

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Hélio Marques de Oliveira

**Panorama da Geração Elétrica Heliotérmica
Centralizada no Brasil**

Taubaté - SP
2019

HÉLIO MARQUES DE OLIVEIRA

**Panorama da Geração Elétrica Heliotérmica
Centralizada no Brasil**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre, pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Giorgio Eugenio
Oscare Giacaglia.

**Taubaté - SP
2019**

HÉLIO MARQUES DE OLIVEIRA

Panorama da Geração Elétrica Heliotérmica Centralizada no Brasil

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre, pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia.

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dra. Valesca Alves Correa

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas

Universidade de São Paulo

Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

Pais amados, se há algo que faz diferença na formação da personalidade e na vida de uma pessoa é o amor que ela recebe. Vocês me educaram com amor, se dedicaram ao meu desenvolvimento como ser humano. Vocês fizeram de mim a pessoa que hoje sou e eu só tenho motivos para agradecer. Vocês dedicaram anos à minha educação, sem medir esforços, e, portanto, com muita satisfação dedico esta dissertação e todo esforço realizado aos dois, mentores de minha vida.

Minha esposa e filhos, muito obrigado pela compreensão da falta que eu fiz em incontáveis dias de estudo. A realização de um mestrado, somente é possível com carinho e apoio da família, que, em meu caso, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Professor Giacaglia, foi um privilégio desfrutar da sua experiência e acredite que saí mais rico depois desta longa etapa. Desejo que o senhor continue ensinando ética, boa vontade, alegria e conhecimento a todos alunos por muito tempo!

Ao meu grande amigo de mestrado Adilson pelo apoio, coleguismo e ética.

A todos funcionários da UNITAU que tão bem me receberam. A meu amigo de adolescência pela amizade, Evandro Luís Nohara, a Raquel pela competência e afabilidade na secretaria, para todos os funcionários, da limpeza à reitoria, meu muito obrigado!

Às novas amizades feitas durante todo período de mestrado e à união de todos os alunos que me fizeram mais capaz em termos técnicos e em termos de vida.

A minha professora primária Meire, que me ensinou a ler e ter visão crítica do mundo.

Dedicatórias:

“Só sei que nada sei”
Sócrates – Filósofo Grego

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

Ayrton Senna da Silva – Esportista Brasileiro

RESUMO

O objetivo desta dissertação é pesquisar a utilização da geração de energia elétrica centralizada, por meio de energias heliotérmicas, verificando sua viabilidade técnica e econômica. Adicionalmente, analisar o cenário atual da geração elétrica no Brasil e suas dificuldades para entender como essas tecnologias podem ser aproveitadas na Matriz Elétrica Brasileira. A pesquisa realizada teve enfoque em estudo tecnológico básico e em estudos de casos de quatro tipos de gerações heliotérmicas mais comuns, descrevendo a operação em campo de usinas de referência existentes no mundo. A dissertação tem abordagem com cunho qualitativo, sendo um estudo empírico para aprofundamento do conhecimento. A geração heliotérmica tem possibilidade de geração noturna que não é possível na fotovoltaica, tem tempo de geração anual maior que a eólica, com maior eficiência dentre as gerações renováveis não hidráulicas, tem grande geração de energia em uma pequena área e baixa emissão de gases de efeito estufa. A dissertação demonstrou que a energia renovável de origem solar heliotérmica é tecnicamente aplicável à realidade brasileira, sendo uma alternativa viável e complementar às hidroelétricas, mitigando as crises hídricas. Entretanto, os custos de implementação em 2018 são ainda proibitivos devido à falta de escala mundial de produção de seus sistemas. Contudo, esses custos estão se reduzindo drasticamente e, no horizonte de três a cinco anos, a geração elétrica heliotérmica pode ser uma alternativa economicamente viável ao Brasil.

Palavras Chaves: Energia Renovável, Geração de Energia Elétrica, Energia heliotérmica, HLT, Energia Fresnel Linear, FL, Torre central, Campo solar, CSP, HLT, Energia solar, Usina solar, Calha parabólica, PT, Disco solar parabólico, PD, concentrador solar.

ABSTRACT

The objective of this dissertation is to investigate the use of centralized electric power generation through heliothermic energies, verifying its technical and economic viability. Additionally, research the current scenario of electric generation in Brazil and its difficulties to understand how these technologies can be used in our electrical matrix. The research carried out focused on basic technological study and case studies of four most common heliothermic generations, describing the field operation of reference plants in the world. The dissertation has a qualitative approach, being an empirical study to deepen the knowledge. The heliothermic generation has the possibility of night generation that is not possible in photovoltaics, it has an annual generation time greater than wind, with greater efficiency among the non-hydraulic renewable generations, with large power generation in a small area, generating low emission of greenhouse effect. The dissertation demonstrated that renewable energy from solar heliothermic origin is technically applicable to the Brazilian reality, being a viable and complementary alternative to hydroelectric plants, mitigating water crises. However, the implementation costs of 2018 are still prohibitive due to the lack of worldwide production scale of their systems. However, these costs are drastically decreasing, and within three to five years the heliothermic electric generation may be an economically viable alternative to Brazil.

Key Words: *Renewable Energy, Heliothermic Energy, Solar Tower, Power Tower, Solar Field, CSP, Solar Energy, , Fresnel Linear, FL, Parabolic Through, PT, Parabolic dish, parabolic plate, PD, Solar Energy, Solar Field , Solar Power Plant, Solar Power Station*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tecnologias de geração de energia elétrica renovável mundial	27
Tabela 2: Oferta interna de energia elétrica (OIEE) entre 2017 e 2016	30
Tabela 3: Capacidade instalada de geração elétrica – 2017, ano base 2016	31
Tabela 4: Empreendimentos para geração de energia elétrica no Brasil, em 2017	38
Tabela 5 Periodicidade na reposição natural das fontes renováveis.....	39
Tabela 6: Comparação de parques eólicos existentes no Rio Grande do Norte	40
Tabela 7: Comparação de parques eólicos existentes no Brasil	40
Tabela 8: Rendimento geração das energias renováveis intermitentes no Brasil.....	40
Tabela 9 Área ocupada para geração de energia elétrica no Brasil	41
Tabela 10: Histórico da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera.....	47
Tabela 11: Emissão de gases de efeito estufa em energia renováveis [kgCO _{2e} /MWh].....	53
Tabela 12: Emissão de gases de efeito estufa em energia não renovável [kgCO _{2e} /MWh]	53
Tabela 13: Comparativo de tecnologias heliotérmicas.....	72
Tabela 14: Tipos de tecnologias de baterias comerciais para armazenamento de eletricidade	75
Tabela 15: Sistemas de armazenagem de energia por supercapacitores no mundo	77
Tabela 16: Propriedades e custos para três sais fundidos comerciais diferentes e VP-1.....	78
Tabela 17: Propriedades dos sais fundidos experimentais propostos pela NREL.....	79
Tabela 18: Características técnicas para armazenagem de energia e suas limitações.....	80
Tabela 19: Desempenho básico da usina Gemasolar.....	81
Tabela 20: Potencial de geração por torre solar central com armazenamento de 7,5 horas.....	88
Tabela 21: Análise energética para a geração por torre central.....	89
Tabela 22: Análise exegética para a geração por torre central	89
Tabela 23: Implementação atual e potencial futuro para a torre central	90
Tabela 24: Custo de implementação atual e futura de armazenagem em usina de torre central	90
Tabela 25: Comparação de custos de implementação de usinas de torre central	91
Tabela 26: Custos de operação e de manutenção de usinas solares de torre central	91
Tabela 27: Preço internacional de venda de energia heliotérmica	92
Tabela 28: Desempenho básico da usina de Solana	93
Tabela 29: Rendimento anual médio de usinas solares por calha parabólica.....	103
Tabela 30: Custo de implementação atual e futuro para o campo de calha parabólica.....	103

Tabela 31: Custo de implementação atual e futuro de armazenagem em usina solar por calha parabólica.....	104
Tabela 32: Comparação de custos de implementação de usinas solares por calha parabólica	105
Tabela 33: Custos de operação e manutenção de usinas solares por calha parabólica.....	105
Tabela 34: Potencial de geração por calha solar parabólica no Brasil	105
Tabela 35: Desempenho básico da usina de Puerto Errado 2 (PE2)	106
Tabela 36: Potencial de geração por usina por refletor linear solar Fresnel.....	117
Tabela 37: Eficiências de uma usina linear de refletor solar Fresnel	117
Tabela 38: Custo de implementação de módulo coletor solar Fresnel	118
Tabela 39: Comparação de custos de implementação de uma usina linear de refletor solar Fresnel	118
Tabela 40: Preço internacional de venda de energia	118
Tabela 41: Desempenho do concentrador com disco solar parabólico EuroDish.....	119
Tabela 42: Comparação entre concentradores de disco solar parabólico.....	128
Tabela 43: Potencial de geração por disco parabólico e motor Stirling	129
Tabela 44: Eficiências do concentrador por disco solar parabólico	129
Tabela 45: Custos de implementação do disco solar parabólico	129
Tabela 46: Comparação de custos de implementação de usinas por disco solar parabólico..	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Histórico da potência máxima para cada tipo de geração.....	22
Figura 2: Histórico dos tipos de combustíveis	23
Figura 3: Geração de eletricidade mundial na OECD e fora dela	26
Figura 4: Evolução das energias renováveis no mundo de 2016, ano base 2015	27
Figura 5: Capacidade mundial de energia heliotérmica instalada e projetada	28
Figura 6: Geração mundial por energia heliotérmica por tecnologia	28
Figura 7: Localização e potência gerada por usinas heliotérmicas no mundo	29
Figura 8: Matriz Elétrica Brasileira	30
Figura 9: Carga de energia elétrica injetada no SIN em 2018 e em 2017 (MW médios)	32
Figura 10: Evolução da carga elétrica injetada no SIN brasileiro de 1999 a 2018.....	33
Figura 11: Consumo nacional de energia elétrica a rede por classe	34
Figura 12: A evolução do PIB brasileiro de 1995 a 2016 (R\$).....	34
Figura 13: Sistema brasileiro de transmissão - Horizonte 2017	35
Figura 14: Perda histórica no sistema de transmissão brasileiro	36
Figura-15: Localização dos projetos previstos no plano de expansão energética	37
Figura 16: Participação de energias renováveis na Matriz Elétrica Brasileira	38
Figura 17: Evolução da capacidade de geração elétrica instalada e consumo.....	42
Figura 18: Evolução do nível dos reservatórios do SIN (%).....	43
Figura 19: Variação da energia armazenada nos reservatórios de água no Brasil	43
Figura 20: Evolução da carga elétrica injetada no SIN brasileiro de 2017 e 2018.....	44
Figura 21: Evolução percentual das fontes primárias na geração de energia elétrica	45
Figura 22: Evolução da geração de eletricidade por fonte não hídrica	45
Figura 23: Evolução da concentração de CO ₂ na atmosfera	46
Figura 24: Variação do aumento da temperatura terrestre GISS de 1880 a 2017	48
Figura 25: Mapa da variação da temperatura média (°C) no Brasil de 2011 a 2100	49
Figura 26: Evolução da emissão dos gases de efeito estufa por tipo de fonte.....	50
Figura 27: Evolução da geração de eletricidade - termoeletricas a combustível fóssil	50
Figura 28: Evolução das emissões de GEE associadas à geração de eletricidade.....	51
Figura 31: Mapa da irradiação solar no Brasil	54
Figura 32: Síntese dos níveis de irradiação solar por região	55
Figura 33: Disponibilidade solar média em horas para o Brasil.....	56
Figura 34: Áreas aptas para implementação de usinas heliotérmicas	57
Figura 33: Maturidade das tecnologias heliotérmicas concentradas	58

Figura 36: Áreas aptas para implementação de usinas fotovoltaicas no Brasil.....	59
Figura 37: Esquema de usina solar de torre central.....	61
Figura 38: <i>Ivanpah Solar Electric Generating System</i>	62
Figura 39: Estudo usina piloto da USP Pirassununga	63
Figura 40: Estudo usina piloto da SOLINOVA no Rio Grande do Norte.....	64
Figura 41: Estudo da usina piloto Torre Solar 1 da CHESF	64
Figura 42: Esquema de usina solar por calha parabólica.....	66
Figura 43: Usina heliotérmica de referência Solana, no Arizona.....	67
Figura 44: Calha solar parabólica da UNIFEI.....	67
Figura 45: Comparação entre lente de Fresnel e bloco de geração de energia Fresnel.....	68
Figura 46: Esquema de uma usina solar com refletor Fresnel linear.....	69
Figura 47: Usina de referência <i>Kogan Creek Solar Boost</i> , na Austrália	69
Figura 48: Esquema de usina disco solar parabólico.....	70
Figura 49: Usina por disco parabólico com motor Stirling de Maricopa	71
Figura 50: Geração mensal de usinas heliotérmicas nos Estados Unidos	73
Figura 51: Geração mensal de usinas heliotérmicas na Espanha	73
Figura 52: Sistema de armazenamento de eletricidade por baterias.....	76
Figura 53: Esquema de sistema de armazenamento de eletricidade por capacitores	77
Figura 55: Tanques de armazenamento de calor por sal fundido da usina Geosolar	79
Figura 56: Vista aérea da usina Gemasolar	81
Figura 57: Parte do ciclo da geração por 12 dias e noites ininterruptos da usina Gemasolar ..	82
Figura 58: Esquema de geração da usina Gemasolar	83
Figura 58: Blocos de potência e de geração da usina Gemasolar	83
Figura 60: imagem termográfica na partida do receptor da Gemasolar Fonte TORRESOL, 2011 – Adaptado pelo Autor	84
Figura 61: Dificuldades de foco no receptor devido ao sistema de rastreamento da Gemasolar	84
Figura 62: Croquis do sistema de rastreamento solar para os heliostatos	85
Figura 63: Sistema rastreador solar para correção da mira de heliostatos	85
Figura 64: Perda por efeito cosseno em torres solares	86
Figura 63: Perdas por sombreamento e por bloqueio	86
Figura 66: Intermitência e variação dos ventos em Tracy, CA	87
Figura 67: Estrutura, atuadores e componentes do heliostato	88
Figura 68: Divisão porcentual do custo de implementação de usina solar de torre central	91
Figura 69: Usina de Solana.....	93

Figura 70: Ciclos de geração da usina por calha parabólica de Solana.....	94
Figura 71: Esquema de funcionamento da usina de Solana	94
Figura 72: Blocos de potência e de geração da usina de Solana	95
Figura 73: Módulo de geração da usina por calha parabólica de Solana	95
Figura 74: Esquema do funcionamento dos campos de calhas parabólicas da usina Solana ...	96
Figura 75: Esquema do módulo da calha solar parabólica	96
Figura 76: Fabricação do coletor de vidro parabólico e do coletor parabólico com receptor ..	97
Figura 77: Esquema e foto do receptor da calha parabólica.....	97
Figura 78: Esquema de ângulo de incidência para calhas parabólicas	98
Figura 79: Sombreamento e esquema de coletor em calha parabólica.....	99
Figura 80: Perdas por sombreamento e por ângulo de incidência em coletor de calha parabólica.....	100
Figura 81: Fluxo de perdas do coletor de calha parabólica	100
Figura 82: Perdas por velocidade do vento externa ao tubo de envelopamento do receptor .	101
Figura 83: Eficiência em função da variação da temperatura e da irradiação e <i>EuroTrough</i>	150
.....	102
Figura 84: Problema operacional da quebra do vidro de envelopamento do receptor	102
Figura 85: Divisão percentual do custo de implementação de usina solar por calha parabólica	104
Figura 86: Usina por refletor solar Fresnel de Puerto Errado 2 (PE2)	106
Figura 87: Ciclo de geração típico da usina de Porto Errado 2	107
Figura 88: Comparação entre concentradores linear Fresnel e parabólico.....	108
Figura 89: Esquema do bloco de geração da usina de Puerto Errado 2 (PE2)	109
Figura 90: Vista do bloco de geração da usina de Puerto Errado 2 (PE2)	109
Figura 91: Bloco de geração da usina de Puerto Errado 2 (PE2)	110
Figura 92: Esquema de funcionamento do bloco de geração	110
Figura 93: Coletor secundário e tubo receptor	111
Figura 94: Tubo receptor	111
Figura 95: Distribuição de radiação solar no tubo receptor.....	112
Figura 96: Comparação entre concentradores linear Fresnel e parabólico.....	112
Figura 97: Esquema de perdas ópticas no coletor solar Fresnel.....	113
Figura 98: Esquema de perdas ópticas no coletor solar Fresnel em campo	114
Figura 99: Comparativo da eficiência dos coletores EuroTrough (PT) e Novatec (LF)	114
Figura 100: Distribuição de temperaturas no coletor secundário (K)	115
Figura 101: Desempenho de um coletor linear solar Fresnel secundário.....	115

Figura 102: Limpeza dos espelhos da usina de Porto Errado 2.....	116
Figura 103: Água de reposição da usina Porto Errado 2, em m ³ por mês.....	116
Figura 104: Concentrador solar parabólico da EuroDish.....	119
Figura 105: Geração de energia elétrica típica do concentrador Eurodish.....	120
Figura 106: Montagem do concentrador EuroDish.....	120
Figura 107: Principais componentes do sistema do concentrador EuroDish.....	121
Figura 108: Servomotores.....	121
Figura 109: Receptor e isolamento térmico cerâmico.....	122
Figura 110: Distribuição de fluxo de calor na cavidade e no receptor cerâmico.....	122
Figura 111: Ciclos de expansão e de compressão do motor Stirling.....	123
Figura 112: Estema e foto do motor Stirling com tubo receptor.....	124
Figura 113: Perdas do sistema de geração solar EuroDish.....	124
Figura 114: Concentradores SBP – Almería, Espanha.....	125
Figura 113: Usina de concentrador WGA (Mod. 1) – Laboratório Sandia.....	126
Figura 114: Usina de concentrador SES - Maricopa.....	126
Figura 117: Concentrador de 38 kW DS-CSP - China.....	127
Figura 118: Usina de concentrador HelioBooster –Mongólia.....	127

GLOSSÁRIO

ABRADEE	Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica
NEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BIG	Banco de Informações Sobre Geração
BP	<i>Beyond Petroleum</i>
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
CC	Eletricidade de Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HTF	<i>Heat Transfer Fluid</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional Do Sistema
OCDE	Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Económico
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Plano Nacional de Energia
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
PROINFRA	Programa de Incentivo Às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UFSJ	Universidade de São João Del Rey
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	Contextualização.....	18
1.2.	Objeto de Pesquisa.....	18
1.3.	Objetivo Geral	19
1.4.	Objetivos Específicos	19
1.5.	Justificativa	19
1.6.	Problema de Pesquisa	20
1.7.	Hipóteses.....	20
1.8.	Materiais e Métodos	20
1.8.1.	Metodologia	20
1.8.2.	Materiais	21
1.8.3.	Métodos	21
1.9.	Estrutura do Trabalho	21
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1.	História e Transições da Geração de Energia na Humanidade.....	22
2.2.	Quarta Transição de Energética Global e Energias Renováveis	24
2.3.	Geração de Energia Elétrica no Mundo	25
2.4.	Energia Renovável no Mundo	26
2.4.1.	Energias solares heliotérmicas no mundo.....	28
2.5.	Geração de Energia Elétrica no Brasil.....	29
2.5.1.	Matriz elétrica brasileira	29
2.5.2.	Evolução da demanda de energia elétrica no Brasil	33
2.5.3.	Distribuição de energia elétrica pelo brasil.....	35
2.5.4.	Plano decenal em 2026 – previsão da distribuição de energia elétrica.....	37
2.5.5.	Geração de energia elétrica renovável no brasil	37
2.5.6.	Intermitência e sazonalidade das fontes de energia renováveis.....	39
2.5.7.	Custos de geração das energias renováveis intermitentes no brasil.....	40
2.5.8.	Rendimento e tempo de geração das energias renováveis intermitentes no brasil	40
2.5.9.	Área ocupada para geração de energia elétrica no brasil.....	41
2.6.	A Crise Hídrica Brasileira, PROINFRA e a Geração de Energia Elétrica Renovável .	41
2.7.	Aquecimento Global e Geração de Energia Elétrica no Brasil.....	46
2.7.1.	Emissão de gases de efeito estufa para várias tecnologias de geração elétrica	53
2.7.2.	Venda créditos de carbono.....	53
2.8.	Recurso de Energia Solar no Brasil	53

2.8.1. Mapa da irradiação solar no Brasil	53
2.8.2. Mapa da disponibilidade solar no Brasil	55
2.9. Mapa do Recurso Solar Heliotérmico no Mundo	56
2.10. Maturidade de Geração por Tecnologias Heliotérmicas.....	57
2.11. Mapa e Requisitos para Localização Ótima de Usinas Solares no Brasil	58
2.12. Geração Solar Heliotérmica.....	60
2.12.1. Geração solar por torre central	61
2.12.2. A Geração solar por calha parabólica.....	65
2.12.3. A Geração por refletores solar linear fresnel.....	68
2.12.4. A Geração por disco solar parabólico.....	70
2.12.5. Comparação entre tipos de usinas heliotérmicas	71
2.13. Geração de Usinas Heliotérmicas nos Estados Unidos e Espanha	73
2.14. Tipos de Armazenamento para Energias Renováveis.....	74
2.14.1. Banco de baterias	74
2.14.2. Banco de capacitores	76
2.14.3. Sistema de armazenamento de calor e sal fundido	78
2.14.4. Características técnicas para armazenagem de energia e suas limitações.....	79
3. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR TORRE SOLAR CENTRAL.....	81
3.1. Características de Operação.....	81
3.2. Potencial de Geração	88
3.3. Eficiência de Geração por Torre Central	89
3.4. Custos	90
3.5. Preço de Venda de Eletricidade Solar Heliotérmica.....	92
4. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR CALHA PARABÓLICA.....	93
4.1. Características de Operação.....	93
4.2. Eficiência de Geração	102
4.3. Custos	103
4.4. Potencial de Geração	105
4.5. Preço de Venda de Eletricidade.....	105
5. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR REFLETOR LINEAR SOLAR FRESNEL....	106
5.1. Características de Operação.....	106
5.2. Potencial de Geração	117
5.3. Eficiência de Geração	117
5.4. Custos de Implementação	117
5.5. Preço de Venda da Energia Elétrica	118

6.	GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR DISCO PARABÓLICO E MOTOR STIRLING	119
6.1.	Concentrador Disco Solar Parabólico EuroDish	119
6.1.1.	Geração De Energia Elétrica	120
6.1.2.	Descrição dos sistemas	120
6.1.3.	Usinas e Concentradores Disco Solar Parabólicos de Referência	125
6.2.	Potencial de Geração	129
6.3.	Eficiência de Geração	129
6.4.	Custos de Implementação	129
6.5.	Preço de Venda da Energia.....	130
7.	IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS NA GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	131
7.1.	Impactos Ambientais	131
7.2.	Impactos Sociais	132
8.	ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS HELIOTÉRMICAS.....	134
8.1.	Comparação de Custos de Implementação no Brasil	135
8.2.	Valor de venda da Energia Gerada	135
8.3.	Geração Heliotérmica mais promissora para o Brasil	135
9.	CONCLUSÕES	137
9.1.	Recomendação de Futuros Estudos	137

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

No Brasil, as hidroelétricas sempre foram o carro chefe na geração de energia elétrica centralizada e, portanto, de alta capacidade. Porém, grandes investimentos são necessários e problemas ambientais surgem devido às enormes áreas alagadas. As usinas hidroelétricas primam pelo gigantismo e necessitam de alto volume de água disponível. A cada ano, estes volumes hídricos variam e, quando baixos, podem provocar crises de fornecimento de energia devido a mudanças climáticas. Nessa situação, as termoelétricas a combustível fóssil são acionadas, gerando gases de efeito estufa e o aumento tarifário aos consumidores.

Atualmente, 64 % da capacidade instalada no Brasil é gerada pelas usinas hidroelétricas, fonte geradora que tende a ser totalmente aproveitada. Também, o crescimento da economia brasileira, demanda um aumento no consumo de energia elétrica, com o passar dos anos, devido ao aumento do PIB em seus vários setores produtivos.

Estudos da demanda de energia elétrica para um horizonte de cinco anos, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostram que, no período de 2015 a 2020, o consumo anual de energia elétrica vai crescer por volta de 4 %, o que pode acentuar o problema da falta de energia elétrica.

Como solução desses cenários, existe a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira além das energias renováveis já existentes, com novas tecnologias de geração limpa de baixo custo e com rápida aplicação.

Um provável caminho é a utilização da geração de energia elétrica por fonte solar heliotérmica, aplicando-se as melhores tecnologias disponíveis atualmente para aumento da potência instalada, assim como já realizado nas gerações inovadoras eólica, fotovoltaica e em bioeletricidade no passado.

Esta pesquisa pretende estudar como é a geração de energia elétrica por usinas heliotérmicas e sua viabilidade no Brasil, para, assim como as termoelétricas a combustível fóssil, sejam utilizadas de forma complementar às usinas hidroelétricas na Matriz Elétrica Brasileira.

1.2. Objeto de Pesquisa

Este trabalho propõe pesquisar tipos de tecnologias para geração de energia elétrica por fonte heliotérmica para melhor equilíbrio com a geração de origem fóssil na Matriz Elétrica Brasileira. Esta pesquisa pretende levantar a possibilidade de complementação dessa tecnologia

à geração hidroelétrica de forma econômica. Também propõe se verificar como são os custos de implementação de usinas heliotérmicas no Brasil, para compará-las com as demais gerações renováveis existentes.

1.3. Objetivo Geral

Esta dissertação pretende pesquisar as tecnologias heliotérmicas aplicáveis ao Brasil, para geração de energia elétrica limpa e renovável e diversificação da matriz energética brasileira.

1.4. Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos são desejáveis:

- Verificar as matrizes energéticas mundial e brasileira e a capacidade de geração de cada tecnologia atual;
- Identificar quais são as energias renováveis operando no mundo e no Brasil e pesquisar qual o custo de instalação de cada tecnologia identificada;
- Conhecer quais as tecnologias de geração de energia elétrica heliotérmica estão disponíveis no mundo e no Brasil, suas capacidades e eficiências;
- Descobrir quais os custos de implementação de usinas heliotérmicas de referência;
- Descrever as tecnologias heliotérmicas disponíveis;
- Determinar quais as tecnologias heliotérmicas que tenham viabilidade técnica e comercial, mais aplicáveis ao Brasil atual.

1.5. Justificativa

Com a utilização da geração de energia elétrica por fonte heliotérmica, haverá a possibilidade da utilização de áreas improdutivas e de baixo custo, com melhoria de aspecto social nas localidades onde a geração será realizada.

A geração heliotérmica tem as maiores eficiências entre as energias renováveis não hidráulicas, com pouca emissão de gases de efeito estufa.

Como a geração heliotérmica é pouco conhecida no Brasil, existe a necessidade de pesquisar suas tecnologias, principalmente o projeto básico e a operação de usinas cuja construção é baseada nesse conceito. Somente assim é possível verificar a viabilidade técnica desse tipo de geração e sua aplicação ao Brasil.

A geração heliotérmica tem vários níveis de maturidade, conforme o tipo de tecnologia utilizada, porém é inédita no Brasil, com pouca pesquisa e desenvolvimento. Existe, portanto,

uma necessidade de adquirir conhecimento sobre essa tecnologia, para comparação com as energias renováveis existentes e determinar a viabilidade de sua aplicação.

1.6. Problema de Pesquisa

Como o consumo de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica é finito, assim como o recurso hídrico, porque não utilizar a geração elétrica heliotérmica renovável no Brasil, já que parece ser uma geração eficiente, além do que não emite gases de efeito estufa?

1.7. Hipóteses

A geração de energia solar heliotérmica tem grande possibilidade de ser implementada no Brasil, assim como as demais renováveis o foram. Da mesma forma que as usinas termoelétricas, as heliotérmicas têm perspectiva de serem utilizadas na geração complementar às hidroelétricas brasileiras com grande eficiência e a custos de geração adequados.

Elas podem desafogar a matriz de geração de energia elétrica, predominantemente hidráulica, e, além de ter um desempenho aceitável, com pouca emissão de gases de efeito estufa.

1.8. Materiais e Métodos

1.8.1. Metodologia

Esta pesquisa é basicamente bibliográfica para obtenção do conhecimento do tema proposto. Se delimita a verificar tecnologias heliotérmicas existentes no mundo, não sendo pesquisadas outras tecnologias solares.

Este trabalho também está se limitando ao levantamento de informação atualizada dos últimos cinco anos, que possam contribuir com o conhecimento das melhores tecnologias disponíveis no Brasil e no mundo. Pesquisas acima de cinco anos podem ser utilizadas somente quando necessário de forma complementar aos demais levantamentos.

A coleta de dados foi realizada selecionando bibliografia analítica correlata à tecnologia heliotérmica para o necessário aprofundamento do conhecimento sobre o tema.

