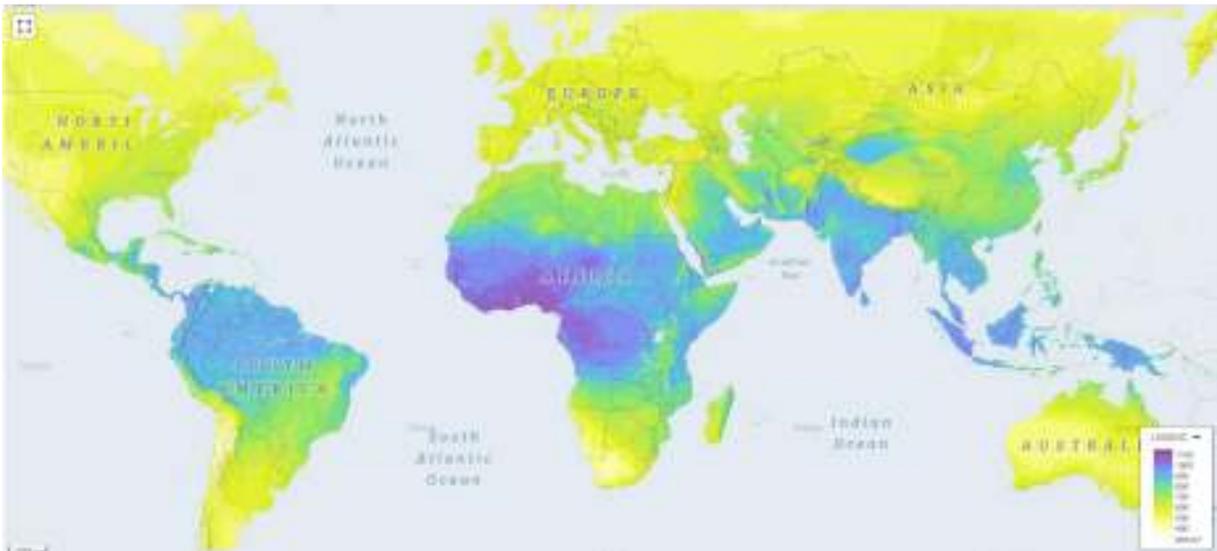


Figura A.0.3 – Mapa de Irradiação Difusa (DIF) em kWh/m² no mundo (SOLARGIS, 2016).