Tem natureza aplicada para gerar conhecimento para a utilização de sistemas heliotérmicos de forma mais adequada ao cenário brasileiro e de objetivo exploratório, pois envolve pesquisa bibliográfica sobre a geração de energia elétrica no Brasil e a operação de usinas heliotérmicas no mundo e seus problemas.

A abordagem é de cunho qualitativo, sendo um estudo empírico com aplicação de vários estudos de caso sobre a operação de usinas heliotérmicas para detalhamento e aprofundamento do conhecimento. O objeto da pesquisa é somente bibliográfico sendo sua natureza atual.

1.8.2. Materiais

Foram utilizados basicamente livros, atlas, resumos de congressos, documentos oficiais, publicações em periódicos científicos, jornais, revistas, boletins, monografias, dissertações, teses, material cartográfico, consultas a sítios da internet, etc. A velocidade dos ventos em instalações geradoras de energia foi mensurada com anemômetros.

1.8.3. Métodos

Também foram utilizados métodos baseados em levantamentos bibliográfico sobre *Computing Fluid Dynamics* (CFD) para determinação de fluxos de irradiação e de análise de distribuição de temperaturas.

1.9. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em três elementos básicos:

- Pré-textuais: composto por capa, folha de rosto, listas de tabelas e de figuras, sumário e dedicatórias;
- Textuais: onde estão sendo publicados dois grandes blocos de informação:
 - a) No Capítulo 2 foi estressada a fundamentação teórica via o estudo da geração elétrica no Brasil e no mundo e a descrição básica das tecnologias de geração heliotérmica;
 - b) Nos Capítulos 3 a 9 são apresentadas as principais características da operação em campo das usinas heliotérmicas para cada tecnologia, a partir de estudos de casos;
 - c) Nos Capítulos 10 e 11, os resultados e as conclusões.
- Pós-textuais: neste documento somente será apresentada a lista de referências, não existindo apêndices e anexos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

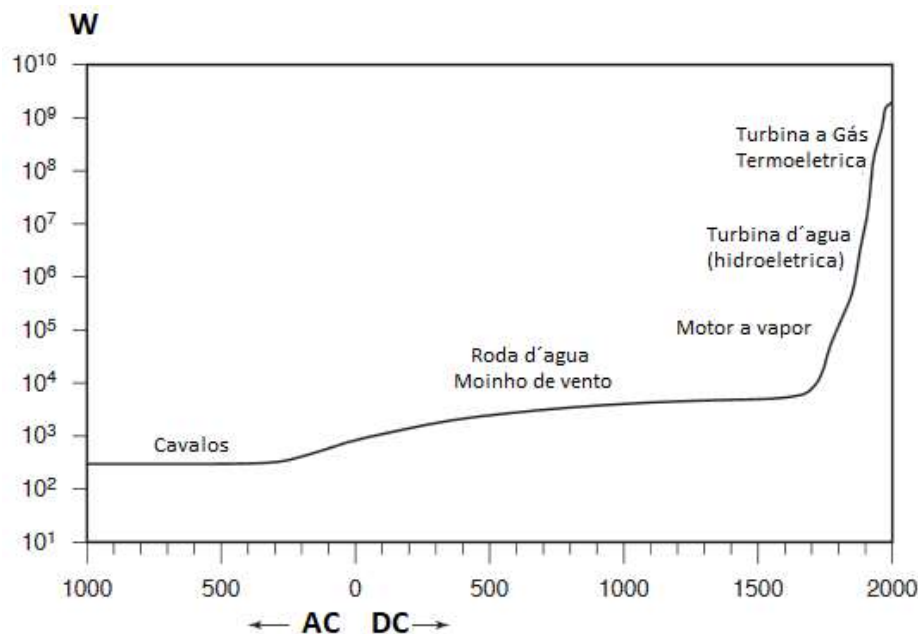
2.1. História e Transições da Geração de Energia na Humanidade

A energia é o principal meio para satisfazer as necessidades básicas de alimentação, de iluminação e de aquecimento para os seres humanos. Para tanto, logo nos primórdios da civilização, o desenvolvimento da utilização do fogo foi realizado com o intuito de sobrevivência e de proteção de nossa espécie (FARIAS, 2011). Com a diversificação das atividades humanas e a procura por melhores níveis de conforto, demandou-se por novas formas de geração e de utilização de energia. Devido a essas necessidades, com o passar dos séculos, a humanidade, de forma simplificada, já passou por três grandes transições na geração e no consumo de energia (SMIL, 2004).

- Domesticação de animais e aproveitamento do fogo;
- Utilização de roda d'água e de moinhos de vento;
- Substituição do esforço muscular humano e animal por motores com utilização de energia produzida por combustíveis fósseis ou biomassa.

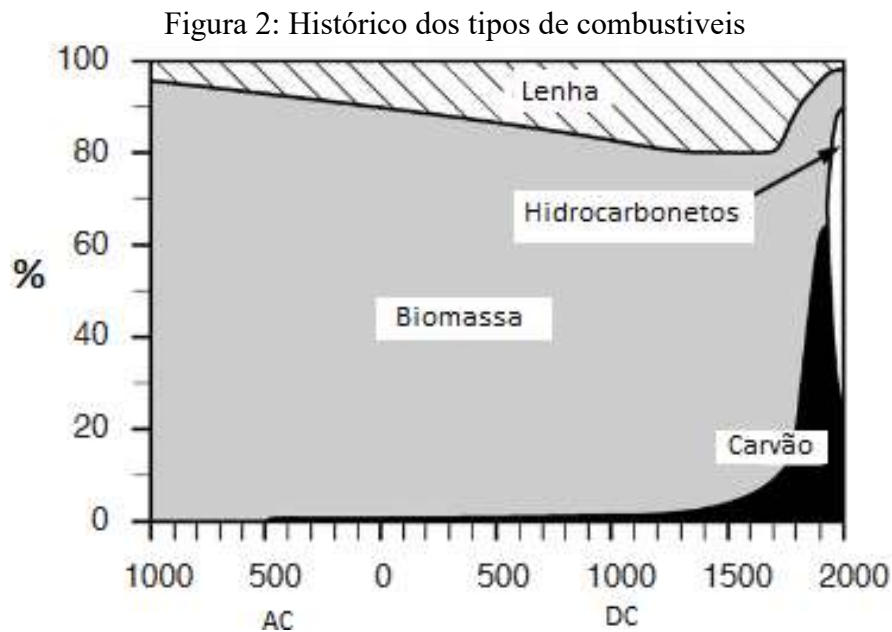
A Figura 1 apresenta essas fases de transição, onde os tipos de geração de energia e suas potências são listadas historicamente.

Figura 1: Histórico da potência máxima para cada tipo de geração



Fonte: (SMIL, 2004)

A Figura 2 apresenta as proporções aproximadas do consumo global de combustível, por tipo de recurso, no período de 1.000 AC a 2.000 DC.



A primeira era da energia começou há mais de trezentos mil anos na evolução da espécie *Homo erectus* para *Homo sapiens*, continuando ao longo da pré-história até cerca de dez mil anos. Nessa época, todos os esforços para melhoria da eficiência na geração de energia foram em vão devido à limitada potência do corpo humano e pelo uso ineficiente do fogo (SMIL, 2004). Devido a esse cenário, as sociedades pré-industriais domesticaram animais, se aproveitaram do fogo para a produção de metais e outros materiais duráveis, realizando a primeira grande transição energética global, a partir do aumento da eficiência e da potência gerada (BITHAS, 2016).

A segunda transição, começou apenas alguns milênios depois da primeira. As sociedades tradicionais substituíram os grandes esforços musculares de animais e de humanos, por rodas d'água e moinhos de vento, impulsionadores engenhosos, simples e inanimados, que foram projetados para converter essas duas fontes de geração de potência mecânica em energia utilizável pela humanidade. Apesar dessa fase ser menos globalizada, observa-se o aumento da potência gerada e da sua eficiência.

A terceira grande transição energética foi a substituição do esforço muscular humano e animal por motores e de energia de biomassa por combustíveis fósseis (WEF, 2013). Essa fase começou há apenas alguns séculos em alguns países europeus, a chamada revolução industrial

(HARTWELL, 2017), onde os motores a vapor começaram a ser aplicados na indústria com a utilização massiva de carvão, a partir de 1698, com *Thomas Newcomen*, em *Staffordshire*, na Inglaterra, que instalara um dos primeiros motores a vapor para esgotar água em uma mina de carvão (FLORANCE, 2016).

Essa transição de energia também aconteceu na geração de energia elétrica, a partir de 1882, quando a primeira linha de eletricidade do mundo e suas plantas geradoras foram encomendadas em Londres e em Nova Iorque (ambas as estações a carvão, da *Edison Industries*), enquanto em *Appleton, Wisconsin*; a primeira planta hidrelétrica era constituída (PERKINS J, 2017). Desde então, boa parte das economias globais têm indiretamente consumido partes crescentes de combustíveis fósseis, seja como eletricidade ou simplesmente calor. Também é possível notar o aumento constante no consumo de carvão e de hidrocarbonetos, primeiro como petróleo bruto e depois como gás natural (BP, 2017).

A terceira transição energética está longe de ser totalmente realizada pela humanidade, que sempre está a procura de fontes alternativas e eficientes de geração de energia, porém nunca mais deixou de utilizar combustíveis fósseis para geração da mesma (SMIL, 2014).

2.2. Quarta Transição de Energética Global e Energias Renováveis

O mundo já passou por três grandes transições na geração de energia global, conforme apresentado no subitem 2.1, devido aos avanços humanos e tecnológicos (SMIL, 2014). Na atualidade, o mundo está passando novamente uma grande transição impulsionada pela combinação de fatores, como aparecimento acelerado de novas tecnologias de geração renovável, a importante revolução digital consolidada e desafios ambientais globais e de crescimento demográfico (PERKINS, 2016).

“Ao longo dos próximos anos, esse processo de transformação tem o potencial de mudar a forma como produzimos e consumimos energia. Isso impactará modelos operacionais e a base econômica de estados nacionais e empresas, levando a um reequilíbrio entre setores e regiões com repercussões mais amplas sobre a economia global”. (MEDEIROS, 2017).

A realidade é que a demanda per capita de energia global, poderá atingir seu ponto máximo antes de 2030. A substituição de energia primária está aumentando a um ritmo mais rápido do

que o aumento da demanda do consumo de energia pela classe média global, também em crescimento.

Portanto, estão ocorrendo grandes implicações nas empresas de energia em termos de aumento da geração e em sua capacidade de atingir suas expectativas de mercado, assim, terão de ser levadas em conta, nesse cenário, as estratégias de investimento médio e de longos prazos (MEDEIROS, 2017).

Notadamente se está ultrapassando o ponto de inflexão de uma revolução tecnológica no setor de energia (PERKINS, 2016). A geração de energia elétrica a partir de fonte solar fotovoltaica e de eólica continuarão a apresentar rápido crescimento, sendo uma tendência inquestionável (IRENA, 2018). Enquanto isso, ainda se depende em mais da metade da eletricidade global gerada sendo fornecida a partir de combustíveis fósseis e poluentes, como petróleo, carvão e gás natural (2017 Energy Outlook).

Porém, conforme a *Beyond Petroleum* (BP), as reservas de combustíveis fósseis tendem a diminuir e os custos de geração tendem a aumentar (BP, 2017). Logo, existe uma correlação entre o desenvolvimento econômico atual e o setor de energia, não somente com o setor de energia elétrica.

A definição de sustentabilidade energética se baseia em três objetivos principais, podendo ser verificada no cenário global da atualidade (MEDEIROS, 2017):

- Segurança energética;
- Equidade energética;
- Sustentabilidade ambiental.

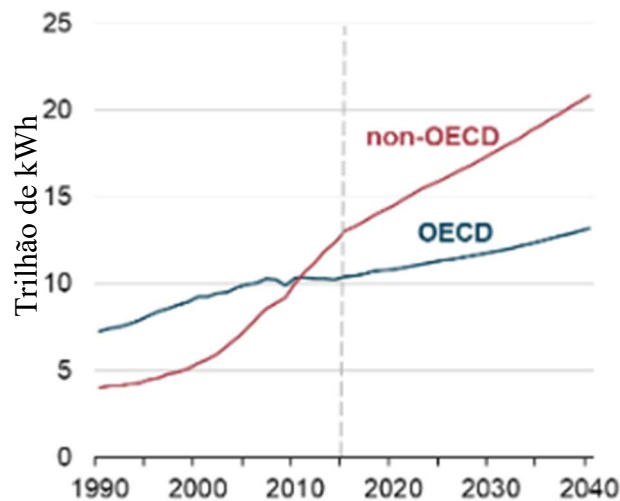
Esses objetivos da sustentabilidade na geração de energia envolvem relações complexas entre os *players* dos setores públicos, privados, agências reguladoras, fatores econômicos e sociais, recursos nacionais e preocupações ambientais. Daí nasce o conceito da quarta transição energética global (MEDEIROS, 2017).

2.3. Geração de Energia Elétrica no Mundo

Conforme análise do governo norte-americano, existe uma forte demanda de energia elétrica global, que se reflete na geração de energia elétrica mundial (EIA, 2017). A Figura 3 apresenta esse cenário global por países pertencentes, ou não, à Organização para a Cooperação

e Desenvolvimento Econômico (OCDE), do inglês *Organisation for Economic Co-Operation and Development* (OECD).

Figura 3: Geração de eletricidade mundial na OECD e fora dela



Fonte: (EIA, 2017)

A OCDE, de abrangência internacional, composta por 34 países e com sede em Paris, França (NUMES, 2017). A OCDE tem por objetivo promover políticas que visem o desenvolvimento econômico e o bem-estar social de pessoas por todo o mundo. São países membros da OCDE (IEA, 2015): Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, República Tcheca, Dinamarca, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Coreia, Luxemburgo, México, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos (EIA, 2017).

O Figura 3 apresenta a geração líquida de eletricidade em países não pertencentes à OCDE, onde se observa um aumento médio de 1,9 % ao ano, no período de 2015 até 2040, em comparação com 1 % ao ano, no mesmo período, nos países da OCDE (EIA, 2017).

2.4. Energia Renovável no Mundo

Energias renováveis podem ser definidas como "energias de reuso", que podem se renovar tão rapidamente, ou mais, do que a velocidade de consumo das fontes geradoras (SARI, 2016). As energias renováveis também podem ser descritas como as energias que são coletadas de recursos renováveis, que são naturalmente reabastecidas em uma escala de tempo humana, sendo classificadas em: luz solar, vento, chuva, ondas e calor geotérmico (ELLABBAN, 2014).

A energia renovável tipicamente é aplicada em quatro importantes áreas: geração de eletricidade, aquecimento e refrigeração de ar e água, transporte e serviços (REN21, 2017). Como a matriz energética mundial atual é fortemente baseada em combustíveis fósseis, que são finitos, e a demanda de consumo tende a continuar em crescimento, as reservas tendem a se exaurir com espaço de tempo relativamente curto.

Logo, a participação desse tipo de recurso na matriz energética mundial tende a diminuir fortemente (EIA, 2017). De acordo com especialistas, é estimado que 36 % da energia elétrica mundial necessita de ser atendida por fontes renováveis até 2030 (IRENA, 2018). Tais fontes renováveis estão listadas na Tabela 1.

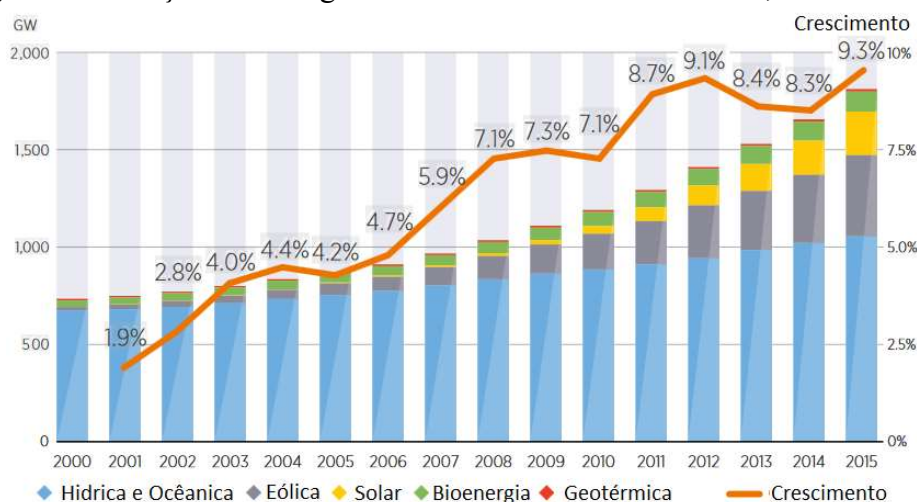
Tabela 1: Tecnologias de geração de energia elétrica renovável mundial

1. Hidroelétrica	2. Eólica	3. Solar Fotovoltaica	4. Solar Concentrada	5. Bioenergia	6. Geotérmica	7. Oceânica
------------------	-----------	-----------------------	----------------------	---------------	---------------	-------------

Fonte: (WEC, 2016)

São quatro as tecnologias de geração por energia solar concentrada (heliotérmica): torre central, calha parabólica, refletor Fresnel linear e disco parabólico. Todas tecnologias com características termoelétricas. Quanto à energia oceânica, são cinco os tipos de tecnologia: por correntes marítimas, geração por osmose, geração oceânica térmica, energia das marés e energia das ondas (WEC, 2016). A Figura 5 apresenta os indicadores globais de crescimento de potência por tipo de fonte renovável (IRENA, 2018) para as tecnologias listadas Tabela 1.

Figura 4: Evolução das energias renováveis no mundo de 2016, ano base 2015



Fonte: (IRENA, 2018)

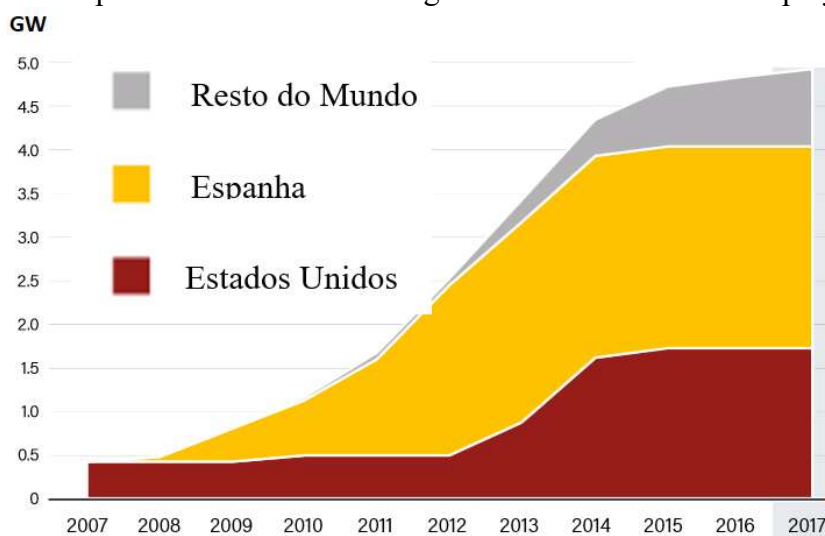
A capacidade de geração de energia elétrica renovável teve seu maior crescimento anual em 2016, com um total estimado de 161 GW de capacidade adicionada, sendo que a capacidade global total aumentou em 9,3 % (IRENA, 2018) em comparação com 2015, para quase 2,017

GW ao final do ano de 2016. Nesse período, o mundo continuou a adicionar mais capacidade de energia renovável anualmente do que a capacidade de todos os combustíveis fósseis combinados (REN21, 2017).

2.4.1. Energias solares heliotérmicas no mundo

Os principais países que desenvolvem tecnologia solar heliotérmica, são a Espanha, os EUA, a China, a África do Sul e a Índia (IRENA, 2018). A evolução da capacidade de geração heliotérmica mundial e a expectativa futura pode ser observada na Figura 5.

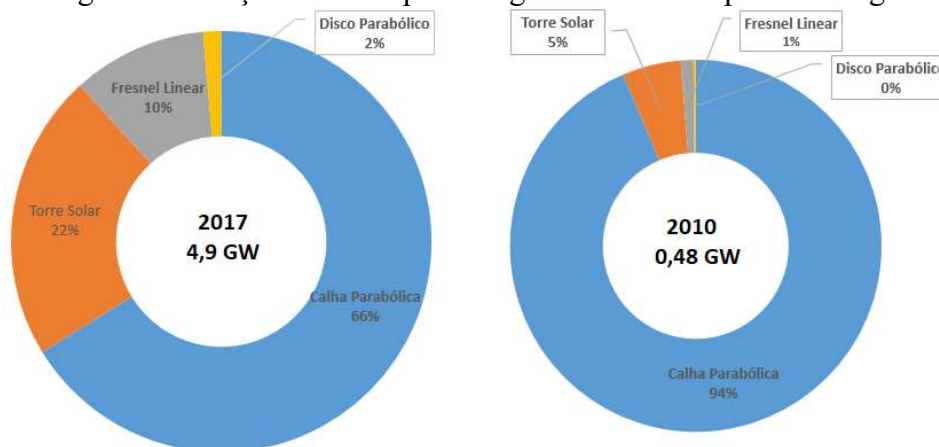
Figura 5: Capacidade mundial de energia heliotérmica instalada e projetada



Fonte: (REN21, 2018)

A potência elétrica gerada no mundo por usinas heliotérmicas foi de 0,82 GW, em 2010 (DLR, 2015) e 4,9 GW, em 2018, ano base 2017 (REN21, 2018).

Figura 6: Geração mundial por energia heliotérmica por tecnologia



Fonte: (NREL, 2017) e (REN21, 2018)

A divisão de tecnologias operando e sua potência instalada estão apresentadas na Figura 12, de forma compilada pelo autor, com dados de 2017. A Figura 7 apresenta a localização e a potência de usinas heliotérmicas no mundo, seja em operação, em construção ou em desenvolvimento para geração futura (SOLARPACES, 2018). Pode-se observar certo número de novos empreendimentos, com destaque na América do Sul, para o vizinho Chile.

Figura 7: Localização e potência gerada por usinas heliotérmicas no mundo



Fonte: (SOLARPACES, 2018)

2.5. Geração de Energia Elétrica no Brasil

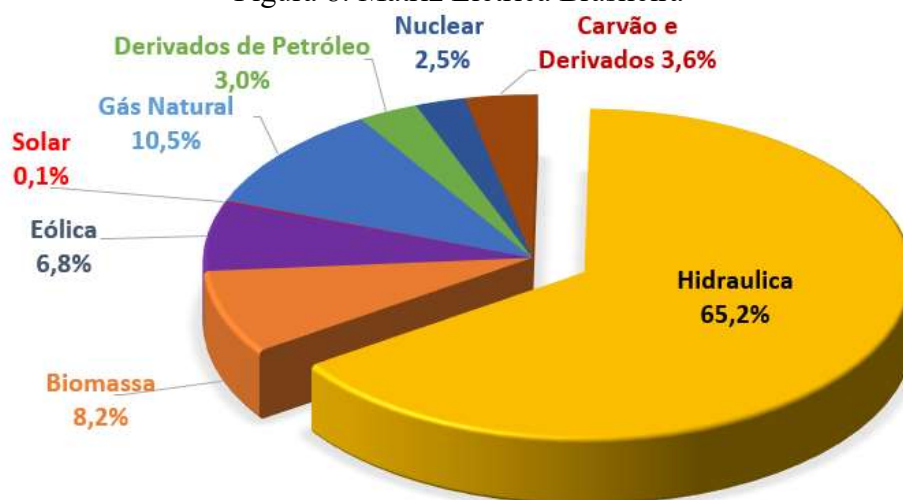
2.5.1. Matriz elétrica brasileira

A matriz energética brasileira é formada por cinco diferentes fontes (EPE, 2015). A empresa de pesquisa energética do ministério de minas e energia apresenta anualmente as tecnologias envolvidas na geração de energia elétrica e a capacidade instalada em 2018, ano base 2017, por meio do relatório síntese do balanço energético nacional (BEN, 2018).

Tradicionalmente, a Matriz Elétrica Brasileira, assim como a energética, é fortemente baseada em recuso hidráulico, mas recentemente estão presentes recursos renováveis de biomassa (BIO), eólica (EOL) e participação, ainda irrisória, da energia solar (SOL).

Segundo levantamento do governo brasileiro, as fontes de geração de energia elétrica e as respectivas participações na Matriz Elétrica Brasileira, bem como suas capacidades, são apresentadas na Figura 8 e na Tabela 2, respectivamente.

Figura 8: Matriz Elétrica Brasileira



Oferta Hidráulica em 2017: 407,3 TWh

Oferta Total em 2017: 624,3 TWh

Fonte: (BEN, 2018)

Em 2017, a oferta interna de energia elétrica (OIEE) ficou em 624,3 TWh, sendo 0,7 % maior que 2015 (619,7 TWh). Por fonte, são destaques os aumentos de 26,5 % na oferta eólica e de 875 % na solar fotovoltaica. As ofertas por óleo combustível, gás natural e carvão mineral cresceram 5,2 %, 16,1 % e -4,4 %, respectivamente (BEN, 2018). A supremacia da geração hidráulica está em tendência de queda, com 67,1 % na estrutura da OIEE (incluindo a importação de Itaipu), em 2016, contra os 64 % verificados em 2015, 65,2 % em 2014 e 70,6 % em 2013 (BEN, 2017).

Tabela 2: Oferta interna de energia elétrica (OIEE) entre 2017 e 2016

Fonte	2016 [GWh]	2017 [GWh]	Δ 17/16 [%]
Hidrúlica	380.911	370.906	-2,6
Gás natural	56.485	65.593	16,1
Biomassa	35.236	49.385	0,3
Derivados de petróleo	12.103	12.733	5,2
Nuclear	15.864	15.739	-0,8
Carvão (vapor)	17.001	16.657	-4,4
Eólica	33.489	42.373	26,5
Solar fotovoltaica	85	832	875,6
Outras	13.723	14.144	3,1
TOTAL	578.898	587.962	0,7

Fonte: (BEN, 2018)

A Tabela 3 lista a capacidade de geração elétrica instalada no Brasil, incluindo a expansão realizada entre 2016 e 2017. Ela também contempla a geração distribuída de micro e

mini geração e a importação de energia elétrica paraguaia, via usina hidroelétrica de Itaipu e a definição da geração distribuída no Brasil (BEN, 2018).

Tabela 3: Capacidade instalada de geração elétrica – 2017, ano base 2016

Fonte	2016	2017	Expansão
Hidroelétrica	96.925	100.303	3.378
<i>UHE</i> ¹	91.499	94.662	3.163
<i>PCH</i> ² e <i>CGH</i> ³	5.426	5.641	215
Biomassa	14.187	14.559	372
<i>Bagaço de Cana</i>	10.903	11.158	255
<i>Biogás</i>	119	135	16
<i>Lixívia e outras</i>	3.165	3.266	101
Eólica	10.124	12.283	2.159
Solar	24	936	912
Urânio	1.990	1.990	0
Gás	14.672	14.941	269
<i>Gás Natural</i>	12.965	12.980	15
<i>Gás Industrial</i>	1.707	1.960	253
Óleo	8.877	8.792	-85
<i>Óleo Combustível</i>	4.057	4.056	-1
Carvão Mineral	3.389	3.324	-65
Desconhecidas	150	242	92
Subtotal	150.338	157.370	7.032
Geração Distribuída ⁴	84	210	126
<i>Solar</i>	61	161	100
<i>Eólica</i>	5	10	5
<i>Hidro</i>	5	16	11
<i>Térmica</i>	11	23	12
Total Nacional	150.422	157.580	7.159
<i>Dos quais renováveis</i>	121.494	128.533	7.039
Disponibilidade com importação	156.272	163.430	

Fonte: (MME, 2018)

Notas:

¹ *UHE* Usina Hidroelétrica, com mais de 30 MW de potência instalada, onde os reservatórios maiores que 3 km² (Parapanema Energia, 2017.)

² *PCH* Pequenas Centrais Hidroelétricas, entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada, com reservatórios de no máximo 3 km² (Parapanema Energia, 2017).

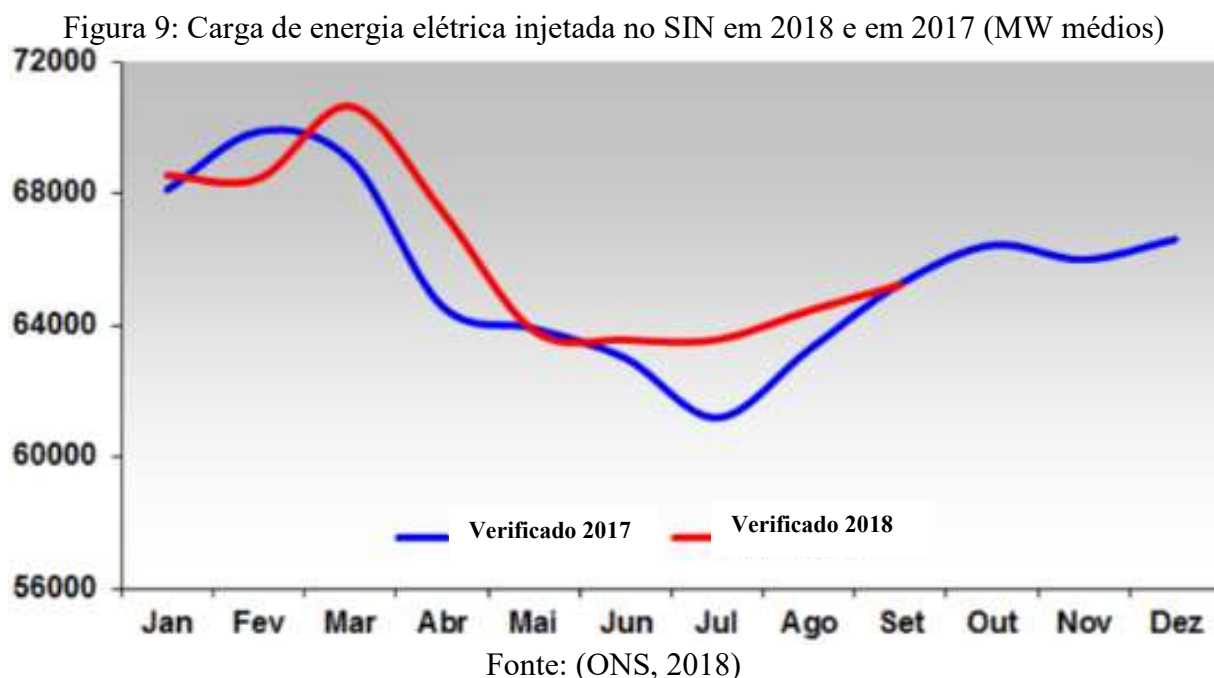
³ *CGH* Centrais Geradoras Hidroelétricas, com até 1 MW de potência instalada, não tem reservatório. Em geral, conta com uma barragem para desvio do curso d'água (Parapanema Energia, 2017).

⁴ **Geração Distribuída** (RN ANEEL n° 482, 2012): Trata-se da micro e mini geração distribuídas de energia elétrica, onde o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Com a entrada em operação de novas usinas em 2017, em destaque, somou-se 7.059 MW de potência elétrica instalada no Brasil, sendo 3.163 MW de UHE, 2.159 MW de EOL, 912 MW de solar fotovoltaica (MME, 2018). No total, a potência de geração instalada no Brasil passou para 163,4 GW em 2017, mostrando acréscimo de 4,6 % sobre 2016 (MME, 2018).

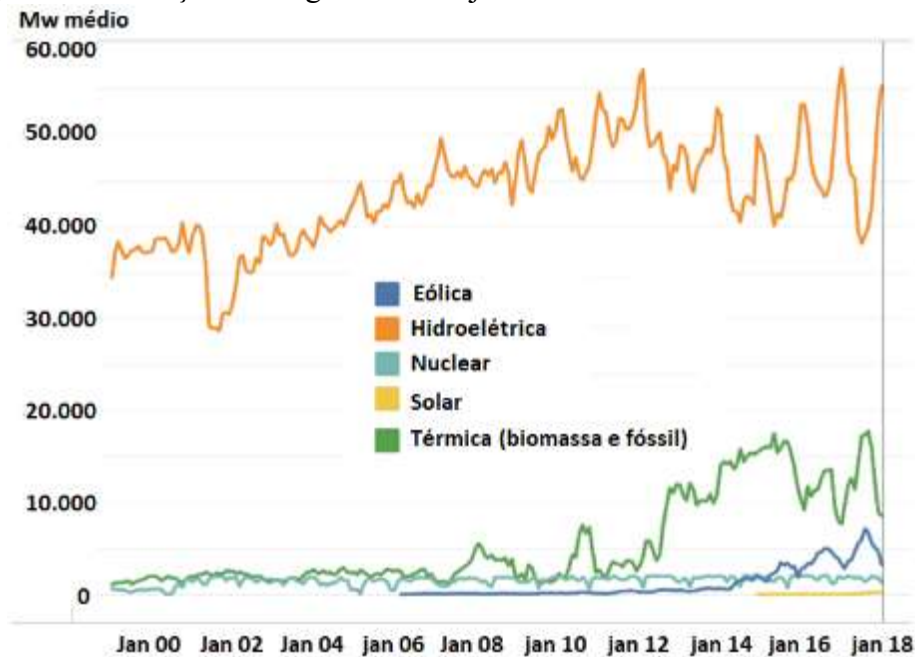
Também foi verificada a supremacia da potência hidráulica, com 65,7 % de participação, incluindo a importação e a participação das fontes renováveis com 81,4 %, indicador muito superior ao mundial, de 20 % (BEN, 2017).

O comportamento da injeção de carga elétrica no Sistema Integrado Nacional (SIN) pode ser observado nas Figuras 9 e 10, onde também é apresentada a sazonalidade real do sistema elétrico brasileiro (ONS, 2018).



O comportamento da carga de energia do SIN é publicado nos boletins mensais de carga do Operador Nacional do Sistema (ONS), ou seja, o que foi realmente injetado na rede do SIN. O SIN apresentou uma variação positiva de 1,6 % em 2018 com relação ao mesmo período de 2017 (ONS, 2018). Por meio das curvas apresentadas, é possível observar que o consumo de energia elétrica nos meses de verão é por volta 12 % maior que no inverno.

Figura 10: Evolução da carga elétrica injetada no SIN brasileiro de 1999 a 2018



Fonte: (ONS, 2018c)

É possível concluir que existe uma forte oscilação sazonal da geração hidrelétrica nos últimos anos, com crescimento da geração termoelétrica e da eólica de forma complementar, principalmente no inverno brasileiro, e a utilização irrisória de energia solar.

2.5.2. Evolução da demanda de energia elétrica no Brasil

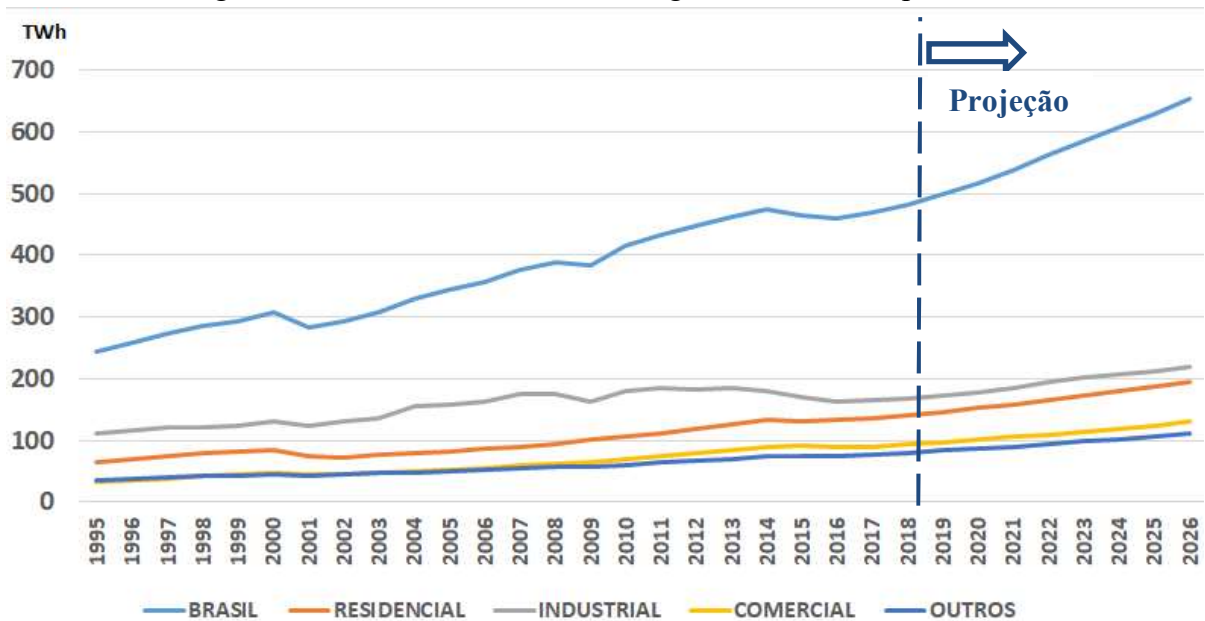
Para a projeção do consumo futuro de energia elétrica na rede, a EPE gerou o relatório da demanda de energia elétrica para os próximos dez anos, de 2017 a 2026, também chamado de plano decenal (EPE, 2017c). Esses estudos para projeções consideram:

- Indicações do acompanhamento e da análise do mercado e das conjunturas econômica e energética de 2016;
- Cenário macroeconômico para o horizonte de 2026;
- Cenário demográfico adotado para estimativas de autoprodução e de eficiência;
- Premissas relativas aos grandes consumidores industriais.

Com essas premissas, se obtêm as projeções do consumo de eletricidade e da carga de energia e a demanda, apresentadas na nota técnica.

Na Figura 11, apresenta-se a projeção do consumo de energia elétrica na rede, para o Brasil, total e por classe de consumo no período 2017-2026 (EPE, 2017c).

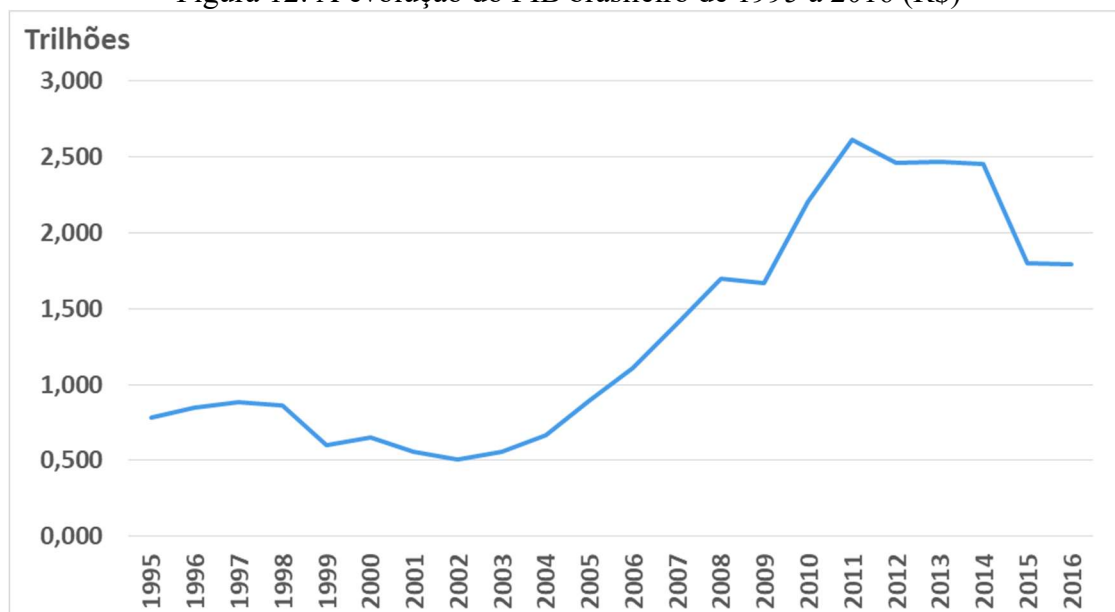
Figura 11: Consumo nacional de energia elétrica a rede por classe



Fonte: (EPE, 2017c)

Com o avanço tecnológico, o consumo da energia elétrica passa a ser um dos principais parâmetros de indicação do crescimento da economia (SMIL, 2014). O consumo de energia possui uma relação com o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) (FINKLE, 2014). A Figura 12 apresenta evolução do PIB brasileiro.

Figura 12: A evolução do PIB brasileiro de 1995 a 2016 (R\$)



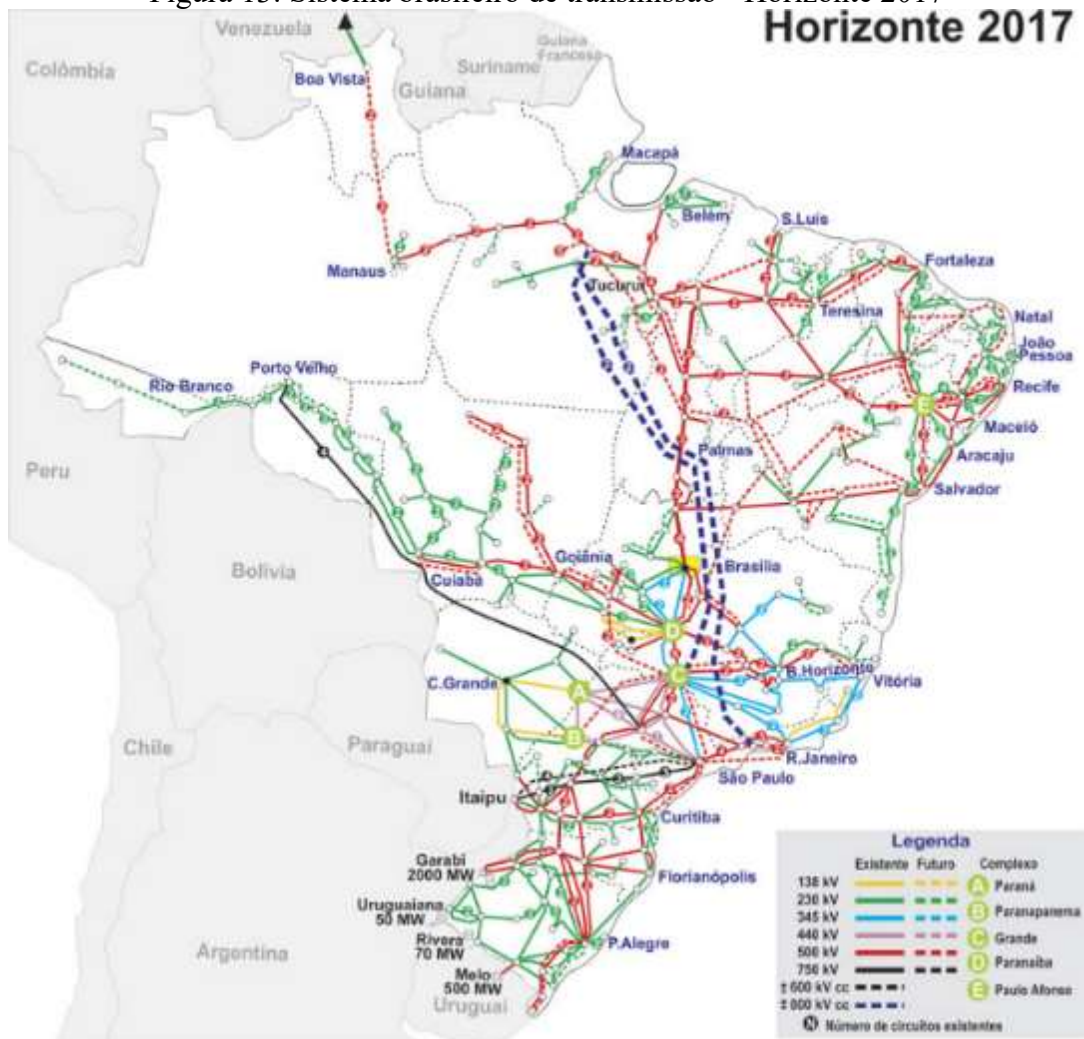
Fonte: BEN, 2017

Porém existe uma certa inércia de reação na redução da geração elétrica, quando, a partir de 2010, o PIB ficou em patamares de estabilidade no crescimento.

2.5.3. Distribuição de energia elétrica pelo Brasil

O sistema de energia elétrica foi concebido com a finalidade de alimentar as necessidades humanas e de aumentar o conforto de todos os brasileiros (SMIL, 2004). A importância da geração, da transmissão e da distribuição seguras de eletricidade ganhou destaque no Brasil, quando a eletricidade se tornou cada vez mais útil para fornecer o calor, a luz e a energia para as atividades humanas. A Figura 13 apresenta como está distribuída a rede de transmissão elétrica brasileira, em todo território nacional, por meio do sistema interligado nacional, o SIN.

Figura 13: Sistema brasileiro de transmissão - Horizonte 2017



Fonte: (ONS, 2018a)

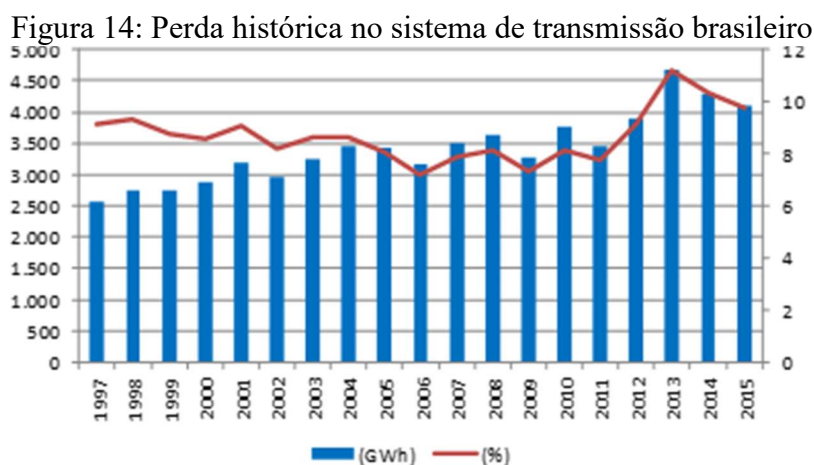
Com o advento da geração de energia elétrica centralizada (REIS, 2015), ou seja, em grandes usinas geradoras e em várias localidades brasileiras, verificou-se a importância das

enormes linhas de transmissão para energia elétrica em corrente alternada, que transportam a eletricidade com baixos custos e por grandes distâncias (FREITA, 2017).

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o responsável por gerir todo sistema de distribuição nacional, via lei nº 9.648 (BRASIL, 1998), sendo uma entidade governamental, sem fins lucrativos, que atua sob a fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para coordenar e controlar as instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

A transmissão de energia elétrica é feita via sistema que é interligado, com predominância de geração por usinas hidroelétricas, e é controlado por empresas de diversas regiões do país. O SIN responde por quase toda a capacidade de geração de eletricidade do Brasil, sendo somente 3,4 % dos sistemas existentes não pertencentes a ele, principalmente na região amazônica, atendendo a 98 % da população brasileira (BEN, 2017).

A distribuição de energia elétrica é feita através de subsistemas que conectam o sistema de transmissão com os consumidores finais (ANEEL, 2010). O sistema de distribuição se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas. A conexão, o atendimento e a entrega efetiva de energia elétrica ao consumidor do ambiente regulado são atribuições das distribuidoras de energia (ANEEL, 2010). A razão de perdas de energia elétrica nas redes de distribuição é medida como a relação entre as perdas e os fornecimentos de energia elétrica.



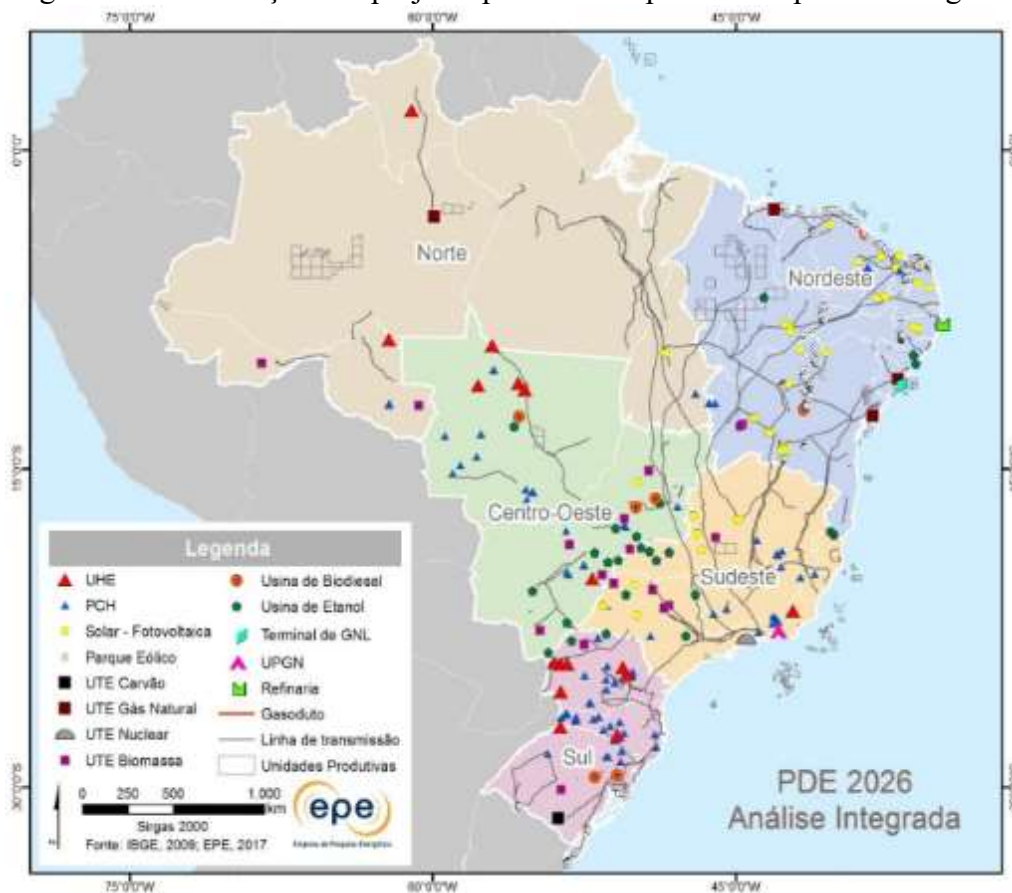
Fonte: (ERSE, 2017)

Entre 1997 e 2015, registou-se um aumento de 7 %, tendo-se verificado oscilações ao longo do período. Para tal, registou-se um aumento das perdas absolutas de 60 %, conforme aumento de fornecimento de 50 % no mesmo período, conforme apresentando na Figura 14.

2.5.4. Plano decenal em 2026 – previsão da distribuição de energia elétrica

A análise espacial da distribuição dos projetos previstos no decênio é importante do ponto de vista estratégico, na medida em que permite a visualização de uma eventual concentração de projetos na área de energia em geral e, especialmente, na energia elétrica, de forma integrada (MME, 2018).

Figura-15: Localização dos projetos previstos no plano de expansão energética

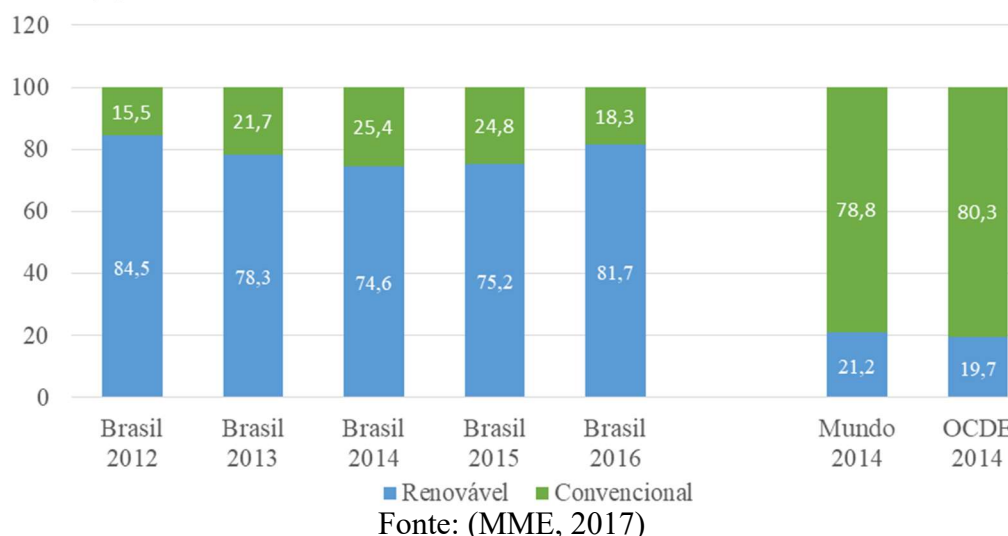


Fonte: (MME, 2018)

2.5.5. Geração de energia elétrica renovável no Brasil

O Brasil, tradicionalmente, tem uma parcela maior de geração de eletricidade por fonte renovável do que na maioria no mundo devido às abundantes fontes hidráulicas do país (LIMA, 2016). Atualmente, se observa o avanço da participação das fontes renováveis como se pode verificar na Matriz Elétrica Brasileira, apresentada na Figura 6.

Figura 16: Participação de energias renováveis na Matriz Elétrica Brasileira
Parcela (%)



As principais fontes renováveis para geração com usinas e tecnologias viáveis comercialmente são a PCH (pequena central hidroelétrica), o biogás, a eólica, a solar fotovoltaica e a heliotérmica, com a oceânica em desenvolvimento (EPE, 2016). Na Tabela 4, segundo a ANEEL, resume-se os empreendimentos para geração de energia elétrica por fontes tradicional e renovável.

Tabela 4: Empreendimentos para geração de energia elétrica no Brasil, em 2017

Tipo	Empreendimentos Operação			Empreendimentos Construção		
	Qde	Potência [kW]	%	Qde	Potência [kW]	%
Central geradora hidroelétrica	693	693.724	0,43	5	4.810	0,05
Central geradora eólica	557	13.733.643	8,53	97	2.010.850	21,58
Pequena central hidroelétrica	428	5.171.384	3,21	30	367.309	3,94
Central geradora solar fotovoltaica	2265	1.612.778	1	22	584.912	6,28
Usina hidroelétrica	217	97.673.848	60,69	6	1.259.980	13,52
Usina termoelétrica	2.992	40.051.389	24,89	31	3.741.034	40,14
Usina termonuclear	2	1.990.000	1,24	1	1.350.000	14,49
Total	7.155	160.926.816	100	192	9.318.895	100

Fonte: (ANEEL, 2018)

O Brasil possui um total de 7.155 empreendimentos em operação, totalizando 160.926.816 kW. Está prevista para os próximos anos a instalação de 19.569.874 kW, proveniente de 192 empreendimentos.

2.5.6. Intermitência e sazonalidade das fontes de energia renováveis

Um importante item a ser considerado para utilização de geração elétrica por diferentes fontes renováveis é o fato de que todas as fontes de energia têm seus ciclos naturais de fornecimento. Mesmo os combustíveis fósseis não são uma exceção, apesar de seus ciclos de reposição excederem o da vida de um ser humano por várias vezes. O Quadro 11 apresenta, a partir de um relatório de pesquisa da *Clean Line Energy*, a periodicidade da reposição dos ciclos naturais de fontes de energia renováveis (MD, 2017).

Tabela 5 Periodicidade na reposição natural das fontes renováveis

	Década	Ano	Sazonal	Dias	Horas	Minutos
Solar	-	X	X	X	X	X
Vento	-	X	X	X	X	X
Ondas	-	-	X	X	X	-
Hidráulica	-	X	X	X	-	-
Biomassa	X	X	X	-	-	-
Geotérmica	X	-	-	-	-	-

Fonte: (MD, 2017).

Todas as energias renováveis são diferentes em termos de reposição temporal de seus ciclos de vida. A primeira conclusão é que é possível alcançar um portfólio de energia, suficientemente diversificado, com base apenas nas fontes renováveis, embora sejam mais propensas a flutuações temporais no curto prazo, a chamada intermitência. A geração de energia elétrica por fontes intermitentes, como a fotovoltaica e a eólica, exigem padrões muito flexíveis de gerenciamento de oferta e demanda, mas também podem proporcionar uma maior flexibilidade se estiverem incluídas no portfólio de energia de uma comunidade ou de um país (MD, 2017).

A Tabela 5, também, apresenta correlações mais amplas: quanto menor a escala de tempo de uma fonte de energia, mais flexível ela é, e menores são os investimentos iniciais necessários para a implementação de usinas. Enquanto a biomassa é uma exceção a essa regra, todas as outras fontes de energia podem ser classificadas de tal forma. Assim, as usinas geotérmicas e as hidroelétricas requerem grandes gastos de capital. As instalações de energia de ondas e de marés têm custos intermediários, enquanto as energias solar e eólica são as mais baratas em termos de custos iniciais (MD, 2017).

2.5.7. Custos de geração das energias renováveis intermitentes no brasil

Os valores usinas foram levantados através da média de três empreendimentos mais recentes do mercado nacional. A Tabela 6 apresenta os valores de alguns parques eólicos, situados no estado do Rio Grande do Norte, em conjunto com sua relação de custo por MW instalado.

Tabela 6: Comparação de parques eólicos existentes no Rio Grande do Norte

Empreendimento	Investimento [R\$]	Potência [kW]	R\$/kW Instalado
Rio do Fogo	209.000.000	49.300	4.239
Riachão	610.000.000	150.000	4.066
Vila Acre	302.400.000	75.600	4.000

Fonte: (BONIFÁCIO, 2016)

A tabela 7 apresenta os custos de implementação de usinas fotovoltaicas.