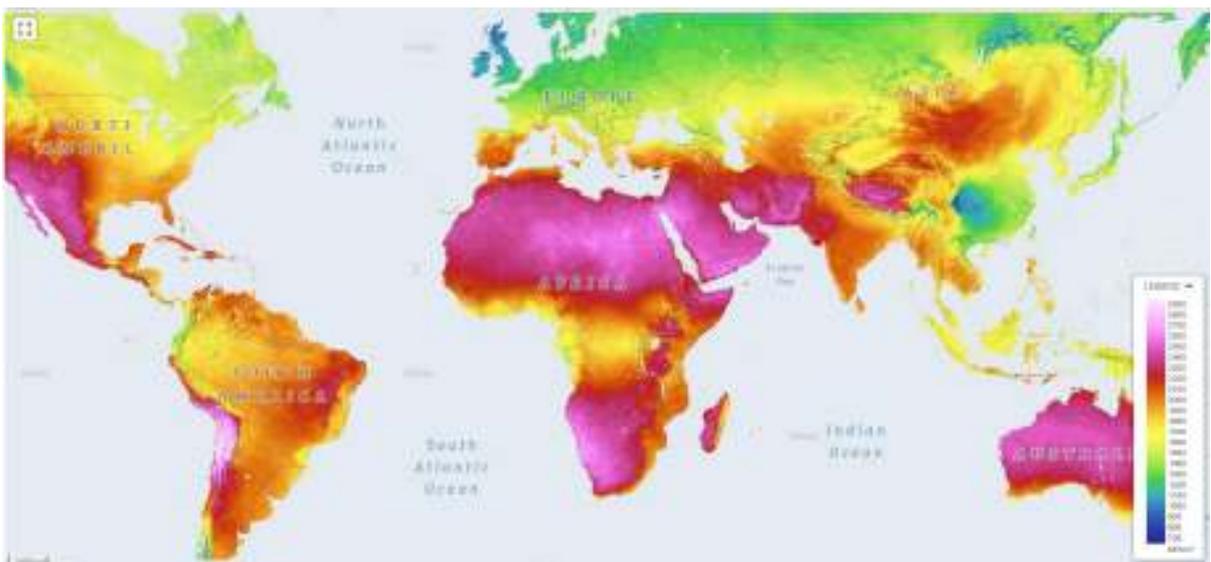


Figura A.0.4 – Mapa de Irradiação Global Inclinada com a latitude (GTI) em kWh/m² no mundo (SOLARGIS, 2016)

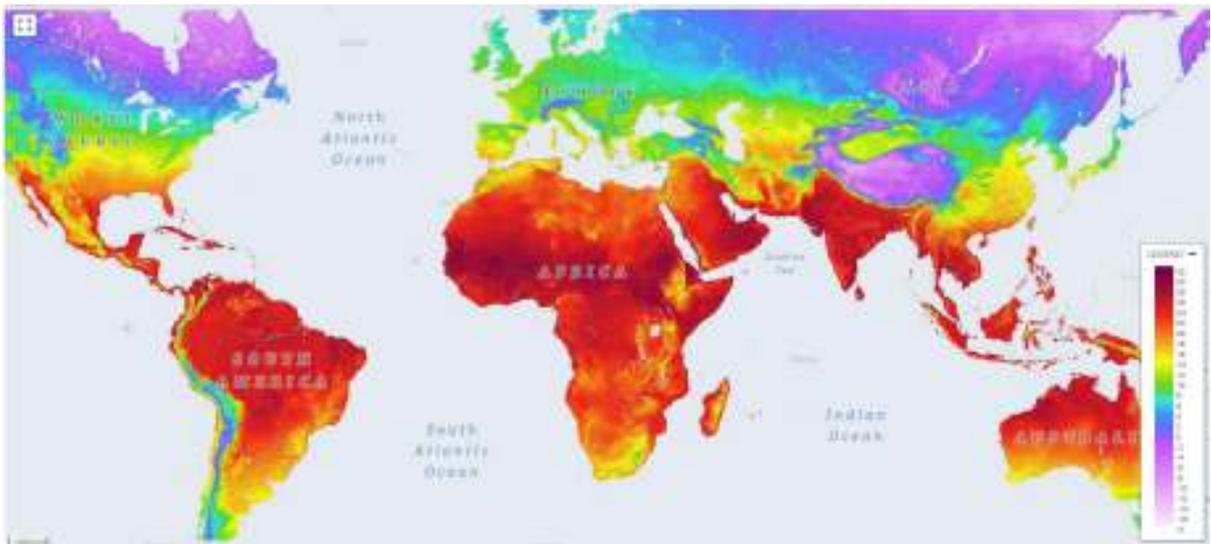


Figura A.0.5 – Mapa de Temperatura, em °C, no mundo (SOLARGIS, 2016)



Figura A.0.6 – Mapa de Elevação de Terreno, em m, no mundo. (SOLARGIS, 2016)