Tabela 7: Comparação de parques eólicos existentes no Brasil

Empreendimento	Ano	Investimento [R\$]	Potência [kW]	R\$/kW Instalado
Ituverava-BA ¹	2017	1.200.000.000	254.000	4725
Nova Olinda-PI ²	2017	960.000.000	292.000	3300
Pirapora-MG ³ (Rastreamento/um eixo)	2018	2.00.000.000	400.000	5000

Fonte:1- (ÉPOCA NEGÓCIOS, 2017); 2-((GOVERNO DO PIAUÍ, 2017) 3- (FRANCE PRESSE, 2017)

2.5.8. Rendimento e tempo de geração das energias renováveis intermitentes no brasil

A eficiência das gerações em parques eólicos e em usinas solares fotovoltaicas pode ser observada na tabela 8. Para energia solar fotovoltaica é necessário considerar as duas condições apresentadas. Para o tempo de geração da energia solar fotovoltaica, foram consideradas as mesmas condições da geração por disco solar parabólico da Tabela 11.

Tabela 8: Rendimento geração das energias renováveis intermitentes no Brasil

Tipo	Característica	Eficiência	Tempo
Eólica	Aerogerador	0,17 ¹	2.500* (h/ano) 3,5* (meses/ano)
Solar fotovoltaica ²	Módulos monocristalinos	0,17 a 0,21 ²	3.285 (h/ano)
Solar fotovoltaica ³	Perdas em Sistemas da usina	0,731 ³	4,6 (meses/ano)

Fonte: 1 - (CASTRO, 2013) 2- (EPE, 2016) 3- (NREL, 2005) *- (AGRA, 2015)

2.5.9. Área ocupada para geração de energia elétrica no Brasil

A Tabela 9 apresenta a comparação da área ocupada entre os diversos tipos de geração elétrica presentes no Brasil, para usinas de 1.000 MWe de referência.

Tabela 9 Área ocupada para geração de energia elétrica no Brasil

Tipo	Tipo de usina	Área [ha]
Renovável	Hidroelétrica	25.000
	Solar fotovoltaica	5.000
	Eólica	10.000
	Biomassa plantada	400.000
Não renovável	Termoelétrica a óleo e carvão	100
	Termoelétrica nuclear e gás natural	50

Fonte: ELETRONUCLEAR, 2018

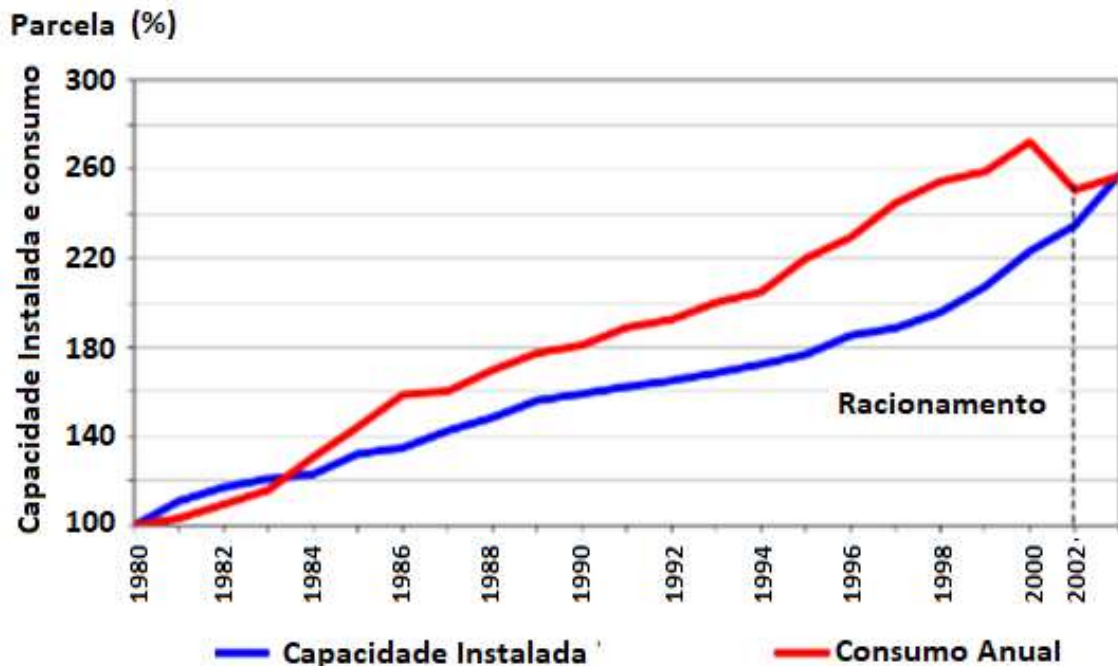
2.6. A Crise Hídrica Brasileira, PROINFRA e a Geração de Energia Elétrica Renovável

No início da década de 2000, uma grande seca no Brasil diminuiu o nível de água nos reservatórios do país, causando uma grave escassez de energia de fonte hidroelétrica, o que gerou racionamentos de energia elétrica, principalmente na região Nordeste (BARDELIN, 2004).

Conforme evolução apresentada na Figura 17, é possível se verificar que as condições onde ocorreram o racionamento de água se deram em um período onde a capacidade instalada era menor que o consumo, o que provocou a falta de energia elétrica por racionamento e “apagões” em algumas regiões.

Devido a esse cenário e à crescente demanda por energia elétrica, o Governo Brasileiro criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (BRASIL, 2004), para incentivar a geração de energia elétrica por fontes renováveis, o que resultou no primeiro leilão de energia renovável, que foi a eólica em 2009, em um esforço para diversificar a sua matriz de energia elétrica.

Figura 17: Evolução da capacidade de geração elétrica instalada e consumo



Fonte: (BARDELIN, 2004)

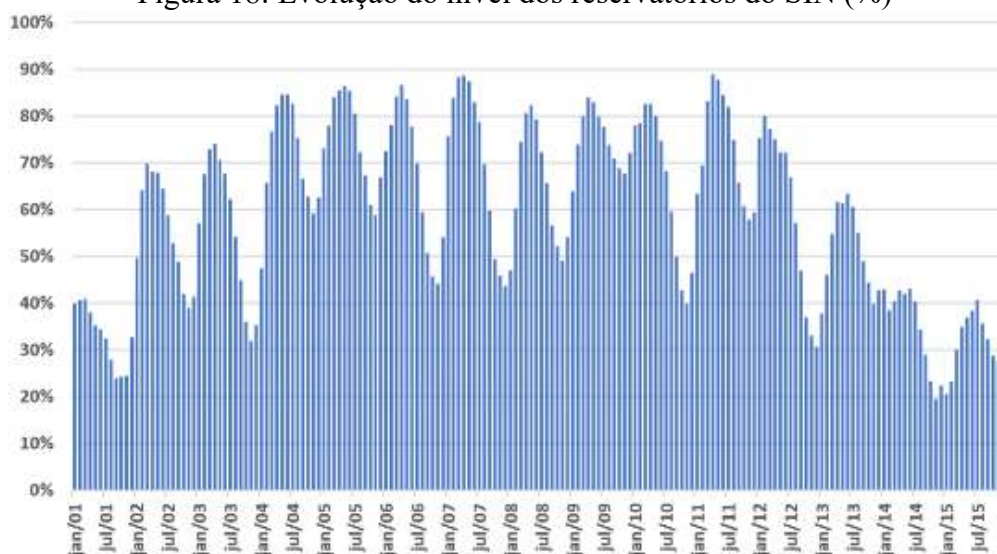
Essa conjuntura hidrológica com períodos de seca contribuiu para a diminuição contínua do nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas, sem que esses pudessem se recuperar no período úmido, como pode ser observado na evolução do nível dos reservatórios, conforme apresentado na Figura 4 (DARWICHE, 2016).

Um novo agravamento do déficit de geração hídrica aconteceu a partir de 2014, pois após o período de chuvas, não foi possível chegar a 50 % da capacidade total de armazenamento dos reservatórios das usinas integrantes do SIN. Em novembro de 2014, esse valor atingiu apenas 19,5 %, valor inferior ao menor nível dos reservatórios durante o racionamento de 2001, de 23,9 % em setembro.

Em 2015, enorme estresse foi gerado para conseguir chegar ao fim do ano sem racionamentos e para atingir o nível dos reservatórios em 29,4 %, situação menos crítica que o ano de 2014 (DARWICHE, 2016).

Para evitar novos racionamentos, foi necessário poupar a geração de energia por meios hidroelétricos e acionar o parque termoelétrico nacional em tempo integral, a plena capacidade. Essa decisão, por parte do Operador Nacional do Sistema (ONS), foi comum ao setor de geração (DARWICHE, 2016).

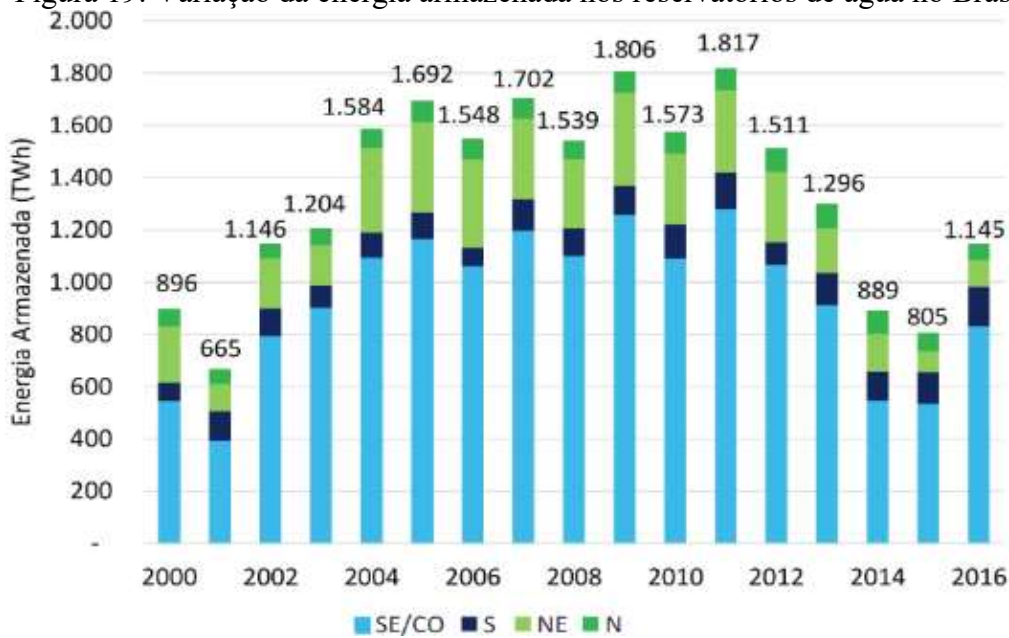
Figura 18: Evolução do nível dos reservatórios do SIN (%)



Fonte: (DARWICHE, 2016).

De forma compatível à evolução natural da capacidade dos reservatórios, a capacidade de geração de energia elétrica demonstra fortes variações tanto por ano quanto por região no Brasil. Isso pode ser observado na Figura 5, onde se apresentam os menores valores de energia armazenada nos reservatórios em 2001 e em 2015, anos de crise hídrica no Brasil (IEMA, 2017).

Figura 19: Variação da energia armazenada nos reservatórios de água no Brasil



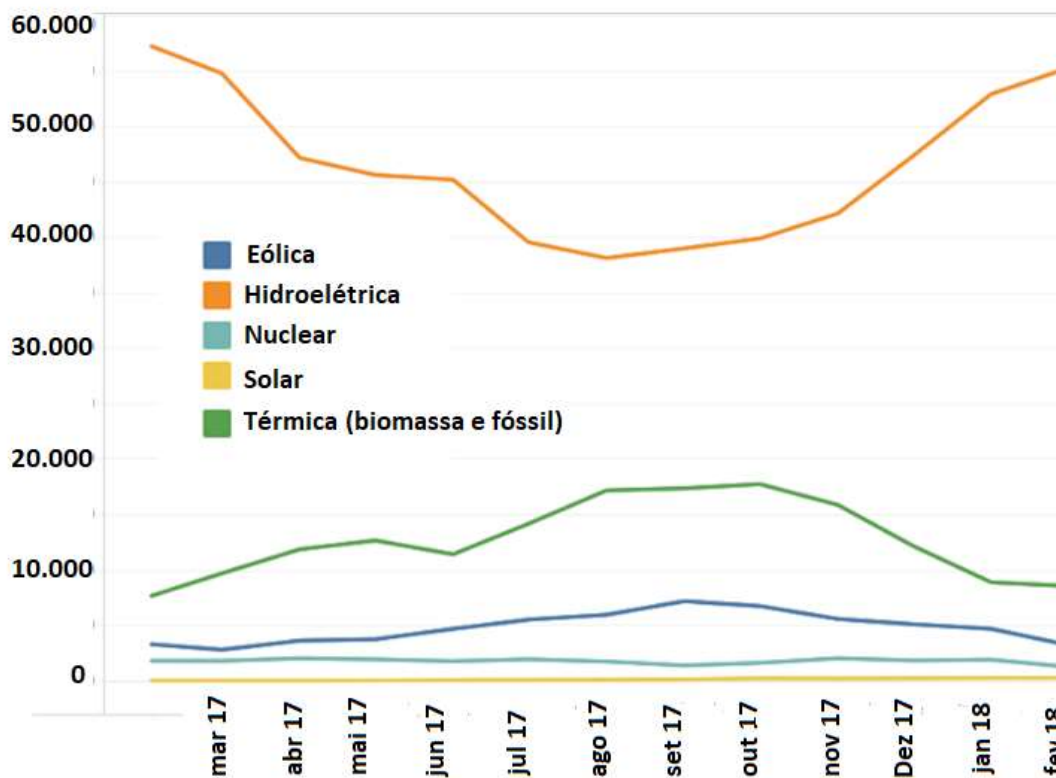
Fonte: (IEMA, 2017)

O caráter sazonal das energias renováveis reforça o benefício de sua utilização para a geração de energia elétrica, uma vez que o período do inverno brasileiro é de pico de safra de cana-de-açúcar e, conseqüente, maior disponibilidade de biomassa, onde também é período de maior incidência de ventos.

O inverno brasileiro é o período de maior escassez hídrica e menor geração por hidroelétricas e, portanto, a maior exportação de energia elétrica para o SIN advinda da bioeletricidade e da energia eólica ocorre justamente no período de menor geração hídrica, sendo essas duas formas de geração complementares, proporcionando segurança energética ao SIN (EPE, 2017b).

Essas considerações podem ser observadas no perfil de carga elétrica por tipo de geração no SIN, apresentada na Figura 6, gerado com dados operacionais do Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS, 2018c).

Figura 20: Evolução da carga elétrica injetada no SIN brasileiro de 2017 e 2018
Mw médio



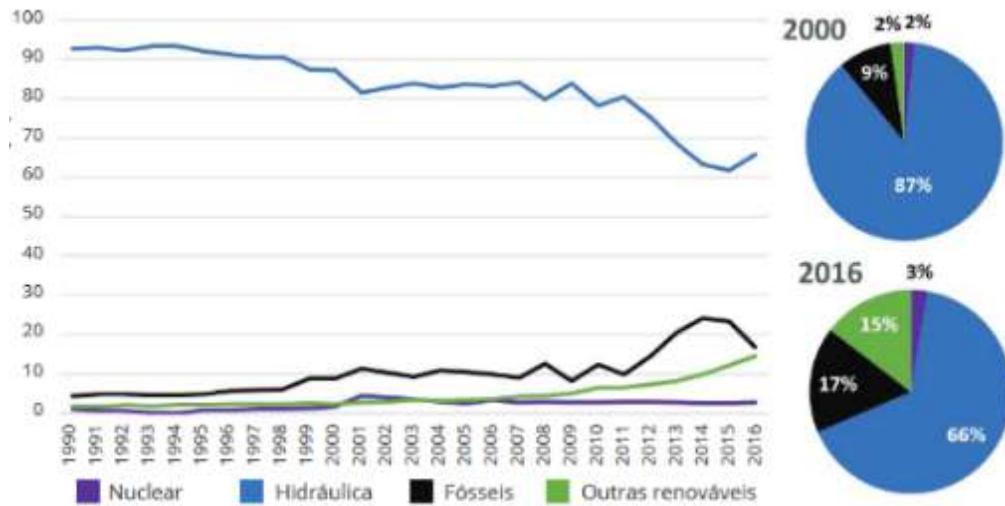
Fonte: (ONS, 2018c)

O perfil da utilização de geração de energia elétrica complementar à hidroeletricidade tem melhorado no Brasil devido às crises hídricas e o governo brasileiro tem focado mais na

geração termoelétrica a combustíveis fósseis, apesar do crescimento da geração por energias renováveis da última década (IEMA, 2017).

A geração termoelétrica a partir de combustíveis fósseis tem aumentado desde 2000, passando de 9 % para 17 %, em 2015. Quanto à hidroeletricidade, é notória a queda de sua participação, variando de 87 %, em 2000, para 66 %, em 2016 (IEMA, 2018) .

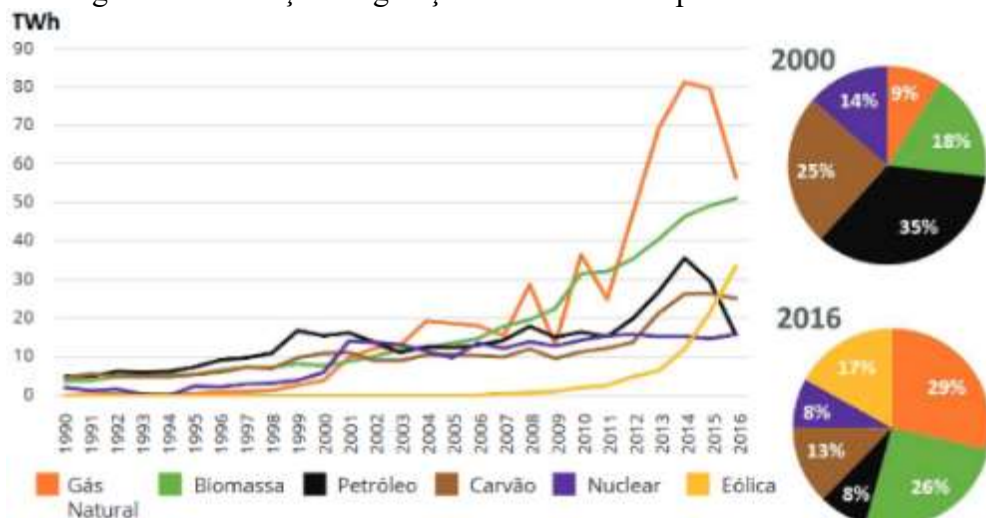
Figura 21: Evolução percentual das fontes primárias na geração de energia elétrica



Fonte: (IEMA, 2018)

As usinas termoelétricas a combustíveis fósseis no Brasil utilizam gás natural, óleo combustível derivado de petróleo ou carvão como fontes para geração (IEMA, 2017). Na figura 22 é possível observar a evolução da geração de eletricidade por fonte não hídrica no Brasil (IEMA, 2018).

Figura 22: Evolução da geração de eletricidade por fonte não hídrica



Fonte: (IEMA, 2018)

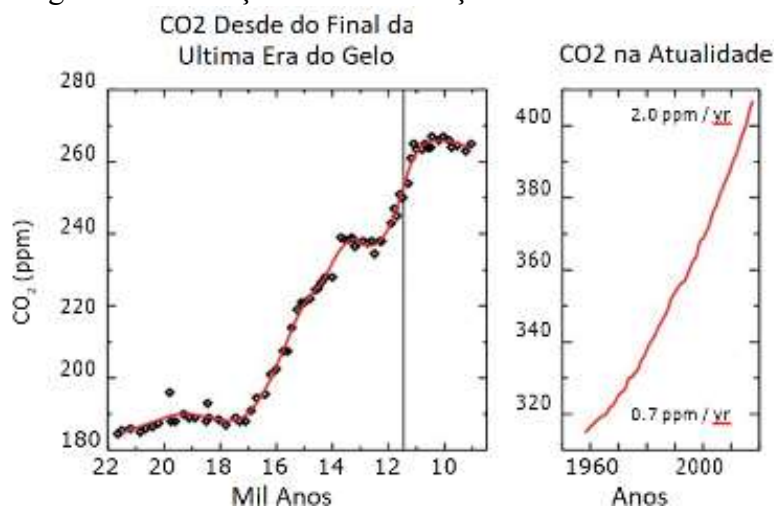
Apesar do forte crescimento da geração por biomassa e eólica, ainda assim, o crescimento de fontes por combustíveis fósseis é maior. Em 2016, esse crescimento representou 49 % de toda a geração não hídrica, seguidos pela biomassa (26 %), pela energia eólica (17 %) e pela nuclear (8 %). Entre 2012 e 2016, a geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis passou de 80,6 TWh para 136,3 TWh, em 2015, ano de crise hídrica, e 97,5 TWh, em 2016, apresentando um crescimento de 69,1 %. Isso comprova que as termoelétricas a combustíveis fósseis são utilizadas de forma extensiva em épocas de crise hídrica (IEMA, 2018).

2.7. Aquecimento Global e Geração de Energia Elétrica no Brasil

Para que a geração de energia elétrica seja obtida a partir de usinas que utilizem fontes não renováveis, é necessária a queima de combustíveis fósseis. Esse processo gera alguns resíduos indesejáveis, como os gases conhecidos por causar o “efeito estufa”, como, por exemplo, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) (INPE, 2016).

Monitoramentos realizados por diversas instituições ao redor do mundo, constataram um aumento em concentrações desses gases quando comparados com dados pré-revolução industrial. O CO_2 , por exemplo, apresentou um aumento de 145 % (WMO, 2017) em sua concentração. A Figura 9 apresenta a evolução na emissão desses gases desde a última era do gelo até os tempos atuais. Tal levantamento foi realizado pela Organização Mundial de Meteorologia das Nações Unidas, onde se observa que a concentração do CO_2 aumentou mais desde de 1960 do que em 22 mil anos, sendo em 2016, a maior em 880 mil anos (WMO, 2017).

Figura 23: Evolução da concentração de CO_2 na atmosfera



Fonte: (WMO, 2017).

O cenário de crescimento para os demais gases, desde a pré-revolução industrial até a atualidade, é apresentado na Tabela 1, que resume esses aumentos de concentração para os gases de efeito estufa para os últimos 10 anos.

Tabela 10: Histórico da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera

ITEM	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Concentração global em 2016	403,3 ± 0,1 ppm	1.853 ± 2 ppb	328,9 ± 0,1 ppb
Crescimento de 1750 a 2016	145 %	257 %	122 %
Crescimento absoluto 2015–2016	3,3 ppm	9 ppb	0,8 ppb
Crescimento relativo 2015–2016	0,83 %	0,49 %	0,24 %
Crescimento médio anual em 10 anos	2,21 ppm/ano	6,8 ppm/ano	0,90 ppm/ano

Fonte: (WMO, 2017)

Os gases de efeito estufa têm enorme capacidade de absorver partes da radiação transferida para a atmosfera, mantendo o planeta aquecido e auxiliando na manutenção da vida. A questão é o excesso que a industrialização humana gera na atmosfera, que pode causar aumentos de temperatura mundiais e efeitos adversos na atmosfera, em conjunto com o acréscimo da quantidade de gases como o CO₂ na atmosfera. Existem evidências de aquecimento em escala global. A elevação da temperatura da atmosfera e dos oceanos, retrocesso dos glaciares, diminuição da área coberta pelo gelo marinho nos polos e o aumento no nível dos mares são algumas evidências que podem ser citadas (INPE, 2016).

O crescimento populacional, as práticas agrícolas intensificadas, o aumento do uso da terra e o desmatamento, a industrialização e o uso de energia associada a partir de fontes de combustíveis fósseis contribuíram para aumentar as concentrações de CO₂ na atmosfera desde a era industrial (INPE, 2016).

O metano (CH₄) é o segundo gás de efeito estufa de longa vida mais importante e contribui com cerca de 17 % da retenção de radiação solar. Aproximadamente 40 % do metano é emitido para a atmosfera por fontes naturais, por exemplo, zonas húmidas e cerca de 60 % provêm de atividades humanas, como a criação de gado, a agricultura de arroz, a exploração de combustíveis fósseis, os aterros e a queima de biomassa (WMO, 2017).

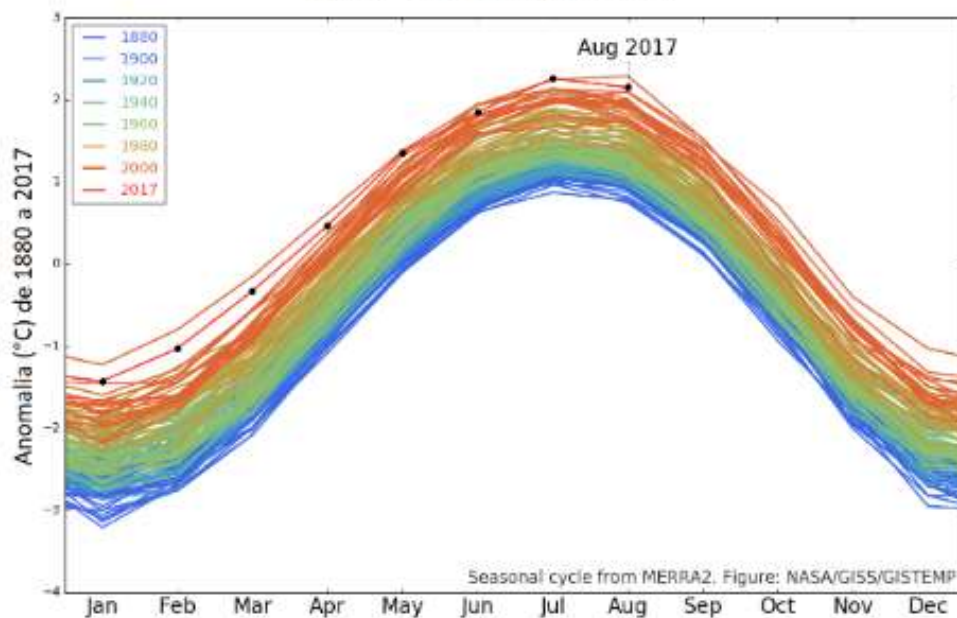
O óxido nitroso (N₂O) é emitido para a atmosfera a partir de fontes naturais em cerca de 60 % e antropogênicas em aproximadamente 40 %, incluindo os oceanos, o solo, a queima de biomassa, o uso de fertilizantes e vários processos industriais (WMO, 2017). O professor José

Rui Camargo, da Universidade de Taubaté, levantou os principais efeitos do aquecimento global:

“O aquecimento global refere-se a um aumento da temperatura superficial de todo o globo terrestre, incluindo a terra e a água, que vem ocorrendo nas últimas décadas. Este aumento de temperatura deve-se, principalmente, à emissão de CO₂ e também de outros gases. Seus principais efeitos são: aumento na nebulosidade, no índice pluviométrico, na condensação de núcleos de partículas contaminantes e na temperatura” (CAMARGO, 2008)

Todos esses fatos levam à conclusão de que o planeta Terra, como um todo, está mais quente que no século XIX. Pesquisas climáticas baseadas em medições diretas ou realizadas por satélites mostram que a temperatura global média da Terra aumentou 0,85 °C no período entre 1850 e 2012 (EMBRAPA, 2013). A Figura 10 apresenta o resumo de como a temperatura média da Terra está crescendo por mês e por ano, sendo agosto de 2016 o detentor do maior registro histórico de temperatura com 0,99 °C mais quente que o normal.

Figura 24: Variação do aumento da temperatura terrestre GISS de 1880 a 2017
GISTEM - Ciclo Sazonal desde 1880



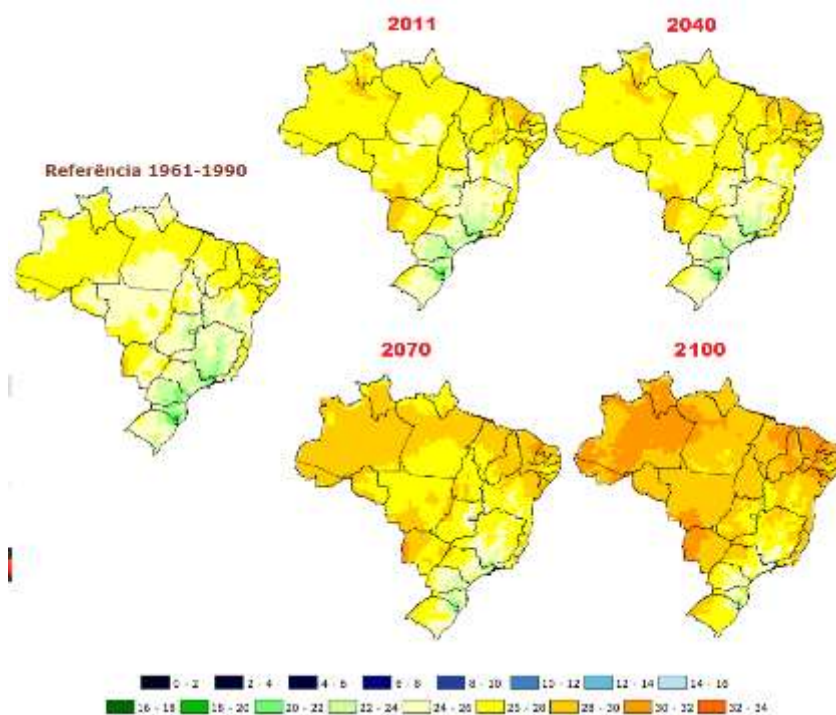
Fonte: (NASA, 2018)

A análise de temperatura de superfície GISS (GISTEMP), realizada pela NASA, é uma estimativa da mudança global da temperatura da superfície terrestre utilizando gráficos e tabelas

medidos em campo, que são atualizados em meados de cada mês a partir dos arquivos de dados de estações meteorológicas terrestres, oceânicas e na Antártida.

No Brasil, o crescimento das temperaturas médias não é diferente no resto do mundo, como visto no último relatório de mudanças climáticas, de 2007, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). A previsão da evolução do aumento das temperaturas no Brasil, realizada pela EMBRAPA, pode ser observada na Figura 25.

Figura 25: Mapa da variação da temperatura média (°C) no Brasil de 2011 a 2100

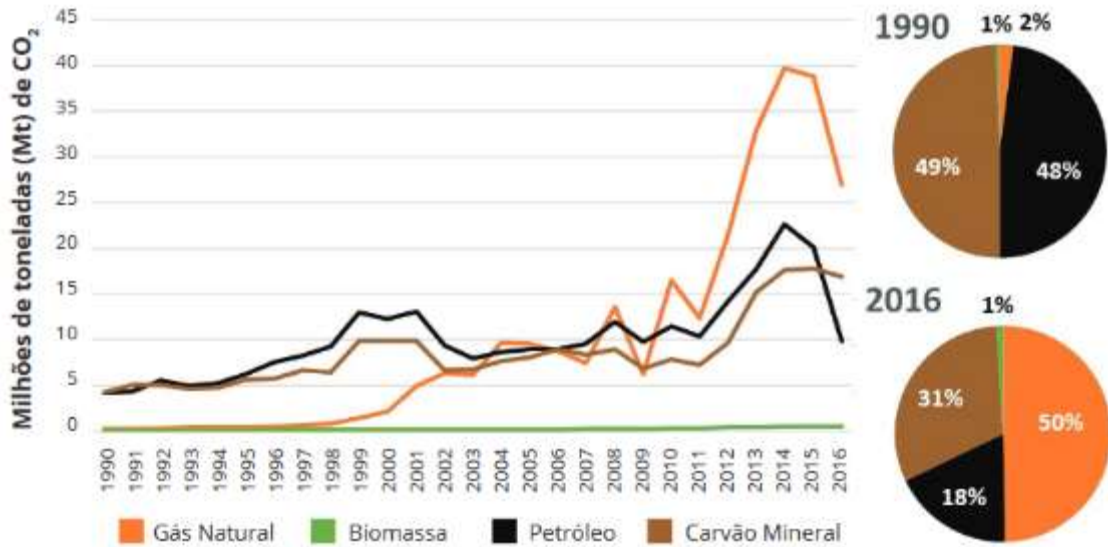


Fonte: (EMBRAPA, 2013)

Devido ao aumento da participação da termoeletricidade a combustível fóssil, a emissão de gases de efeito estufa na geração de eletricidade aumentaram mais de nove vezes entre 1990 (8,6 MtCO_{2e}) e 2015 (78,2 MtCO_{2e}) e seis vezes até 2016 (54,2 MtCO_{2e}), representando, em 2015, 13 % do total do setor de energia brasileiro e ocupando a posição de terceiro maior emissor, depois dos transportes (IEMA, 2018).

Em 2016, as emissões decorrentes da geração termoelétrica provenientes do uso de gás natural corresponderam a 50 %, 18 % para derivados de petróleo e a 31 % para uso de carvão mineral e derivados (IEMA, 2018). A emissão dos gases de efeito estufa por tipo de fonte no Brasil pode ser observada na Figura 26.

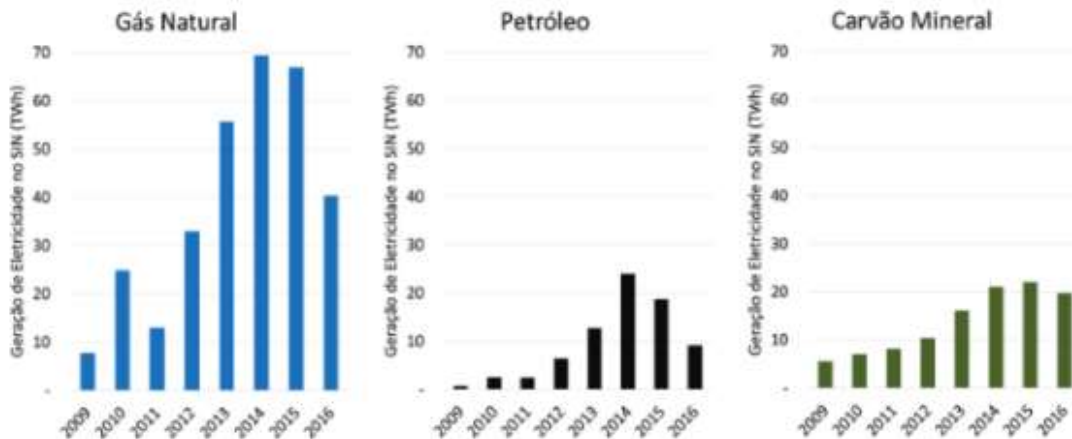
Figura 26: Evolução da emissão dos gases de efeito estufa por tipo de fonte



Fonte: (IEMA, 2018)

As emissões geradas pelo consumo de biomassa correspondem às de metano (CH₄) e de óxido nitroso (N₂O), sendo 3 % do total da emissão de gases de efeito estufa. As emissões de CO₂ não são contabilizadas pra produção de energia, pois se considera que são compensadas pela absorção de CO₂ na fotossíntese que gerou a biomassa, conforme recomendação do IPCC. Também é possível concluir que as emissões por biomassa são por volta de 1 %, portanto, desprezíveis (IEMA, 2017). A produção de energia termoeétrica a combustíveis fósseis por tipo de fonte interligada ao SIN brasileiro pode ser observada na Figura 27.

Figura 27: Evolução da geração de eletricidade - termoeletricas a combustível fóssil



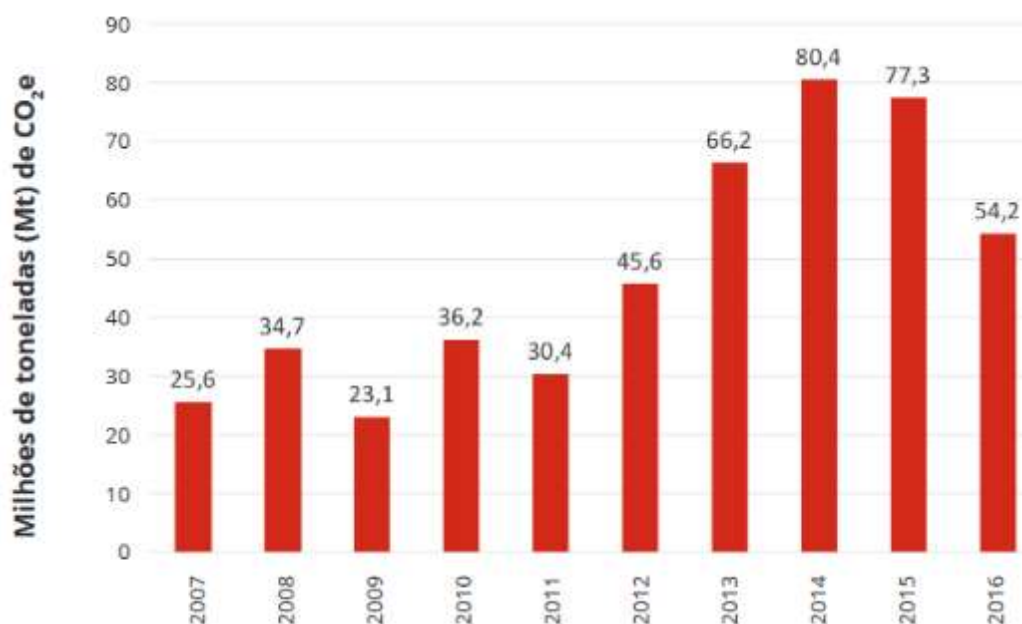
Fonte: (IEMA, 2017)

Tanto a geração quanto a emissão de gases do efeito estufa por termoeletricas são crescentes de 2009 a 2014. A partir de maio de 2015, inicia-se uma trajetória descendente das

emissões mensais, atingindo seu mínimo em maio de 2016, mês em que as emissões alcançaram o patamar mais baixo desde setembro de 2012, devido à redução da geração de eletricidade por usinas térmicas a combustíveis fósseis e à crise econômica brasileira.

Assim, da retomada da economia, espera-se um crescimento das emissões e da geração termoelétrica por combustível fóssil. A evolução dos totais de emissão de gases de efeito estufa devido à geração de energia elétrica em termoelétrica de combustível fóssil pode ser observada na Figura 28, o que contribui para as mudanças climáticas globais (IEMA, 2018).

Figura 28: Evolução das emissões de GEE associadas à geração de eletricidade



Fonte: (IEMA, 2018)

As mudanças climáticas devido ao aquecimento global podem levar 720 milhões de pessoas à miséria no mundo (ODC, 2015).

Conforme estudo conjunto entre o Banco Mundial e universidades brasileiras baseado no relatório Stern, do Reino Unido, para o Brasil, impactos da mudança do clima na economia, visto em simulações, revelam uma perda permanente do PIB brasileiro, em 2050, da ordem de 0,5 a 2,3 %, conforme trajetórias de crescimento do PIB. Haveria uma perda média anual para o cidadão brasileiro, em 2050, entre R\$ 534 e R\$ 1.603, sendo que a redução de consumo acumulada dos brasileiros, até 2050, ficaria entre R\$ 6.000 e R\$ 18.000, representando de 60 a 180 % do consumo anual per capita atual, conforme variação do PIB (MARCOVITCH, 2017).

O governo brasileiro tem uma preocupação com o aumento futuro de demanda na geração de energia elétrica e o uso de termoelétrica, que pode ser verificada nos Boxes 10.4 e 10.6 do Plano Decenal de Energia Elétrica 2026 (MME, 2018).

“BOX 10.4 – EFEITOS AMBIENTAIS DE UM CENÁRIO DE MAIOR DEMANDA

Num cenário de maior demanda de energia elétrica, estima-se um aumento na oferta de energia eólica e de termoelétricas a gás natural. Sendo assim, deve-se reforçar a atenção para a qualidade do ar, devido ao aumento de emissões de gases poluentes pelas termoelétricas. ”

“BOX 10.6 - ENTENDA A META DO BRASIL

“O Brasil se comprometeu com uma meta absoluta de redução de GEE em relação a um ano base. O compromisso é de que em 2025 as emissões de GEE do país sejam 37% inferiores ao verificado em 2005. Isso significa que, para saber se atingimos ou não a meta, deveremos comparar o resultado do inventário do ano 2025 com o resultado do inventário do ano 2005, incluindo todos os setores inventariados de acordo com a metodologia do IPCC (energia, mudança de uso do solo e florestas, processos industriais, resíduos e agropecuária). Os estudos que embasaram a NDC mostraram que o país seria capaz de chegar a 2025 com emissões totais (todos os setores) da ordem de 1,3 GtCO₂e (MMA, 2015)”.

2.7.1. Emissão de gases de efeito estufa para várias tecnologias de geração elétrica

Os resultados compilados da emissão de gases de efeito estufa por várias tecnologias de geração de eletricidade ($\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$) podem ser observados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente para energias renováveis e não.

Tabela 11: Emissão de gases de efeito estufa em energia renováveis [$\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$]

Capacidade	Bioeletricidade	Fotovoltaica	Heliotérmica	Geotérmica	Hidroelétrica	Oceânica	Eólica
Mínimo	-633	5	7	6	0	2	2
25 %	29	14	20	3	6	8	8
50 %	46	22	45	4	8	12	16
75 %	80	32	57	7	9	20	45
Máximo	360	217	89	79	43	23	81

Fonte: TORRES, 2015

Tabela 12: Emissão de gases de efeito estufa em energia não renovável [$\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$]

Capacidade	Nuclear	Gás natural	Óleo comb.	Carvão
Mínimo	1	290	510	675
25 %	422	722	877	877
50 %	469	840	1.001	1.001
75 %	548	907	1.130	1.180
Máximo	220	930	1.170	1.689

Fonte: TORRES, 2015

2.7.2. Venda créditos de carbono

O complemento da receita bruta anual de qualquer energia renovável pode ser obtido pela venda de créditos de carbono provenientes da geração de energia limpa. A venda dos créditos é realizada com base nas diretrizes do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado a partir do protocolo de Kyoto, onde países industrialmente mais desenvolvidos compram créditos de carbono de outras nações com produção de energia renovável, com o intuito de atingir suas metas para redução de CO_2 (BONIFÁCIO, 2016).

A partir de parâmetros estabelecidos é aplicada uma taxa de conversão de $0,28 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$, sendo o valor do crédito estipulado em € 12,5, ou seja, R\$ 180 por $\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ (BONIFÁCIO, 2016).

2.8. Recurso de Energia Solar no Brasil

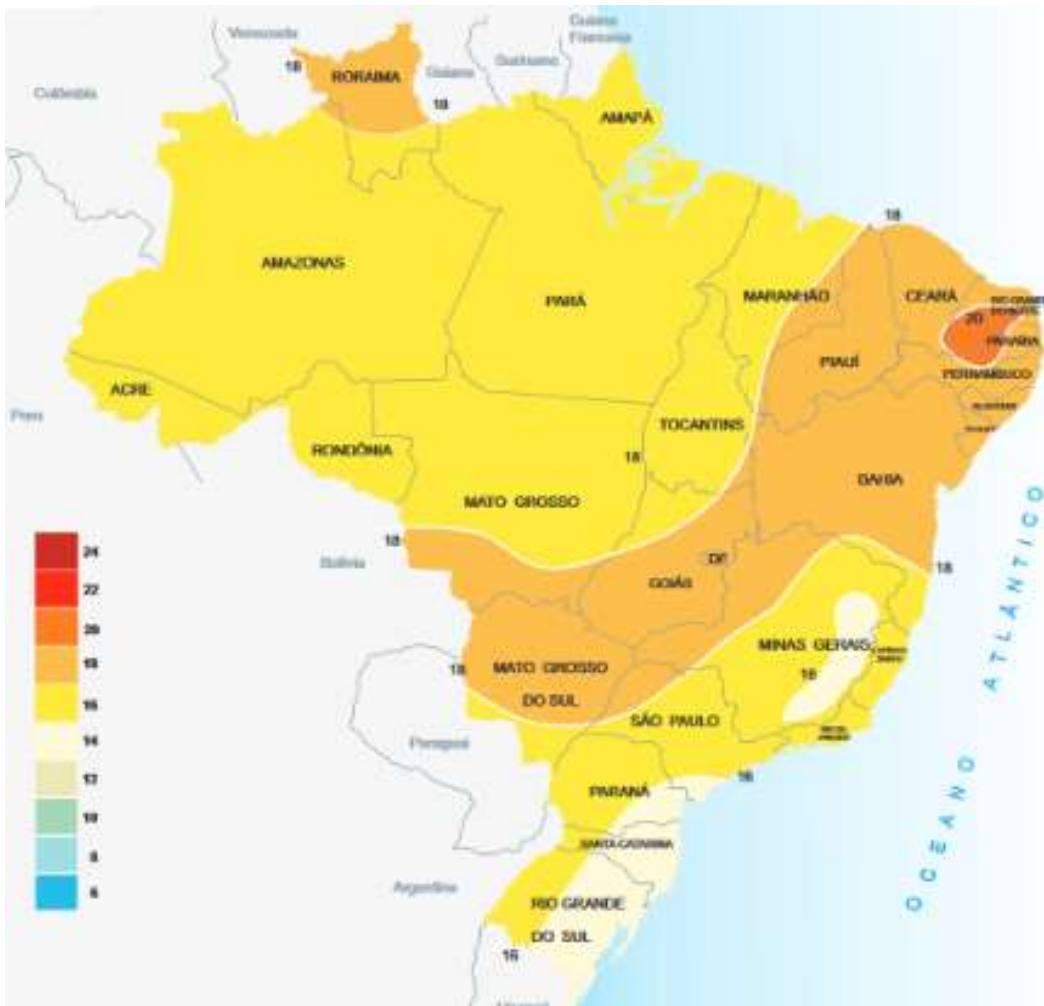
2.8.1. Mapa da irradiação solar no Brasil

Para que o projeto em energia solar centralizada seja adequado, é necessária a análise das maiores irradiações médias na localidade de instalação, para se obter a melhor eficiência do

processo de geração de energia elétrica e ter viabilidade econômica para o empreendimento (CARVALHO, 2016).

O atlas solarimétrico brasileiro é a referência técnica para a verificação da radiação solar. A Figura 31 apresenta a insolação anual média vertical para todo país (ITIBA, 2000), com destaque para o semiárido nordestino, com a área de 982,563,3 km² (IBGE, 2017) e as maiores insolações chegando a 20 MJ/m² (5,7 kWh) (MARANHÃO, 2015).

Figura 29: Mapa da irradiação solar no Brasil

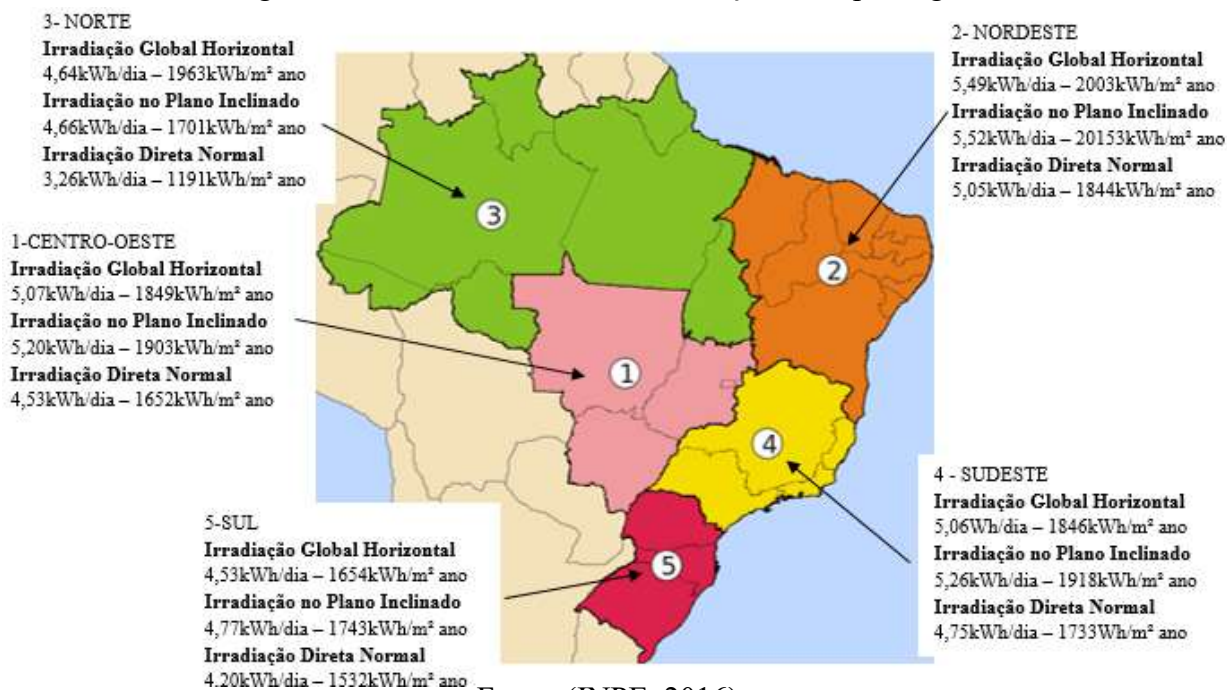


Fonte: (ITIBA, 2000)

As regiões possíveis para a implantação das usinas baseadas em energia solar são enormes, devido ao Brasil ter excelente incidência de radiação solar e a maioria das regiões possuir mais de quatro horas por dia de radiação útil para a geração de energia elétrica. Nesse sentido, as melhores regiões para a implantação das usinas solares de grande porte são os

estados de Minas Gerais, da Bahia, do Tocantins, do Ceará e do Rio Grande do Norte (ITIBA, 2000). De forma complementar, a Figura 32 apresenta o potencial anual médio de irradiação solar global, de plano inclinado e direta, por região brasileira.

Figura 30: Síntese dos níveis de irradiação solar por região



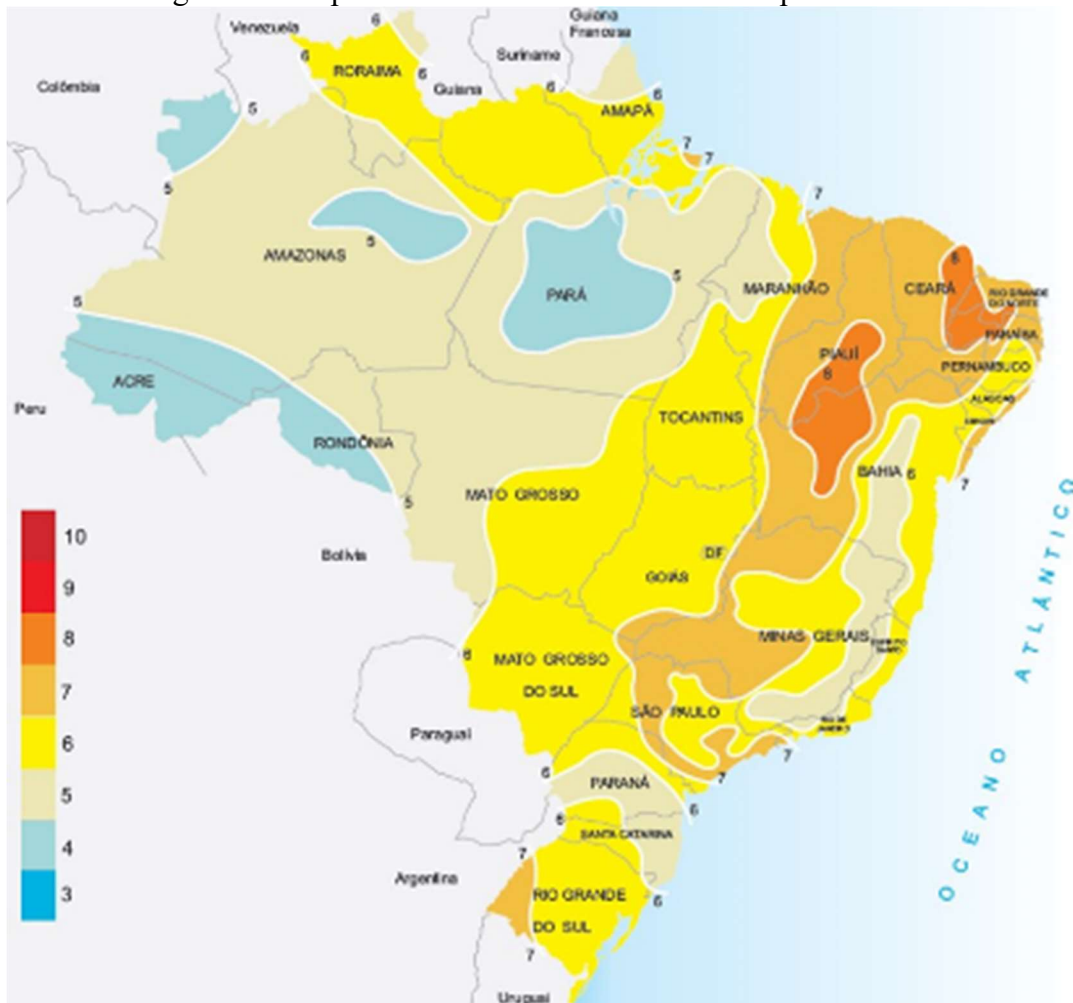
Fonte: (INPE, 2016)

Esta informação tem relevância, pois é possível verificar onde os projetos de uma usina aplicando energia solar pode ter viabilidade comercial suficiente para geração de energia elétrica. (INPE, 2016). Nesse contexto, novamente, o Nordeste apresenta as maiores irradiações, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste. A característica climática da região Norte tem potencial solar médio, similar da região Sul (INPE, 2016).

2.8.2. Mapa da disponibilidade solar no Brasil

As melhores regiões possíveis para a implantação das usinas solares são vastas, devido ao Brasil ter excelente incidência de radiação solar, e a maioria das regiões possuir mais de 4 horas de radiação útil para a geração de energia elétrica. Neste sentido as melhores regiões para a implantação das grandes usinas solares de grande porte, são os estados de Minas Gerais, Bahia, Tocantins, Ceará e Rio Grande do Norte (SANTANA, 2017). Na Figura 33 é possível observar a disponibilidade solar média, em horas, para todo o país, disponibilizadas pelo atlas solarimétrico do Brasil.

Figura 31: Disponibilidade solar média em horas para o Brasil



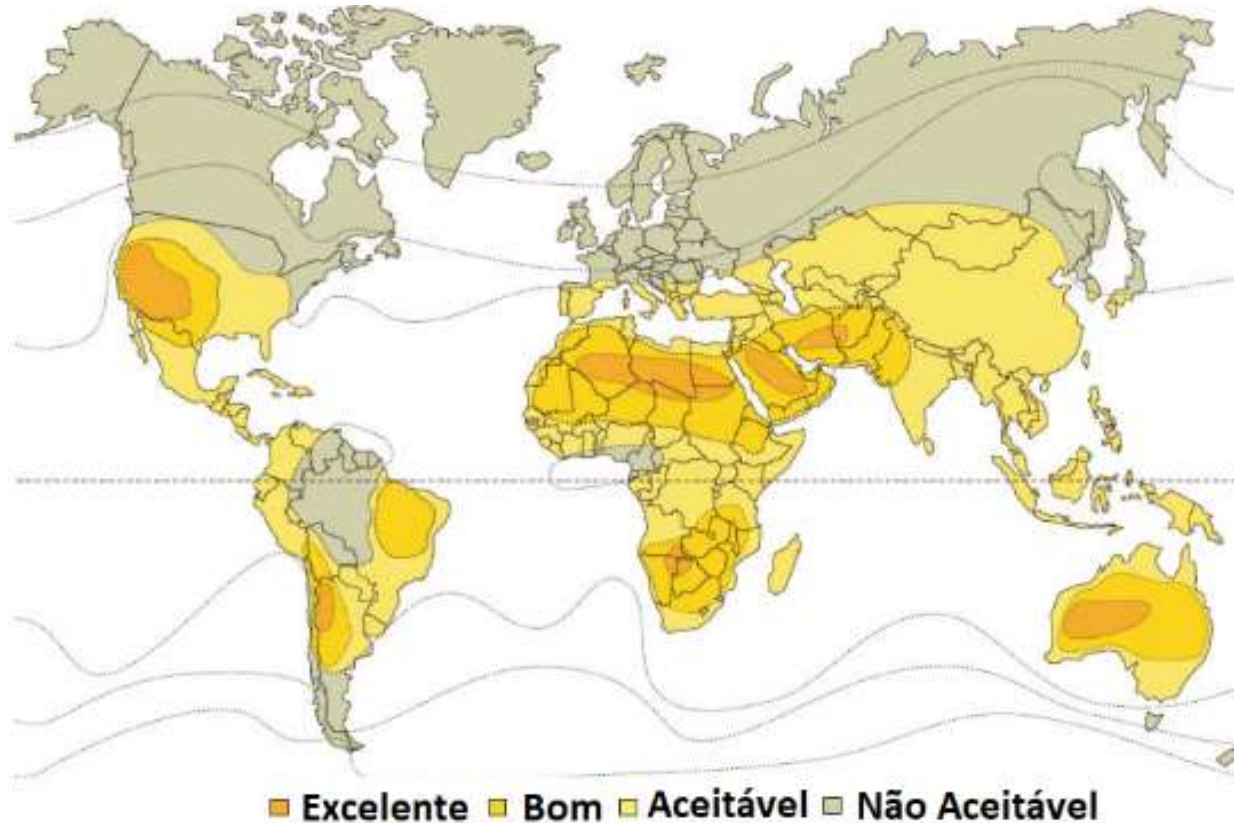
Fonte: (ITIBA, 2000)

2.9. Mapa do Recurso Solar Heliotérmico no Mundo

O recurso solar heliotérmico ótimo se concentra em áreas inóspitas em desertos ou em regiões semiáridas no mundo. Essas áreas são ideais devido à alta insolação e às terras planas inabitadas (MILLENNIUM, 2009).