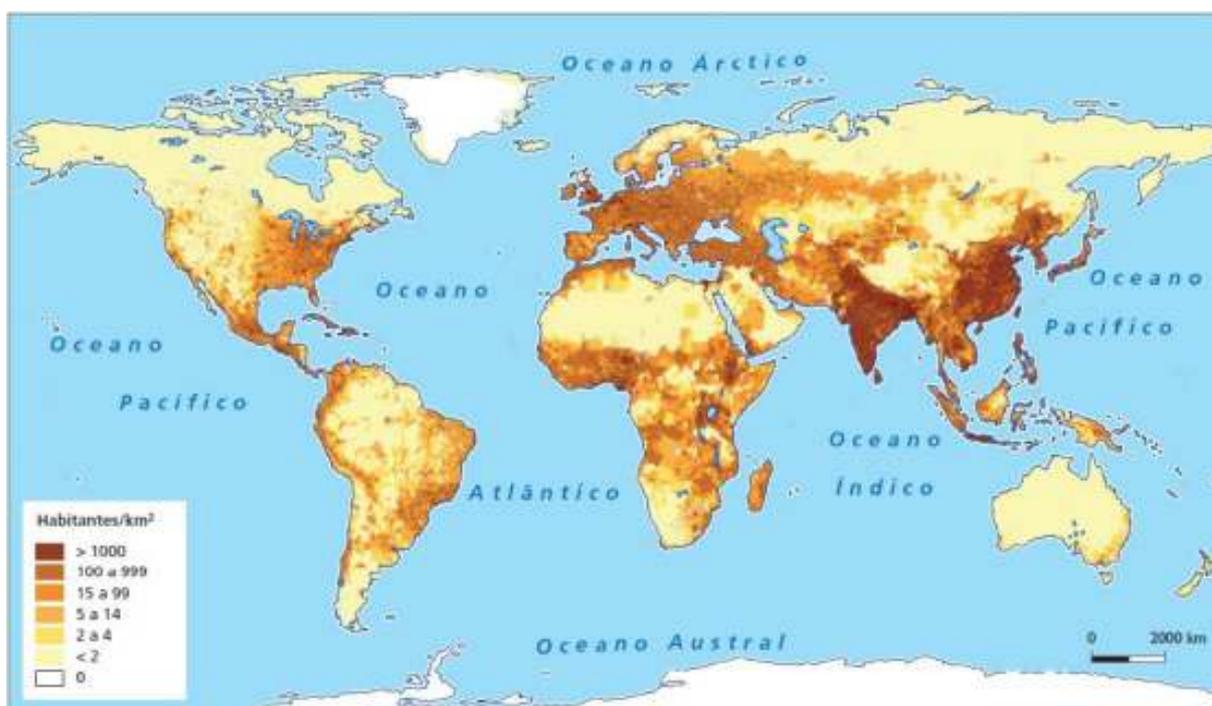


Figura A.0.7 – Mapa de densidade populacional no mundo, em habitantes/m² (COLUMBIA UNIVERSITY, 2013)



Figura A.0.8 – Mapa de produção de eletricidade no mundo, em Mtoe (IEA, 2017)

Nota: A produção do Brasil é 279,37 Mtoe.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 29 de novembro de 2017	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-162/2017	4. N° DE PÁGINAS 91
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise de sistema solar térmico e de sistema solar fotovoltaico estático e giratório em edificações.			
6. AUTOR(ES): Bruno Silva Mucciaccia			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Fotovoltaico. 2. Solar térmico. 3. Rastreamento solar			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Efeito fotovoltaico; Conversão de energia; Recursos renováveis; Coletores solares; Engenharia mecânica.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Ten. Cel. Marcio Antônio da Silva Pimentel. Publicado em 2017.			
11. RESUMO: No mundo atual, em que a preocupação com a sustentabilidade é crescente, a busca por alternativas limpas e renováveis no uso de energia torna-se imprescindível para o desenvolvimento da sociedade. Entre as alternativas limpas e renováveis, destaca-se a energia solar. O presente trabalho aborda as duas maiores tecnologias de conversão de energia solar: o sistema solar fotovoltaico e o térmico-solar. No trabalho em questão, será analisado o sistema solar fotovoltaico e o térmico-solar em termos de custos, mercado, eficiência, desafios e perspectivas futuras e serão discutidas metodologias de dimensionamento de painéis giratórios fotovoltaicos e de coletor térmico solar. Além disso, será checada a viabilidade do aproveitamento da energia solar no país e será analisado o ganho de eficiência de sistemas de rastreamento solar para sistemas fotovoltaicos.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			