O recurso solar heliotérmico é considerado bom ou aceitável no Brasil para a utilização em usinas de grande porte, sendo que a irradiação ideal e a ausência de nebulosidade (MILLENNIUM, 2009) são propiciadas no Centro-Nordeste do país, conforme estudo do centro aeroespacial alemão DLR e com destaque para a região do semiárido nordestino (MARANHÃO, 2015).

Figura 32: Áreas aptas para implementação de usinas heliotérmicas



Fonte: (MILLENNIUM, 2009)

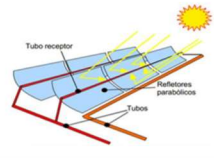
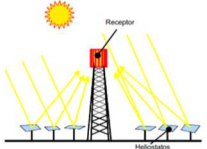
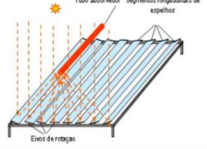
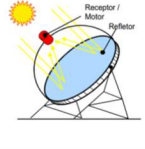
2.10. Maturidade de Geração por Tecnologias Heliotérmicas

Nesta pesquisa, somente as tecnologias que têm viabilidade comercial para a geração em larga escala foram consideradas para fins de análise. Também serão abordadas, nesta dissertação, tecnologias existentes para a geração heliotérmica, como o disco parabólico com motor *Stirling*, ainda em fase experimental (NREL, 2018).

A Figura 33 apresenta de forma resumida a comparação entre as tecnologias heliotérmicas e sua maturidade para geração de energia elétrica de forma comercial.

São quatro as tecnologias solares heliotérmicas típicas, conforme o bloco de geração: Fresnel linear, calha parabólica, torre central e disco parabólico. Conforme levantamento do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), somente duas usinas de disco parabólico e quinze Fresnel linear estão em operação no mundo, sendo que, boa parte dessas usinas, são experimentais (NREL, 2018).

Figura 33: Maturidade das tecnologias heliotérmicas concentradas

	Calha Concentrador Cilindrico Parabólico	Torre Solar Concentrador Heliostatos	Fresnel Concentrador Linear Fresnel	Motor Sterling Concentrador Parabólico
Concentração Solar				
Descrição	Os coletores de calha parabólicos concentram a irradiação solar em um tubo receptor que contém um fluido de transferência de calor (HTF)	Heliostátos seguem o sol e refletem a irradiação no topo da torre solar, onde o calor é transferido para um fluido de transferência de calor (HTF)	Os espelhos Fresnel concentram a irradiação em um tubo receptor, que contém um fluido de transferência de calor (HTF)	Um grupo de espelhos parabólicos Disco reflete a irradiação em um motor, localizado no ponto focal
Validação	30 Anos	8 Anos	3 Anos	Necessita Validação
Aplicação	Produção de Energia Elétrica em Larga Escala	Produção de Energia Elétrica em Larga Escala	Principalmente Calor	Energia Distribuída
Qualidade Principal	Modularidade	Altas Temperaturas	Baixo Custo	Alta Capacidade de Conversão

Testado Comercialmente Para Gerar Eletricidade Em Grande Escala

Fonte: (ABENGOA, 2015)

A empresa ABENGOA, em sua análise de maturidade apresentada no Quadro-21, citara que as duas tecnologias viáveis para a produção de energia elétrica de forma comercial na atualidade são a torre solar central e a calha parabólica (ABENGOA, 2015). O mesmo fora comentado pelo instituto DLR, do governo alemão (DLR, 2012). Por outro lado, o NREL levantara que na atualidade tem-se noventa e seis usinas operacionais de calha parabólica e trinta e duas de torre central (NREL, 2018).

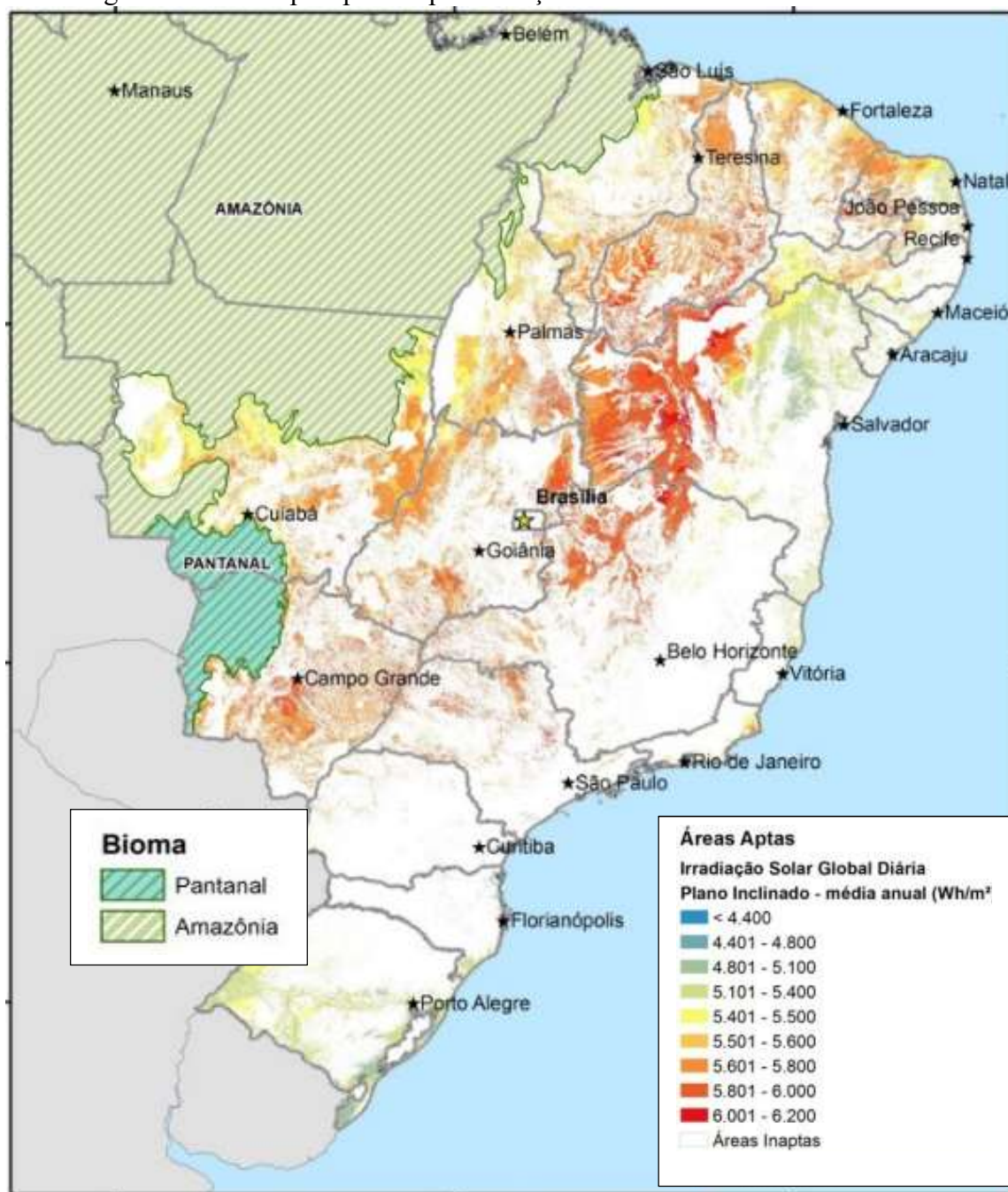
Portanto, para uma análise da operação das energias solares heliotérmicas serão consideradas apenas as tecnologias de calha parabólica e de torre central, pois a potência elétrica gerada comercialmente, a quantidade de usinas, a maturidade e o potencial de crescimento têm aplicação somente para essas duas tecnologias no atual cenário brasileiro (HELIO, 2018).

2.11. Mapa e Requisitos para Localização Ótima de Usinas Solares no Brasil

A localização ótima para a geração solar fotovoltaica de grande porte no Brasil foi levantada pela superintendência de meio ambiente da EPE, aplicando o *software* ArcGIS, que identificou por meio de georreferenciamentos, as áreas aptas para a instalação das usinas,

considerando algumas restrições relevantes, conforme mapa apresentado na Figura 36 (CONSOL, 2016). Para melhor localização com o intuito de geração de energia elétrica por meio de usinas solares, deve-se levar em consideração: o alto recurso solar, o terreno com inclinação mínima, a proximidade à rede elétrica, a proximidade aos corredores de transporte, a disponibilidade de água e a terra sem limitação de uso.

Figura 34: Áreas aptas para implementação de usinas fotovoltaicas no Brasil



(CONSOL, 2016)

Foram caracterizadas como aptas, as áreas com declividade do terreno inferior a 3 % e com dimensões superiores a 0,5 km², sendo a área necessária para a instalação de uma unidade de cerca de 35 MWp. Não foram consideradas aptas aquelas áreas sob proteção ambiental, unidades de conservação, terras indígenas, comunidades quilombolas e áreas de mata atlântica, com vegetação nativa (BRASIL, 2006). Também, optou-se por excluir da análise, áreas dos biomas Pantanal e Amazônico e outras áreas com limitações de uso, tais como áreas urbanas. As áreas de cor branca são consideradas inaptas (CONSOL, 2016).

Claro que as áreas aptas para a geração fotovoltaica podem ser utilizadas para a geração heliotérmica, pois são similares nesse aspecto. Portanto, se está adotando que são as mesmas, pois não existe legislação ainda desenvolvida pelo governo brasileiro indicando quais são as melhores áreas para essa tecnologia ainda inovadora no Brasil.

2.12. Geração Solar Heliotérmica

As usinas heliotérmicas concentram a irradiação solar em um receptor, onde a água ou os fluidos são aquecidos. Esses líquidos, também chamados de fluidos de transferência de calor, do inglês *Heat Transfer Fluid* (HTF), são aquecidos, realizando trabalho mecânico, girando os turbogeradores para a geração de eletricidade (PATEL, 2013).

Basicamente, em comparação com uma usina convencional de carvão ou gás natural, a caldeira é substituída por um campo de espelhos, que aquece os HTFs. As usinas heliotérmicas são classificadas com base no tipo de concentração das radiações solares realizadas no coletor e, em geral, são classificados como (MARANHÃO, 2015) :

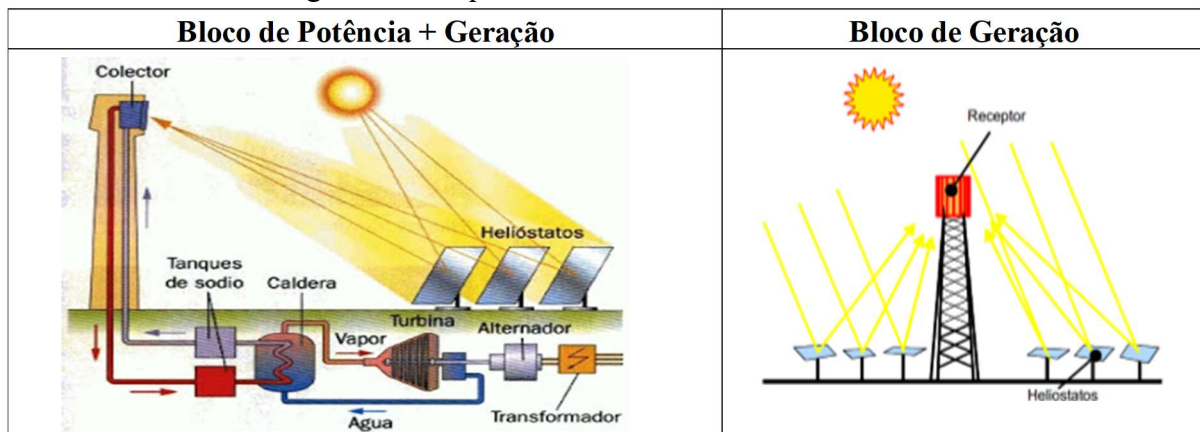
- Focagem em ponto: Composta por torre solar central (ST) e disco solar parabólico (PD)
- Focagem de linha: Composta por calha solar parabólica (PT) e Concentrador linear Fresnel (LF)

Essas tecnologias heliotérmicas também são chamadas comercialmente de *Concentrated Solar Power* (CSP) (PRADO, 2014). As energias heliotérmicas ainda não têm participação na Matriz Energética Brasileira (BEN, 2017), pois seu funcionamento em solo brasileiro está restrito a apenas âmbito experimental em centros de pesquisa.

2.12.1. Geração solar por torre central

A usina solar de torre central é formada por um campo de espelhos de grandes dimensões, distribuídos no terreno, de forma circular ou semicircular, chamados de heliostatos (OLIVEIRA, 2014). Os heliostatos são compostos por uma superfície refletora, um suporte estrutural e um mecanismo de rastreamento solar automatizado. São fixados em um poste e se movimentam por dois eixos de forma individual, concentrando a radiação solar em um receptor central, localizado no centro do campo e no topo de uma torre metálica. Esse sistema é o bloco de geração solar (MARANHÃO, 2015). A sequência de geração pode ser observada na Figura 37.

Figura 35: Esquema de usina solar de torre central



Fonte: (SILVESTRE, 2016) e (NREL, 2016)

No interior do receptor, concentra-se a radiação solar na superfície onde se encontra o trocador de calor acoplado, por onde passa o fluido de transferência de calor, tipicamente sal fundido, em seus tubos, aquecendo-os por volta de 565 °C. O HTF é bombeado para o tanque de estoque de calor a quente. Em seguida, a água passa por um trocador de calor que já recebeu energia do tanque de estoque de calor, esquentando a água e gerando o vapor, retornando para o tanque de estocagem a frio, para finalmente retornar ao receptor para novo aquecimento (NREL, 2016).

Quando a geração de energia elétrica é necessária, o sal fundido quente é bombeado para o trocador de calor, produzindo vapor superaquecido com pressão entre 100 e 150 bar e com temperatura de até 540 °C. Depois desse processo, a energia elétrica é gerada, assim como nas termoelétricas, utilizando-se o ciclo Rankine, com uso do vapor superaquecido em turbogerador, que gera potência elétrica a partir de potência mecânica, que passa por uma subestação e é injetada na rede elétrica (NREL, 2016).

A usina de referência para tecnologia solar por torre central é a *Ivanpah Solar Electric Generating System* (NREL, 2016), a maior usina do tipo no mundo, localizada no deserto de Mojave, na Califórnia, nos EUA, com 177 mil espelhos de 15 m² (ASME, 2013) e geração total de 377 MW (NREL, 2017). Ela utiliza três torres de geração de 129 m de altura, instaladas em uma área de 2,600,000 m² e com capacidade de abastecer 140 mil residências (EXAME, 2014). Uma foto aérea pode ser vista na Figura 38.

Figura 36: *Ivanpah Solar Electric Generating System*



Fonte: (THE WALL STREET JOURNAL, 2016)

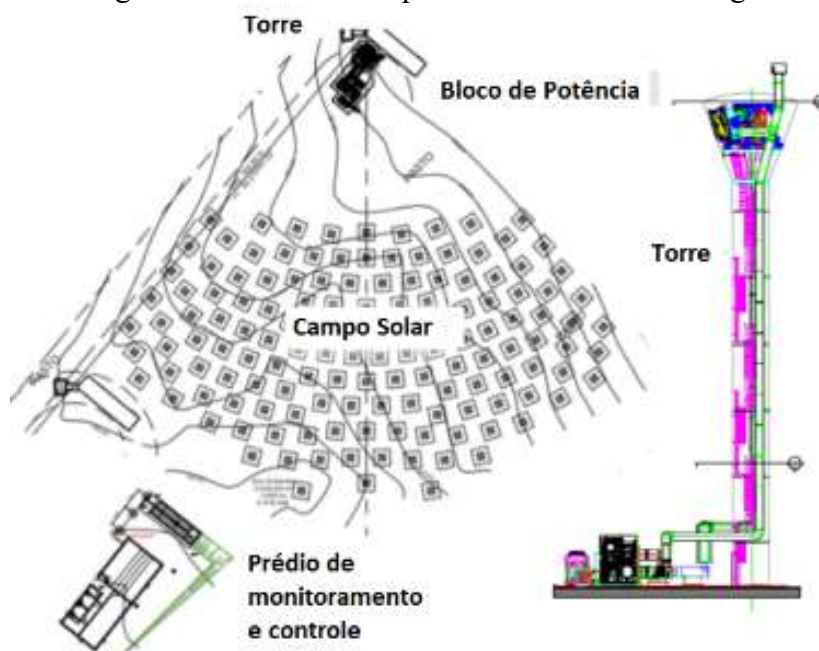
O Brasil começa a ter iniciativas em termos de desenvolvimento para montagem e operação de usinas pilotos para geração de energia elétrica. No simpósio de geração de energia elétrica solar, promovido pelo departamento de energia do ITA (ITA, 2017), foi possível levantar três instalações em fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para torre central no Brasil.

A primeira iniciativa é o grupo *SMILE* com utilização de microturbogeneradores, geração solar híbrida e cogeração de eletricidade e calor para o setor agroindustrial, onde participam a USP/FZEA divisão *GREEN* (grupo de pesquisa em reciclagem, eficiência energética e simulação numérica) de Pirassununga, com projeto na região Sudeste, e a empresa *SOLINOVA*, com projeto na região Nordeste, sendo ambas apoiadas institucionalmente pela DLR (Centro Aeroespacial Alemão) e financiadas pelo BNDES (OLIVEIRA, 2017).

O *SMILE* tem como principal objetivo desenvolver e formar uma cadeia de fornecedores nacionais para a tecnologia solar heliotérmica, desenvolver a capacidade da força de trabalho para construir e operar usinas de torre central. Esse projeto tem como premissas: gerar um modelo de desenvolvimento econômico, utilizar energia solar como vetor estratégico, estudar a viabilidade da introdução da energia solar na matriz energética do Brasil e estabelecer uma estrutura para apoiar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação na área de energia solar de alta temperatura.

Uma das usinas piloto que será uma torre central heliotérmica, com armazenamento térmico e hibridizada com biodiesel, integrado ao matadouro da FZEA, no campus de Pirassununga da USP. Tem como requisitos de projeto área de um hectare, potência elétrica de 70 kW, característica de cogeração para garantir o fornecimento de energia durante os períodos com falta de Sol, 144 heliostatos de 9 m² e torre central de 34 m de altura, conforme apresentado na Figura 39 (OLIVEIRA, 2017).

Figura 37: Estudo usina piloto da USP Pirassununga

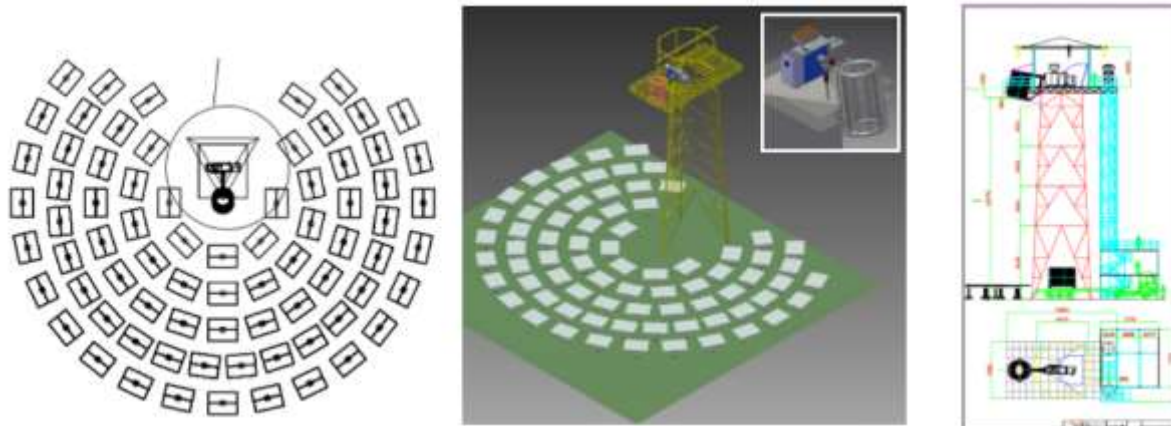


Fonte: ITA, 2017

A segunda usina piloto da *SMILE* será construída na cidade de Caiçara do Rio do Vento, no estado do Rio Grande do Norte. Será uma planta comercial de propriedade da SOLINOVA, empresa nascida na USP, em 2008, para desenvolver tecnologia nacional de geração hibridizada, de energia elétrica e térmica em alta temperatura. A planta que está em

desenvolvimento ocupará um hectare, será composta de 75 heliostatos (ENERGIAHELIO TéRMICA, 2016), conforme apresentado na Figura 40.

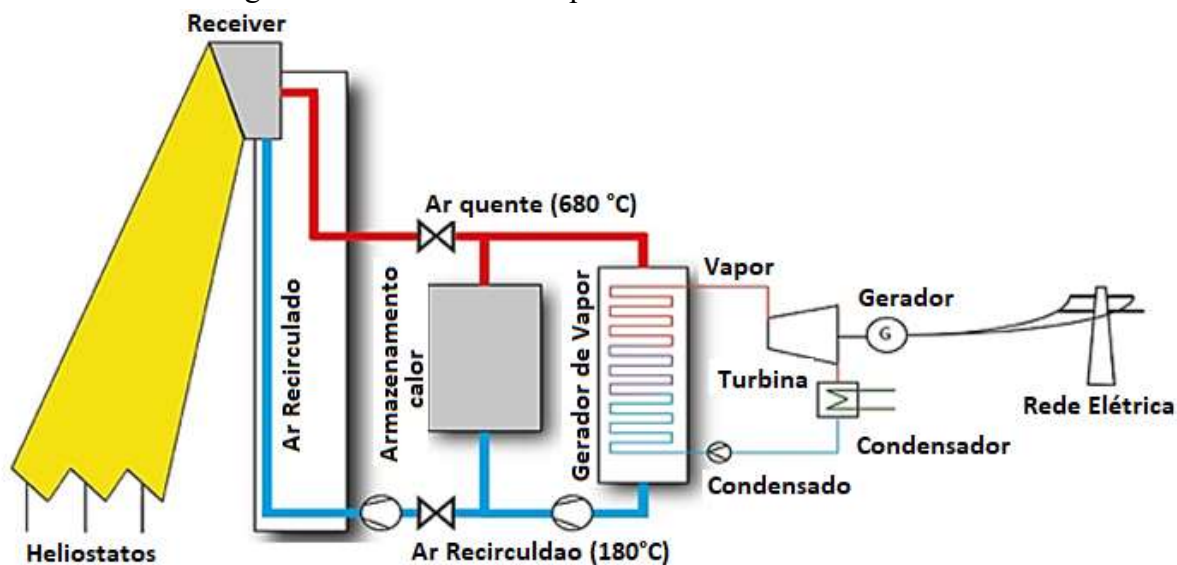
Figura 38: Estudo usina piloto da SOLINOVA no Rio Grande do Norte



Fonte: (OLIVEIRA, 2017)

A terceira iniciativa para geração por torre central no Brasil é o projeto piloto da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC) e com o Instituto Solar de *Jülich* (SIJ), da Alemanha, que será instalado no município de Petrolina, no estado de Pernambuco, chamado Projeto Torre Central 1. São esperados investimentos no valor de R\$ 45 milhões, contemplados pelo programa de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da CHESF (EBC, 2017). O esquema da CHESF está sendo apresentado na Figura 41.

Figura 39: Estudo da usina piloto Torre Solar 1 da CHESF



Fonte: (CHESF, 2017)

O projeto foi concebido pelo laboratório de energia solar e gás natural da UFC e utiliza tecnologia alemã desenvolvida pela empresa *Kraftanlagen München GmbH*, com previsão de término em 2021. A usina piloto, a ser instalada na cidade pernambucana de Petrolina, tem potência térmica de 1 MW e elétrica de 250 kW. O sistema conta com armazenamento térmico, que, a plena carga, funciona 6 h em modo paralelo e 14 h em modo sequencial; é constituída com 1.600 heliostatos de 14,27 m² em uma área total de 22.832 m² (CHESF, 2017).

Conforme apresentação da CHESF, representada pelo gerente geral da usina Torre Central 1, Alcides Codeceira Neto, em simpósio no ITA, os propósitos de P&D são:

“...Projeto é pesquisar e facilitar a inserção da geração heliotérmica na matriz energética brasileira, viabilizar economicamente a produção, instalação e monitoramento da geração heliotérmica para injeção de energia elétrica nos sistemas de distribuição e transmissão, incentivar o desenvolvimento no país de toda a cadeia produtiva da indústria, heliotérmica com a nacionalização da tecnologia empregada. Fomentar o treinamento e a capacitação de técnicos especializados neste tema em universidades, escolas técnicas e empresas, propiciar a capacitação laboratorial em universidades, escolas técnicas e empresas nacionais, com relevâncias de identificar possibilidades de otimização dos recursos energéticos, considerando o planejamento integrado dos recursos e a identificação de complementaridade entre uma usina heliotérmica com armazenamento e usinas com geração intermitente/variável. Estimular a redução de custos da geração heliotérmica com vistas a promover a sua competição com as demais fontes de energia, propor e justificar aperfeiçoamentos regulatórios e/ou desoneramentos tributários que favoreçam a viabilidade econômica da geração heliotérmica, assim como o aumento da segurança e da confiabilidade do suprimento de energia” (CODECEIRA, 2017).

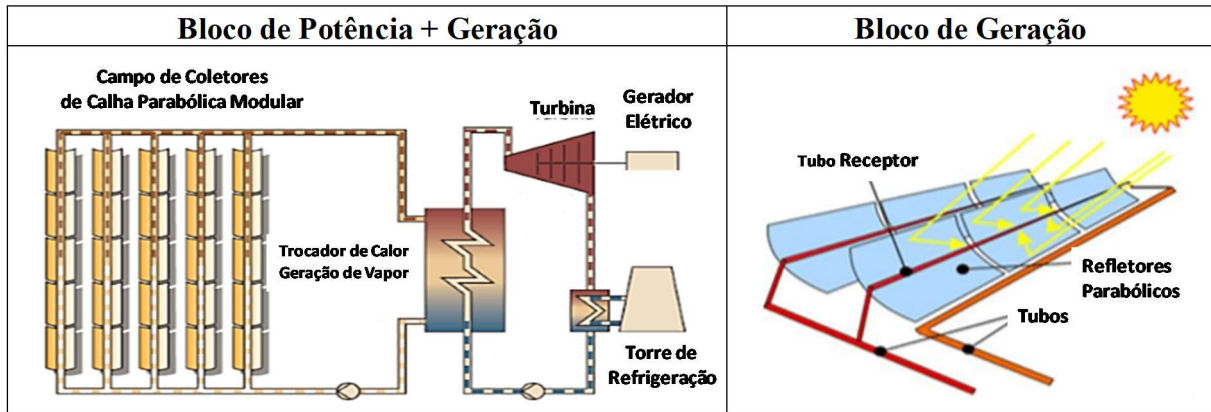
2.12.2. A Geração solar por calha parabólica

A usina solar heliotérmica por calha parabólica, utiliza espelhos refletores com forma de parábola, concentrando a radiação em um tubo receptor termicamente eficiente, situado na linha focal da concentração da radiação solar. Esse grupo de espelhos é disposto em 100 m de comprimento ou mais, com módulos entre 5 e 6 m, instalados seguindo a maior irradiação possível, por meio da utilização de sistema de rastreamento solar automático de um eixo (MARANHÃO, 2015).

O receptor, que recebe a radiação solar refletida pelos espelhos parabólicos, é formado por um tubo de vidro situado no foco da parábola e por um tubo de vidro concêntrico externo,

sendo preenchido com pressão negativa, para redução de perdas de calor para a atmosfera (NREL, 2017a). A Figura 42 exemplifica o processo de geração de energia por calha solar parabólica, apresentando os blocos de geração e de potência.

Figura 40: Esquema de usina solar por calha parabólica



Fonte: (SILVESTRE, 2016) e (NREL, 2016)

Para deslocamento do calor gerado para o bloco de geração, é utilizado um fluido de transferência de calor (HTF), sendo geralmente um óleo sintético ou uma mistura de sal fundido, que circula dentro do tubo do receptor. Usinas solares heliotérmicas por calha parabólica têm funcionamento similar às de torre central, sendo o fluido de transferência de calor aquecido dentro dos tubos receptores e transportado até os tanques de armazenagem, que têm um trocador de calor (gerador de vapor) anexo. Esse sistema chama-se bloco de geração (NREL, 2017a).

Em seguida, o fluido troca calor, transferindo-o para a água em um gerador de vapor superaquecido de alta pressão, tipicamente de 100 bar a 370 °C (NREL, 2016). Esse vapor é injetado em um turbogerador, que converte a potência de eixo em potência elétrica, que passa por uma subestação para, em seguida, ser injetada na rede elétrica. Após a utilização no turbogerador, o vapor remanescente é resfriado em torres de refrigeração, retornando ao bloco de geração, para em seguida ser inserido em um novo ciclo fechado do tipo Rankine. Esse sistema é chamado de bloco de potência (CARVALHO, 2016).

Atualmente, o Brasil não emprega usinas solares comerciais do tipo calha parabólica, conforme levantado no Banco de Informações de Geração (BIG) (ANEEL, 2018). A usina de referência para esse tipo de tecnologia é a de *Solana Generation Station*, no Arizona (NREL, 2016), sendo, hoje, a maior planta do mundo, com capacidade bruta de 280 MW, com seis horas de armazenamento térmico para geração noturna e fornecimento de energia para 70.000 casas.

Figura 41: Usina heliotérmica de referência Solana, no Arizona



Fonte: (CLEANTECH, 2018)

Porém, uma iniciativa interessante na geração heliotérmica no Brasil é o projeto de pesquisa e desenvolvimento ANEEL, da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), por iniciativa do Laboratório Solar Térmico, que foi implementado como resultado do projeto de pesquisa “Sistema Híbrido Solar Biomassa - SHSB”, financiado pela Companhia Piratininga de Força e Luz, pela Companhia Paulista de Força e Luz e pela Rio Grande Energia (HLT, 2018). O sistema básico pode ser visto na Figura 44.

Figura 42: Calha solar parabólica da UNIFEI



Fonte: (HLT, 2018)

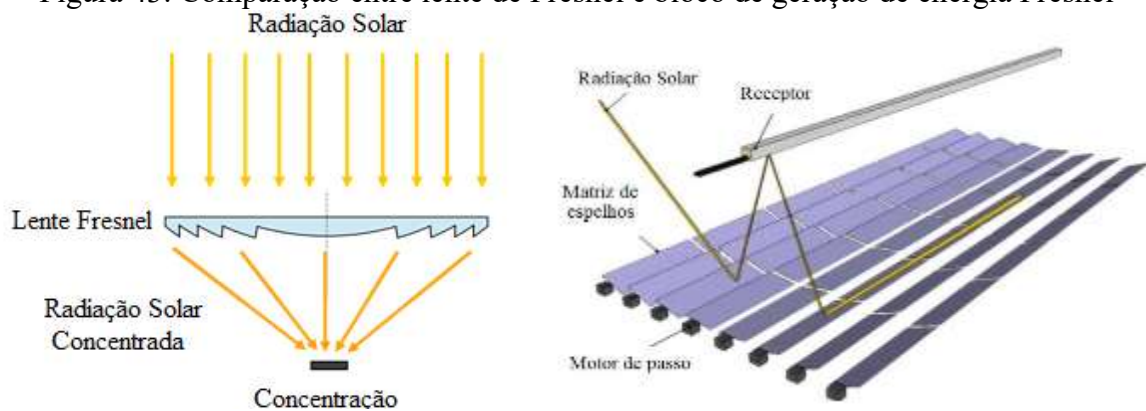
A usina piloto de calha solar parabólica conta com quatro módulos de concentradores com potência de 5 kW. Pelos coletores, circula água aquecida até 160 °C, com uma pressão de 6 bar, através de ciclo orgânico de Rankine (HLT, 2018). Os dois discos solares parabólicos com motor Stirling têm 1 kW_{el} de potência cada e um coletor de 3,7 m de diâmetro, com uma potência máxima de 900 W_e. A temperatura no receptor onde se concentra a radiação solar é de 500 °C e a eficiência de conversão da energia solar em eletricidade é de 17 %.

2.12.3. A Geração por refletores solar linear fresnel

Esse tipo de geração utiliza espelhos planos e lineares para formar, em conjunto, uma “lente” tipo Fresnel, dispostos em filas. Esses refletores, chamados de matriz de espelhos, direcionam a radiação solar para um tubo receptor situado no foco. Assim como no sistema de geração de calha parabólica, ele forma campos desses conjuntos (BOHRER, 2016).

A Figura 45 apresenta uma comparação entre a lente de cristal inventada por Fresnel, utilizada em máquinas fotográficas e o sistema concentrador de usinas de geração de energia elétrica.

Figura 43: Comparação entre lente de Fresnel e bloco de geração de energia Fresnel



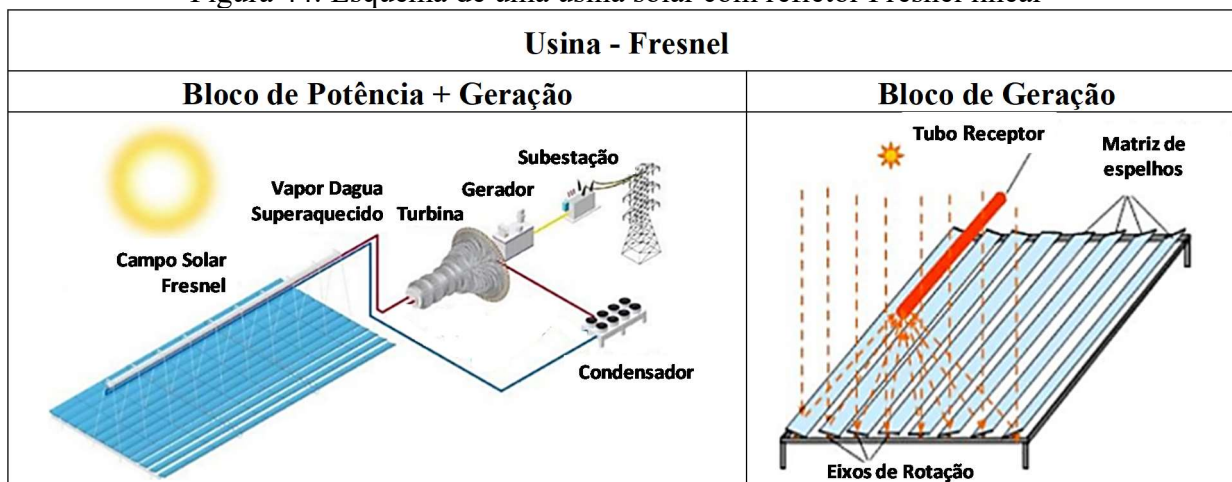
Fonte: (BOHRER, 2016)

Os tubos receptores montados fixos à estrutura não permitem passagem de radiação solar, de forma que os raios solares refletidos pelos espelhos entrem somente pela abertura própria. Os espelhos refletores têm movimentação em apenas um eixo com ângulo de inclinação variável, acompanhando de forma automática. Os campos de refletores Fresnel linear ocupam o equivalente a apenas 2/3 da área necessária pelas estruturas dos sistemas de calha solar parabólica para a mesma potência gerada, já que as linhas de refletores não fazem sombreamento umas nas outras (MARANHÃO, 2015).

O funcionamento de usinas com refletores Fresnel linear é semelhante ao funcionamento das heliotérmicas do tipo calha solar parabólica. O fluido de trabalho desse sistema é geralmente água, que recebe calor dos refletores e vaporiza-se em até 380 °C. O vapor aciona o conjunto turbogerador, disponibilizando energia elétrica para a rede elétrica. Os vapores de saída da turbina são, então, condensados e redirecionados para os refletores, iniciando um novo ciclo para geração de energia elétrica (NREL, 2016).

A Figura 3 apresenta, de forma simplificada, o processo de geração de energia elétrica por usina solar Fresnel linear.

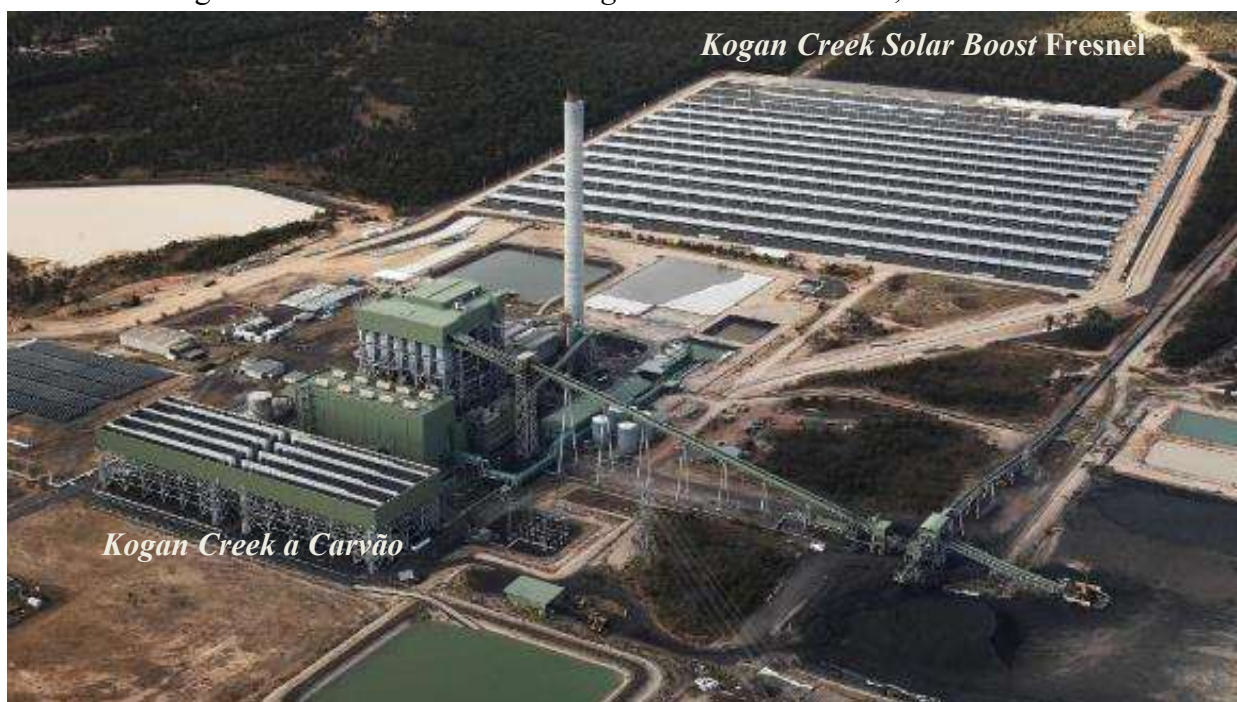
Figura 44: Esquema de uma usina solar com refletor Fresnel linear



Fonte: (SILVESTRE, 2016) e (NREL, 2016)

A usina de referência para tecnologia solar com refletor Fresnel linear é a *Kogan Creek Solar Boost*, que é a maior geração híbrida de uma usina solar heliotérmica Fresnel linear com uma usina termoeétrica a carvão no mundo.

Figura 45: Usina de referência *Kogan Creek Solar Boost*, na Austrália



Fonte: CSEnergy, 2018

O sistema consiste em um aumento da capacidade térmica da usina termoeétrica existente em *Kogan Creek*, utilizando calor de irradiação solar originada por concentradores Fresnel, de forma híbrida, o que aumenta a geração de energia elétrica e o rendimento da planta. A adição solar permite que a estação de 750 MW de potência, já uma das mais eficientes centrais de

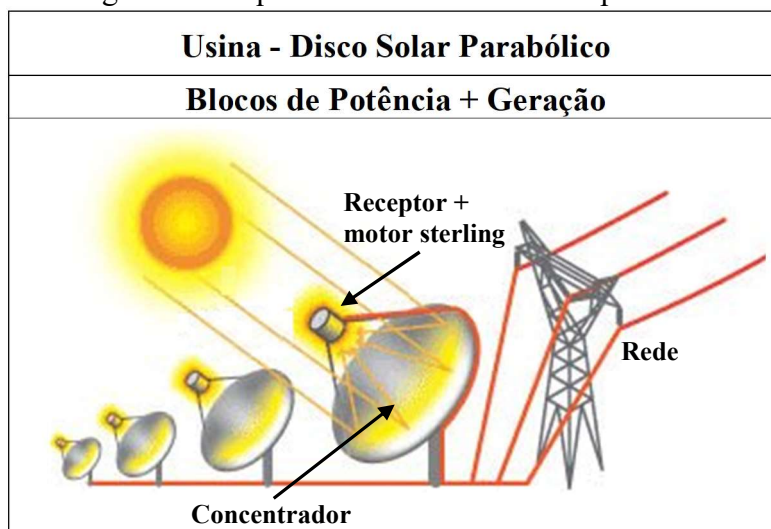
carvão e a maior unidade da Austrália, produzir mais eletricidade, com a mesma quantidade de carvão. Essa geração ajuda a evitar a emissão de 35.600 t de dióxido de carbono por ano, o equivalente a tomar 11 mil carros da estrada. *Kogan Creek Solar Boost* possui uma capacidade bruta de 44 MW e tem 14 linhas de 36 m de largura com 500 m de comprimento (NREL, 2016).

2.12.4. A Geração por disco solar parabólico

Sistemas de geração por disco solar parabólico utilizam um disco espelhado, semelhante a uma antena parabólica de grandes dimensões, como concentrador solar. A superfície parabólica direciona e concentra a luz solar em um receptor térmico, que absorve e coleta o calor, em seguida transferindo-o, em geral, para um conjunto motor-gerador. O tipo mais comum de motor térmico utilizado é o motor Stirling. De forma simplificada, esse sistema utiliza o fluido aquecido pelo receptor para mover seus pistões e criar energia mecânica, que impulsiona um gerador ou alternador para gerar eletricidade (EIA, 2018).

Esses sistemas sempre apontam diretamente para o sol e concentram sua energia no ponto focal do disco, sempre de forma a rastreá-lo em dois eixos de movimento. A razão da concentração solar em um disco solar parabólico é muito maior do que outros sistemas de concentração, como torre solar central e calha solar parabólica, e tem uma temperatura de fluido HTF maior que 750 °C. Esse tipo de sistema de geração de energia é adequado para locais remotos (EIA, 2018). O esquema de geração elétrica básica está apresentado na Figura 48.

Figura 46: Esquema de usina disco solar parabólico



Fonte: (UNITED STATES OF AMERICA, 2013)

São poucas as usinas por disco solar parabólico em operação no mundo (NREL, 2017). Uma usina de referência para tecnologia de geração elétrica por disco parabólico com motor

Stirling é a de Maricopa, em Peoria, no deserto do Arizona. Ela foi a primeira usina solar do tipo construída para operar em escala comercial, mas infelizmente foi discomissionada em 2011 (NREL, 2018a). Tem sessenta discos parabólicos de 1,5 MW, com capacidade de 3.300.000 kWh por ano e começou a operar em 2010. A Figura 49 apresenta vista da usina de Maricopa e seu campo de discos solares (TESSERA SOLAR, 2010).

Figura 47: Usina por disco parabólico com motor Stirling de Maricopa



Fonte: (TESSERA SOLAR, 2010)

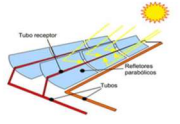
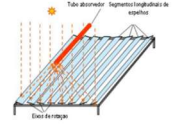
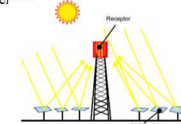
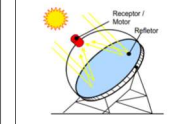
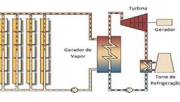
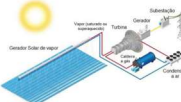

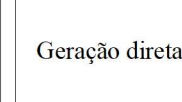
2.12.5. Comparação entre tipos de usinas heliotérmicas

Este item tem a intenção de realizar uma comparação básica entre as tecnologias heliotérmicas de usinas comerciais em operação no mundo. A partir desta informação, fica simples de entender quais as tecnologias mais aplicáveis ao tipo de empreendimento heliotérmico que se pretende implementar.

Na Tabela 13 apresenta-se o comparativo entre as principais tecnologias heliotérmicas no mundo, destacando as suas principais características técnicas, de forma resumida (PATEL, 2013), o consumo de água de refrigeração (HELIOCSP, 2016) e a quantidade de usinas (NREL, 2018a).

Apesar do concentrador solar parabólico com motor Stirling ainda não ter atingido maturidade suficiente para o uso comercial em geração de energia elétrica (ABENGOA, 2015), ele será aprofundado nesta dissertação, pois tem alto potencial de desenvolvimento e de aplicação futura.

Tabela 13: Comparativo de tecnologias heliotérmicas

	Calha solar parabólica	Linear solar Frenel	Torre solar central	Disco solar parabólico
Concentração solar Bloco de geração				
Bloco de potência + geração				
Capacidade típica	100-300 MW	10-200 MW	10-200 MW	0,01-0,025 MW
Receptor	Móvel	Móvel	Fixo	Fixo
Temperatura fluido de transferência de calor	350-450 °C	390 °C	250-565 °C	550-750 °C
Eficiência de pico da usina	14-20 %	18%	25-35%	30%
Eficiência anual de solar para eletricidade	15-16 %	8-10%	15-17%	12-25%
Razão de concentração solar	70- 80 %	aprx. 60 %	1000 % ou mais	1300% ou mais
Consumo de água refrigeração seco/molhada m ³ /MWh ¹	0,294/3,0	3,7 (Somente molhada)	3,4/2,8	0,05/0,1
Área (ha) ocupada para 1000 Mwe ³	3845	1902	4047	4047
Tempo de geração por ano (h)	6570	3285	6570	3285
Tempo de geração por ano (meses)	9	4,6	9	4,6
Ciclo de geração	Rankine Sp/ Bryton	Rankine St	Rankine Sp	Stirling/ Bryton
Estoque de Calor	Media alta	Não aplicável	Alta	Não aplicável
Declividade do terreno	< 1-2%	< 4%	< 2-4%	10 % ou mais
Usina de referência	Mojave Solar (EUA) Project - 2015	Kogan Creek (AU) Solar Boost -2016	Ivanpah Solar (EUA) Electric Generating System -2014	Maricopa Solar (EUA) Project -2011
Quantidade de usinas ²	96	15	32	2

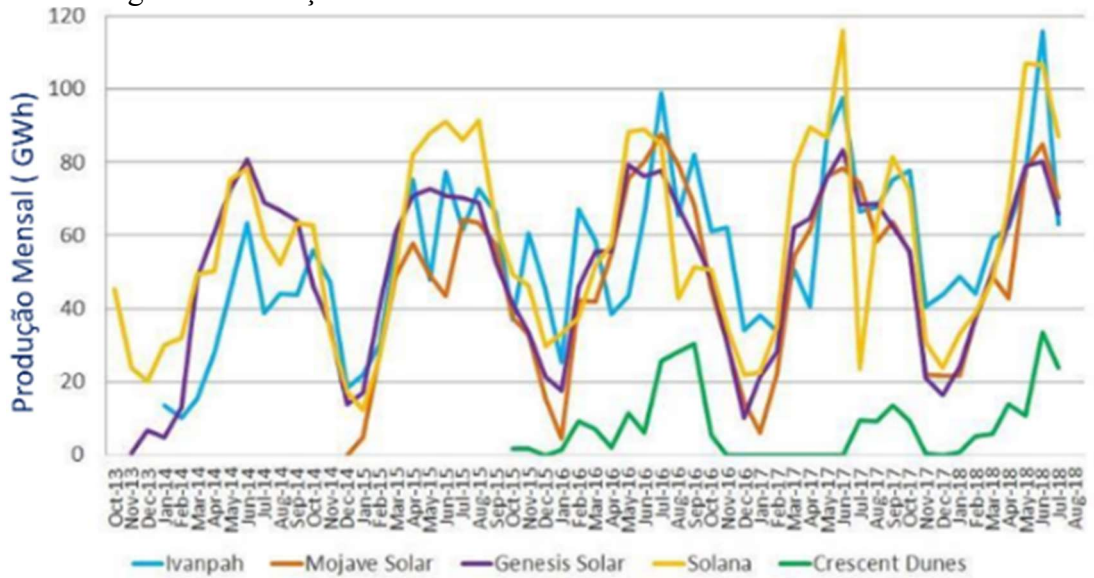
Fonte: (PATEL, 2013), 1- (HELIOCSP, 2016), 2- (NREL, 2018a), 3- (NREL, 2013)

Nota: Para cálculo do tempo de geração anual em horas foi utilizado o valor de disponibilidade solar de nove horas por dia, conforme Figura 33, em área de irradiação ótima da região do semiárido nordestino, conforme Figura 32, ambas para as gerações com refletor Fresnel linear e com disco solar parabólico, que, normalmente, não têm sistema de armazenamento e, portanto, são diurnas. Para as demais foi adotado o dobro devido à presença de sistema de armazenamnto, ou seja, de dezoito horas para cálculo.

2.13. Geração de Usinas Heliotérmicas nos Estados Unidos e Espanha

A evolução da geração mensal de eletricidade por usinas heliotérmicas nos Estados Unidos é apresentada na Figura 50.

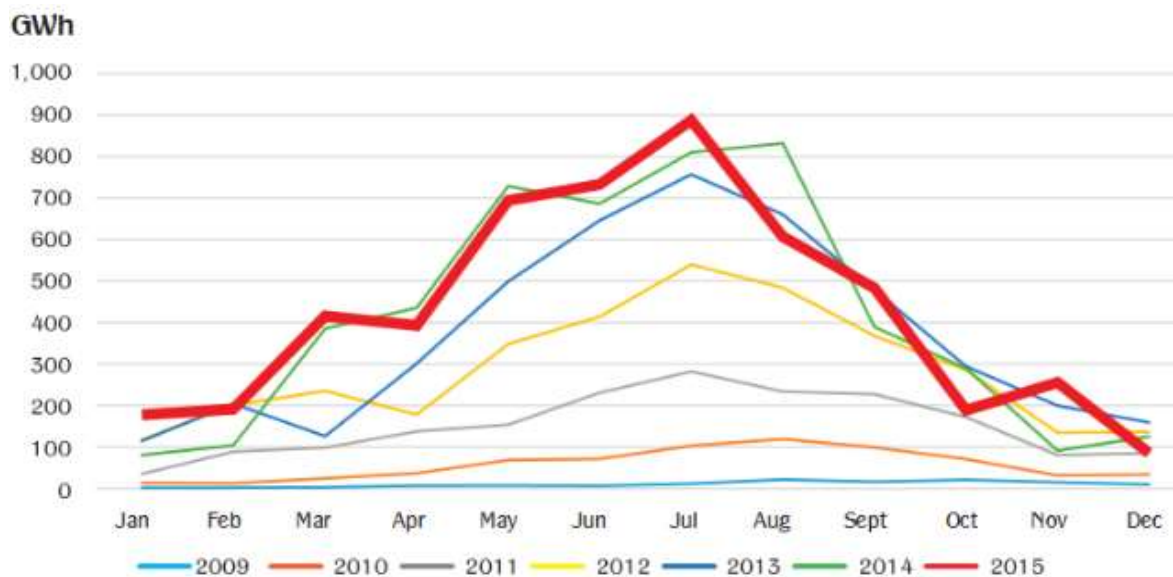
Figura 48: Geração mensal de usinas heliotérmicas nos Estados Unidos



Fonte: (CSPPLAZA, 2016)

É possível observar o crescimento médio das principais usinas solares heliotérmicas americanas e espanholas com o passar dos anos. Também, é possível notar os efeitos de sazonalidade da geração desse tipo de tecnologia no hemisfério norte, onde, nos meses de inverno, existe uma clara baixa de geração elétrica devido à redução de irradiação solar (CSP PLAZA, 2018)

Figura 49: Geração mensal de usinas heliotérmicas na Espanha



Fonte: (GREENPEACE, 2016)

2.14. Tipos de Armazenamento para Energias Renováveis

Na geração de energia, existe a necessidade de operar com estoques, para estabilizar a produção em função da carga de consumo variável do cliente final (SUBERU, 2014). No caso da energia hidroelétrica, isso é executado, tradicionalmente, via energia potencial, em função da profundidade útil dos reservatórios de água. A importância dos sistemas de armazenamento de energia está aumentando devido à quarta transição energética e ao uso de energias renováveis (PERKINS J, 2017). Três tipos básicos de estoque de energia são utilizados:

- Químico (baterias);
- Geração de calor (armazenagem em tanques);
- Elétrico (capacitores).

Na geração tradicional de energia, a produção precisa ser consumida imediatamente, caso contrário acontecerão desperdícios, o que pode resultar em fracasso econômico na operação da empresa de energia. Além disso, na geração de energias renováveis intermitentes, como a eólica e a solar (independentemente da tecnologia aplicada), torna necessário o uso de sistemas de armazenamento de energia (SUBERU, 2014).

Isso, para não se perder parte da geração, devido à produção intermitente e ao provável aumento de demanda em horários de pico, onde se deve ter sempre disponível a energia elétrica de forma estável, sendo a geração normalmente à noite. Para o caso da geração de energia elétrica, a literatura nos apresenta que é possível utilizar várias tecnologias de armazenamento (SUBERU, 2014):

- Mecânico: por compressão de ar, por bombeamento de água, por roda de inércia;
- Armazenamento de calor: por mistura de sal fundido e partículas sólidas (concreto);
- Armazenamento químico: bateria de chumbo ácido, sódio sulfúrico, bateria de fluxo, níquel cádmio e metal híbrido, íon lítio e por fim as células a combustível.

2.14.1. Banco de baterias

Em usinas de geração de energia elétrica renovável, as aplicações de armazenamento químico via bateria e armazenamento de calor com fluido de transferência de calor em tanques apropriados são as tecnologias mais difundidas (NREL, 2016). A Tabela 14 apresenta as tecnologias utilizadas comercialmente em baterias aplicadas, principalmente, na geração fotovoltaica e suas principais características com foco na melhoria da intermitência durante a geração. Na Figura 52 são apresentados os sistemas de armazenamento de eletricidade por baterias.

Tabela 14: Tipos de tecnologias de baterias comerciais para armazenamento de eletricidade

Tipo	Capacidade	Localização	Comentários
Chumbo ácido, a seco	10 MW/ 40 MWh	Califórnia-Chino Nivelamento de carga	$\eta = 72-78 \%$, custo 50-150*, vida útil 1.000-2.000 ciclos com 70 % de profundidade de descarga, temperatura de operação de 5 a 40 °C, 25 Wh/kg, autodescarga de 2-5 % ao mês, manutenção frequente para substituir a água perdida em operação, pesada.
Chumbo ácido, válvula reguladora	300 kW/ 580 KWh	Turquia Systemb Nivelamento de carga	$\eta = 72-78 \%$, custo 50-150*, vida útil 200-300 ciclos com 80 % de profundidade de descarga, temperatura de operação de 5 a 40 °C, 30-50 Wh/kg, autodescarga 2-5 % ao mês, menos manutenção, robusta e negligenciável, mais móvel, seguro (em comparação com o tipo de fluxo).
Níquel cádmio (NiCd)	27 MW/ 6,75 MWh	GVEA Alaska Compensação da variação de potência	$\eta = 72-78 \%$, custo 200-600*, tempo de vida 3.000 ciclos a 100 % de profundidade de descarga, temperatura de operação de 40 a 50 °C, 45-80 Wh/kg, autodescarga 5-20 % ao mês, alta taxa de descarga, manutenção negligenciável, as células NiCd são venenosas e pesadas.
Enxofre de sódio (NaS)	9,6 MW / 64 MWh	Tóquio, Japão Nivelamento de carga	$\eta = 89 \%$ a 325 °C, vida útil 2.500 ciclos a 100 % de profundidade de descarga, temperatura máxima de operação 325 °C, 100 Wh/kg, sem autodescarga, devido à alta temperatura de operação, ela deve ser aquecida no modo de espera e isso reduz sua eficiência global com capacidade de poder de pulso de mais de seis vezes por 30 s.
Íon lítio	-	-	$\eta \sim 100 \%$, custo 700-1.000*, vida útil 3.000 ciclos com 80 % de profundidade de descarga, temperatura de operação de 30 a 60 °C, 90-190 Wh/kg, autodescarga 1 % ao mês, alto custo devido às embalagens especiais e proteção interna de sobrecarga.
Vanádio redox (VRB)	1,5 MW/1,5 MWh	Japan Voltage Proteção do pico de carga	$\eta = 85 \%$, custo 360-1.000*, vida útil 10.000 ciclos com 75 % de profundidade de descarga, temperatura de operação de 0-40 °C, 30-50 Wh/kg, autodescarga insignificante.
Brometo de zinco	1 MW/4 MWh	Kyushu EPC	$\eta = 75 \%$, custo 360-1.000*, temperatura de operação de 0-40 °C, 70 Wh/kg, autodescarga insignificante, baixa potência, volumoso, componente perigoso.

Fonte: (SUBERU, 2014) * Custo de capital em Euro / kWh.

Figura 50: Sistema de armazenamento de eletricidade por baterias



Fonte: (SANDIA, 2015)

2.14.2. Banco de capacitores

A geração a partir de energias renováveis é normalmente flutuante devido à intermitência da fonte. Um armazenamento de energia possível para compensar essa flutuação pode ser o de capacitor. Esses dispositivos eletrônicos convertem a potência útil para a compensação de potência flutuante, uma vez que é capaz de controlar a potência ativa e reativa simultaneamente. Um exemplo de aplicação é em aerogeradores (KINJO, 2006).

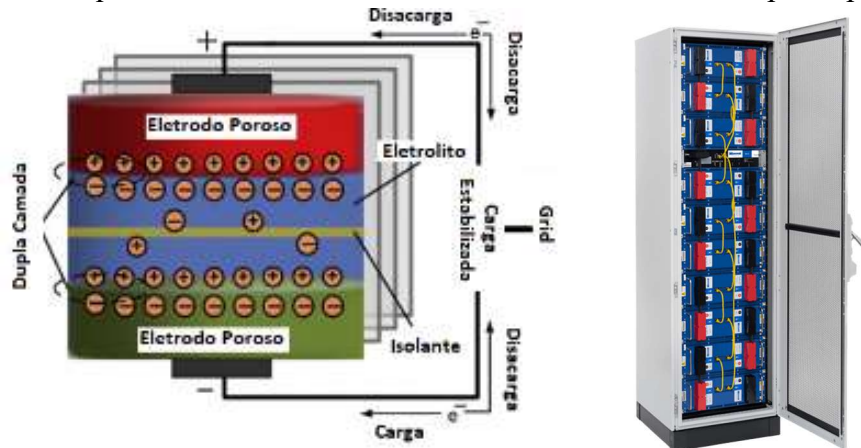
Um capacitor é composto de pelo menos dois condutores elétricos tipicamente constituídos de chapas metálicas e separados por uma fina camada de isolante, normalmente de cerâmica, vidro ou filme plástico. Quando um capacitor é carregado, a energia é armazenada no material dielétrico em um campo eletrostático (ZUBIETA, 2000). Sua tensão operacional máxima depende das características de ruptura do material dielétrico.

Capacitores são apropriados para armazenar pequenas quantidades de energia elétrica e conduzir uma tensão variável, ou seja, a intermitência. Eles têm uma maior densidade de potência e menor tempo de carregamento em comparação com as baterias convencionais. No entanto, eles têm capacidade limitada, densidade de energia relativamente baixa e alta dissipação de energia devido às altas perdas de autodescarga. De acordo com essas características, os capacitores podem ser usados para algumas aplicações de qualidade de energia, como correção de energia de alta tensão, suavização da saída de fontes de alimentação, ponte e recuperação de energia em sistemas de transporte de massa (XING, 2015).

Os supercapacitores, também denominados capacitores de camada dupla elétrica ou ultracapacitores, contêm dois eletrodos condutores, um eletrólito e um separador de membrana porosa apresentado na Figura 53. Devido à sua estrutura, os supercapacitores podem ter as características dos capacitores tradicionais e das baterias eletroquímicas. A energia é

armazenada na forma de carga estática nas superfícies entre o eletrólito e os dois eletrodos condutores (WINTER, 2004).

Figura 51: Esquema de sistema de armazenamento de eletricidade por capacitores



Fonte: (a) (XING, 2015) e (b) (MAXWELL, 2018)

Os supercapacitores com alto desempenho são baseados em nanomateriais para aumentar a área de superfície do eletrodo para aumentar a capacitância. As densidades de energia dos supercapacitores estão entre as densidades das baterias recarregáveis e dos capacitores tradicionais (SHARMA, 2010). As características mais importantes dos supercapacitores são seus longos tempos de ciclo, no entanto, a razão diária de autodescarga dos supercapacitores é alta, de 5 a 40 %, e o custo de capital também é alto, acima de 6.000 US\$/kWh (XING, 2015).

A Tabela 15 apresenta a aplicação de supercapacitores em usinas de geração de energia elétrica por fonte renovável no mundo.

Tabela 15: Sistemas de armazenagem de energia por supercapacitores no mundo

Localização	Dados	Características
Prova de conceito, ensaiado na rede alemã	5 KJ, 2 s to max 100 A a 25 K	Utilização em HTS- sistema de armazenamento de energia magnética supercondutora
Usina <i>Nosoo</i> no Japão	10 MW	Melhoria a estabilidade do sistema e da qualidade da energia gerada
<i>Wisconsin</i> pela <i>American Transmission</i>	3 MW/0.83 kWh cada 8 MV A	Aplicação em energia reativa e qualidade de energia gerada
<i>Bruker EST</i> na Alemanha	2 MJ	Supercondutores de alta temperatura
<i>Korea Electric Power Corporation, Hyundai</i>	3 MJ, 750 kV A	Melhoria da sensibilidade de cargas para fornecimento a linha
<i>Chubu Electric Power Co.</i> no Japão	7.3 MJ/5 MW e 1 MJ	Fornecer comparação para tensão transitória
<i>University of Houston</i>	20 kW, até classe 2 MJ	UHF-SMES Armazenamento de energia magnética supercondutora. Distribuição de tensão

Fonte: (XING, 2015)

Assim, os supercapacitores são adequados para aplicações de armazenamento de curto prazo, mas não para armazenamento de larga escala e a longo prazo. As aplicações típicas de qualidade de energia consistem em energia de pulso, conexão de energia/equipamento de elevação, podendo ser aplicado na geração eólica, por exemplo (XING, 2015).

2.14.3. Sistema de armazenamento de calor e sal fundido

Outra forma comercial para estoque de energia é por armazenamento de calor em tanques, método que é aplicado principalmente na geração heliotérmica. A Tabela 16 apresenta as tecnologias comerciais da atualidade dessa aplicação com os diferentes exemplos de fluidos de transferência de calor (HTF), por sais fundidos, utilizados para estoque e transferência de calor em sistemas em blocos de geração de usinas solares heliotérmicas (MING, 2016).

Tabela 16: Propriedades e custos para três sais fundidos comerciais diferentes e VP-1

Sal fundido	Composição (% de mistura)	Ponto de fusão (°C)	Max. temp. opera. (°C)	Custo US\$/kg	Custo (US\$/kWh)
Solar Salt	NaNO ₃ -KNO ₃ (60-40)	220	585	0,49	5,8 (ΔT = 200 K)
Hitec	NaNO ₃ -KNO ₃ - NaNO ₂ (7-53- 40)	142	450-538 610-710 sob pressão	0,93	10,7 (ΔT = 200 K)
Hitec XL	NaNO ₃ -KNO ₃ - Ca (NO ₃) (7- 45-48)	120	480-505	1,43	18,2 (ΔT = 200 K)
Therminol VP-1	-	-	400	3,96	57,5 (ΔT = 100 K)

Fonte: MING, 2014

Para novos desenvolvimentos em fluidos de transferência de calor, a NREL apresentou comparação entre o *Solar Salt* que opera por volta de 600 °C e novas misturas de sal fundido para altas temperaturas, em 2017, com possibilidades promissoras de geração até 900 °C.

As novas tecnologias de sal fundido podem aumentar fortemente o rendimento e potência de geração de usinas heliotérmicas, pois definem como serão os novos rendimentos das usinas heliotérmicas no futuro. No caso da geração por torre solar central, pode gerar aumentos no rendimento de pico de 35 % para 45 % (NREL, 2017a). A Tabela 17 apresenta o resumo dos sais fundidos em desenvolvimento.

Tabela 17: Propriedades dos sais fundidos experimentais propostos pela NREL

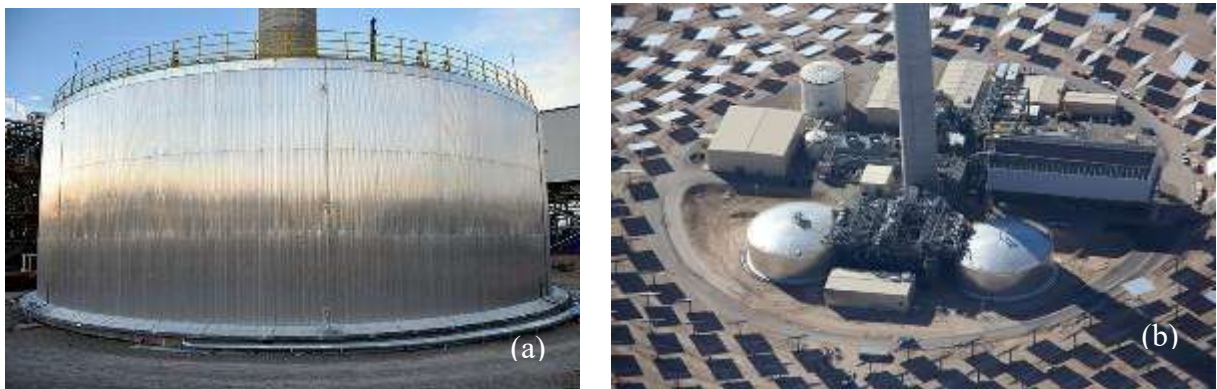
Sal	Ponto de fusão (°C)	Temperatura máxima (°C)	Capacidade de aquecimento (J/g-K)	Densidade (kg/L)	Viscosidade (cP)	Relativo $\rho \cdot C_p$
Solar Salt (NaNO ₃ /KNO ₃)	220	~600	1,55	1,71	1,0	1,00
KNO ₃	334	~650	1,39	1,78	-	0,93
KCl/MgCl ₂	426	>900	1,1	1,97	1,9	0,82
KCl/NaCl/MgCl ₂	385	>900	1,1	1,94	1,6	0,81
ZnCl ₂ /KCl/NaCl	199	>800	0,92	2,08	4,5	0,72
Na ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ /Li ₂ CO ₃	398	~800	1,83	1,99	8,3	1,37

Fonte: (NREL, 2017a)

Assim, o armazenamento de calor por sal fundido é adequado para aplicações de armazenamento de longo prazo e de larga escala. As aplicações típicas para estoque de energia térmica, redução dos efeitos da intermitência da irradiação solar e da flutuação na geração de energia elétrica nas usinas heliotérmicas (NREL, 2017a).

A Figura 55 apresenta os sistemas de armazenamento de calor típicos em usinas heliotérmicas, item (a) apresenta o tanque de sal fundido e (b) esses tanques instalados no sistema torre solar central junto com a praça de máquinas para geração de energia elétrica, conforme descrito no Capítulo 3.

Figura 52: Tanques de armazenamento de calor por sal fundido da usina Geosolar



Fonte: (SOLARRESERVE, 2018)

2.14.4. Características técnicas para armazenagem de energia e suas limitações

Em resumo, as principais características técnicas para armazenagem de energia e suas limitações foram levantadas pelo laboratório de pesquisa norte-americano Sandia e estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Características técnicas para armazenagem de energia e suas limitações

	Partículas sólidas	Sal fundido	Baterias	Bomba d'água	Compressor de ar
Custo em R\$ do MWh	32 a 42	35 a 54	328 a 3820	480 a 705	385 a 670
Eficiência	98 % para estoque de calor e 40 % de conversão de energia térmica para elétrica	98 % para estoque de calor e 40 % de conversão de energia térmica para elétrica	60 a 90 %	65 a 80 %	40 a 70 %
Ciclo de vida	> 10.000	> 10.000	1.000 a 5.000	> 10.000	> 10.000
Toxicidade	NA	Dependente do material da tubulação	Metais pesados	Consumo de água	NA
Restrições e Limitações	Desafio para transferência de calor	Temperatura atual da decomposição do sal fundido em torno de 600 °C	Custo alto para utilização em usinas	Necessidade de grande quantidade de água	Precisa de geografia apropriada

Fonte: (SANDIA, 2016)

3. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR TORRE SOLAR CENTRAL

3.1. Características de Operação

Um estudo de caso interessante para operação em usinas heliotérmica centralizada com torre solar central é a Gemasolar, em operação na Espanha. A Figura 56 apresenta a vista aérea da instalação da usina em região semiárida do interior do país e na Tabela 19 listam-se os dados referentes ao seu desempenho básico.

Figura 53: Vista aérea da usina Gemasolar



Fonte: (DS, 2013)

Tabela 19: Desempenho básico da usina Gemasolar

Item	Característica
Fabricante	Gemasolar
Altura das torres	140m
Área total	2 km ²
Área de campo solar	0,3 km ²
Área de reflexão	318.000 m ²
Geração de vapor	Com estoque de calor
Temperatura no receptor	1.050 °C
Temperatura operacional do HTF	550 °C
Fluido de transferência de calor (HTF)	Nitrato de sódio e potássio
Pressão operacional	105 bar
Pico de saída térmica	120 MW _t
Pico de saída elétrica	19,9 MW _e
Geração anual	110 GWh

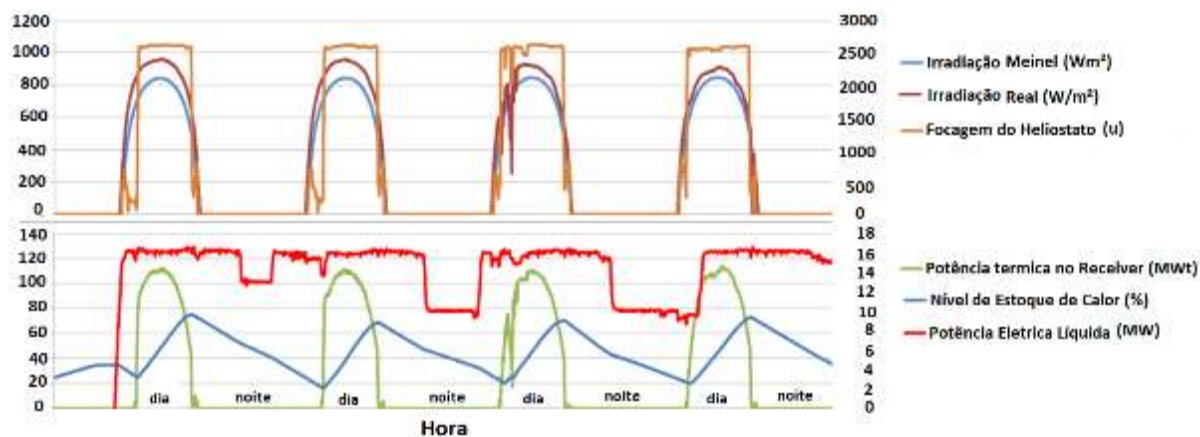
Fonte: (TORRESOL, 2013)

Esse desempenho deve-se a um fator de capacidade de 75 % e a usina possibilita poupar 30.000 t de emissão de CO₂ equivalente por ano.

Esta usina já gerou trinta e seis noites e dias ininterruptos somente com o calor do armazenamento e com a capacidade nominal de seus turbogeradores. A utilização de tanques de armazenamento por sal fundido e o dimensionamento da usina, também possibilitam o estoque térmico máximo de quinze horas ininterruptas por dia para conversão de energia térmica em energia elétrica (TORRESOL, 2013).

A operação da usina Gemasolar ocorre por vários dias e noites de forma ininterrupta e pode ser acompanhada na Figura 57, onde foi considerada a sequência de geração de 2011 por doze dias, com a seleção dos primeiros quatro dias para fins de estudo (TORRESOL, 2013). Conforme apresentado, é possível verificar, por exemplo, como ocorre o perfil de geração diurna e noturna em dias típicos, de uma usina solar heliotérmica.

Figura 54: Parte do ciclo da geração por 12 dias e noites ininterruptos da usina Gemasolar



Fonte (TORRESOL, 2013)

Infelizmente, os valores de potência e de irradiação não foram disponibilizados ao público pela Torresol. Mesmo assim, é interessante notar como se procede a geração da usina de torre central durante vários dias, utilizando o estoque de calor durante a noite e em dias com nebulosidade, e como é a evolução das potências térmicas geradas no receptor pelo bloco de geração e a energia elétrica gerada pelo bloco de potência.

Observa-se que a potência elétrica tem possibilidade de ser gerenciada, sendo o pico de geração de 120 MW durante o dia e havendo uma redução à noite para manter o calor armazenado em níveis adequados, mesmo assim a geração noturna é de valor expressivo, em torno de 80 MW, com um intermitência relativamente pequena durante toda a operação (TORRESOL, 2013). Este estudo reflete o perfil de operação de 2011, que evoluiu para a geração máxima de 36 dias ininterruptos em 2013 (RENEWECONOMY, 2013).

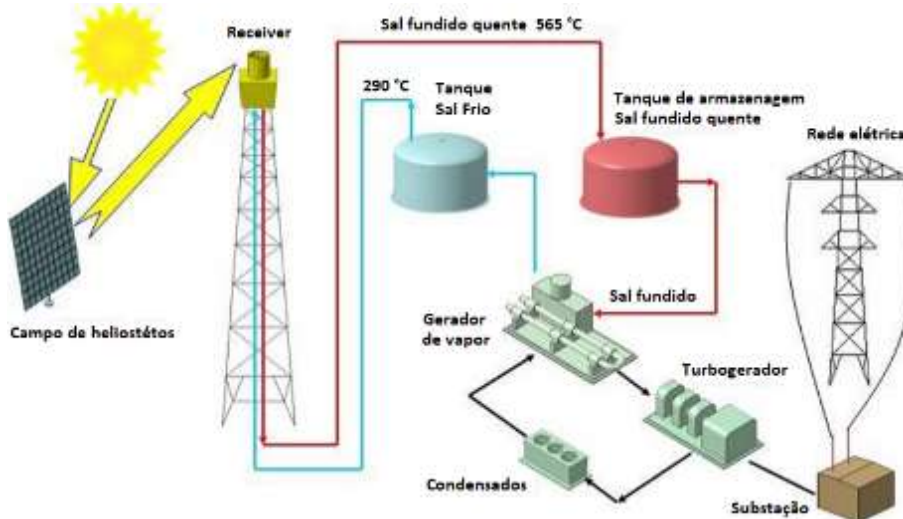
Usinas torre solar central já operaram 365 dias ininterruptos de forma experimental no mundo. É o caso da usina *Solar One* americana. Normalmente podem ser projetadas para um

armazenamento de calor entre seis e quinze horas, dependendo do investimento a ser realizado. Em resumo, na presença de irradiação elas nunca param de operar (SANDIA, 2016).

A usina Gemasolar opera recebendo a irradiação solar em seus heliostatos, refletindo para o receptor que se aquece a 1.050 °C. Com isso, o sal fundido se aquece e se desloca, podendo estocar calor em tanques de armazenagem. Esse circuito do bloco de geração tem potência de 120 MW_t. Em um outro circuito, a água no bloco de potência recebe o calor dos tanques de armazenagem, se transforma vapor superaquecido e alimenta os turbogeradores de 19,9 MW_e. Então, a potência é conectada à rede elétrica espanhola.

A Figura 58 apresenta o esquema de geração da usina e seus componentes básicos, o bloco de potência, também chamado de caldeira solar, e o bloco de geração com a interligação à rede (TORRESOL, 2011).

Figura 55: Esquema de geração da usina Gemasolar



Fonte: (TORRESOL, 2013)

Esses sistemas são localizados próximos ao receptor solar para evitar perdas térmicas e aumentar a eficiência. A Figura 58 apresenta o quão esses sistemas são adensados na usina.

Figura 568: Blocos de potência e de geração da usina Gemasolar

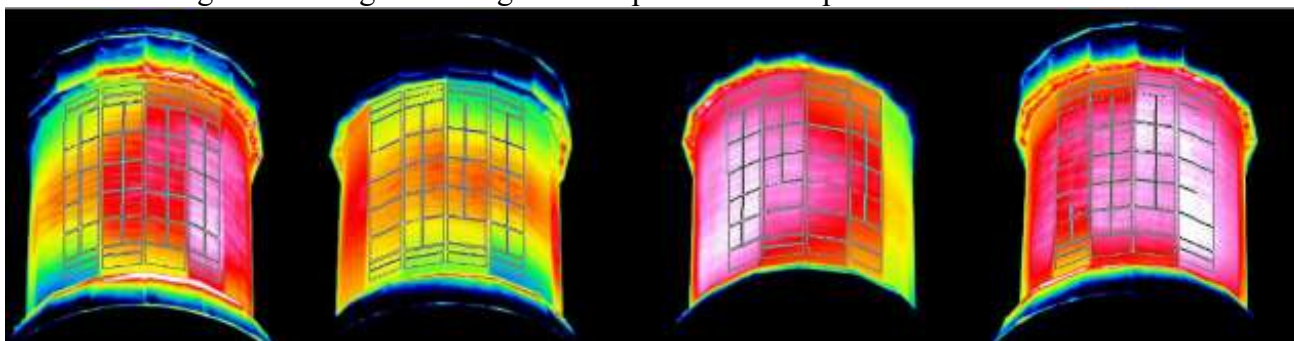


Fonte: (CORIOLIS, 2017)

O receptor é o equipamento de troca de calor de relevância no sistema da usina solar de torre central. Na usina Gemasolar, todos os dias, a temperatura do receptor muda rapidamente, conforme as condições ambientais e operacionais, fazendo o fluido de transferência de calor, o sal fundido, variar entre 265 e 565 °C. Isso exige procedimentos para controlar todos os parâmetros e sistemas, que afetam o enchimento e a drenagem do receptor, para garantir a eficiência e a segurança, sendo uma operação delicada (TORRESOL,2011).

A Figura 60 apresenta a imagem termográfica do receptor em funcionamento, que infelizmente não tem a legenda das temperaturas de operação publicadas, mas onde é possível se observar a variação de temperatura durante a partida do receptor.

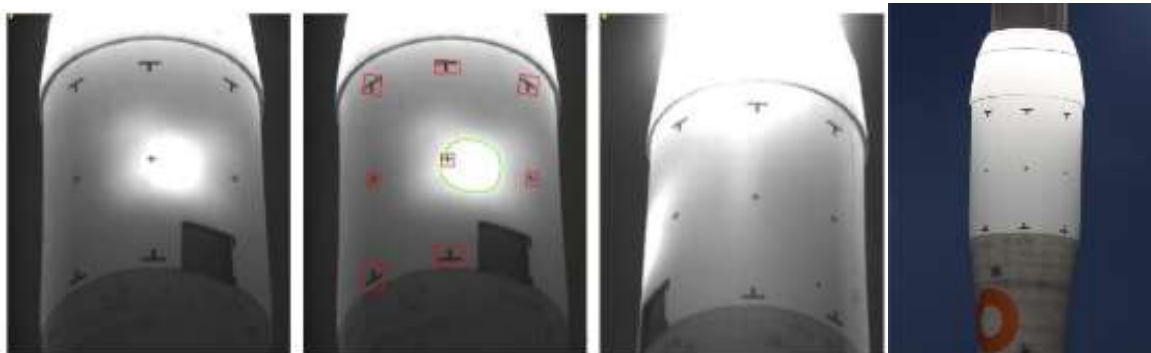
Figura 57: imagem termográfica na partida do receptor da Gemasolar



Fonte TORRESOL, 2011 – Adaptado pelo Autor

Para sua boa operação, o receptor depende da sincronização entre o campo solar de heliostatos e o receptor por meio do sistema de rastreamento solar e do controle de foco, ambos automatizados, sendo que as câmeras termográficas são parte da ferramenta do controle do fluxo de radiação para o receptor e são sincronizadas pelo *software* de controle dos heliostatos e do campo solar (TORRESOL, 2011).

Figura 58: Dificuldades de foco no receptor devido ao sistema de rastreamento da Gemasolar

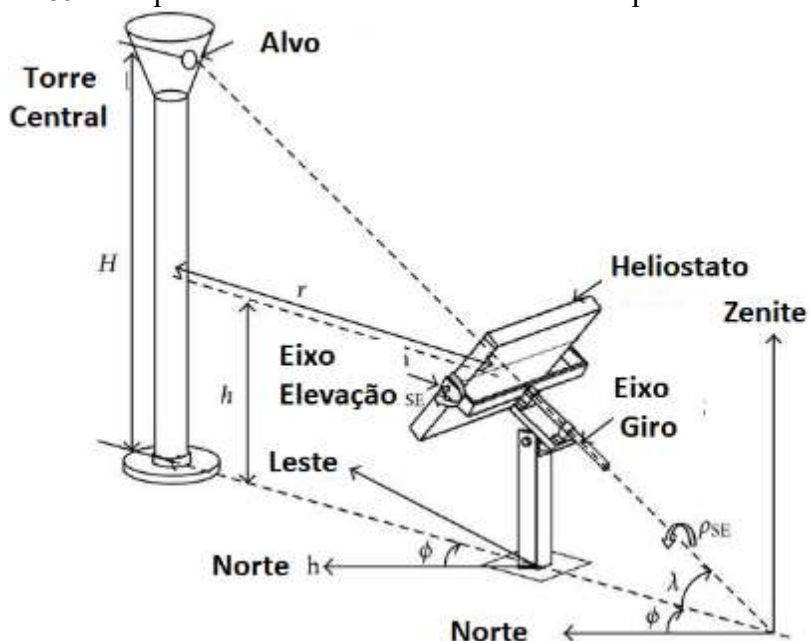


Fonte: TORRESOL, 2011

Em um projeto de campo de heliostatos é relevante que a radiação solar refletida chegue ao receptor na torre central na área prevista, sendo que a mínima irradiação recebida deve ser de 90 % do fluxo solar (EUSTÁQUIO, 2011).

Para tanto, todos os heliostatos precisam estar focados para o mesmo ponto no receptor da torre central. Não seria possível ajustar mecanicamente todos os heliostatos para foco ao mesmo tempo, de forma autônoma, daí a necessidade do sistema de rastreamento solar e de um algoritmo para controle, para que ocorra a mira no receptor central da torre solar para cada heliostato, garantido o melhor posicionamento possível do campo solar, conforme Figura 60 (CHONG, 2012).

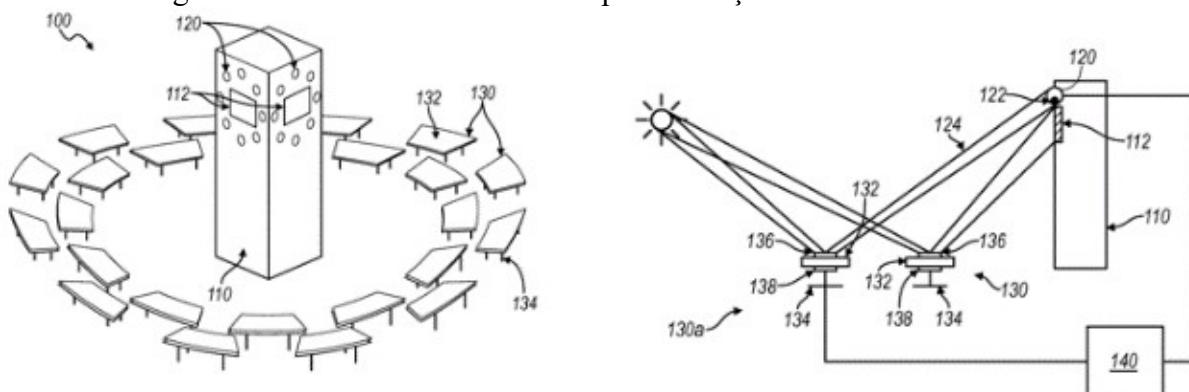
Figura 59: Croquis do sistema de rastreamento solar para os heliostatos



Fonte: (CHONG, 2012)

Um exemplo, é o esquema da patente US8344305 B2 apresentado na Figura 63, que é um dos métodos aplicáveis por meio de mira a laser para obtenção do foco em heliostatos (CONVERY, 2009).

Figura 60: Sistema rastreador solar para correção da mira de heliostatos

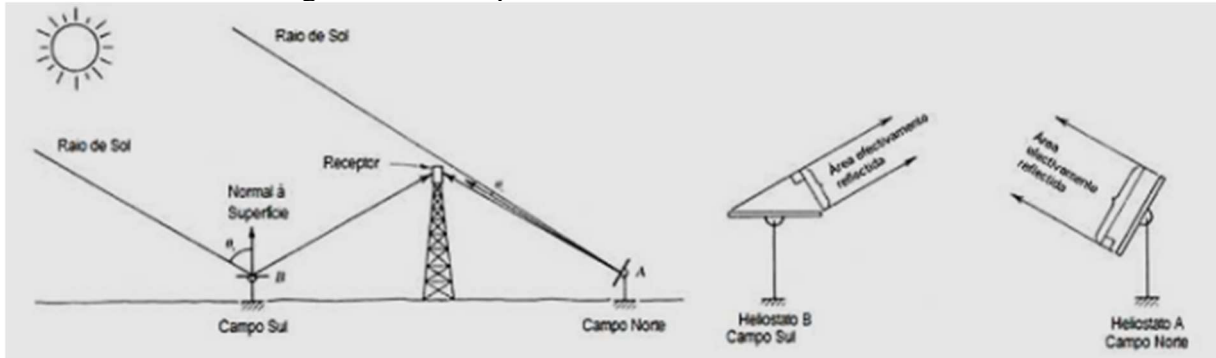


Fonte: (CONVERY, 2009)

Nos campos solares da torre central, existe uma quantidade relevante de heliostatos, onde pode ocorrer interferência da reflexão solar entre os equipamentos, afetando a reflectividade da usina, portanto, o *layout* de posicionamento dos heliostatos é um item

relevante para a eficiência geral do processo do bloco de geração, sendo duas perdas, nesse caso, o efeito cosseno e o sombreamento, as mais importantes. Ambas dependem do ângulo da Terra em relação ao Sol, em função os chamados solstício e equinócio solares (MARANHÃO, 2015).

Figura 61: Perda por efeito cosseno em torres solares

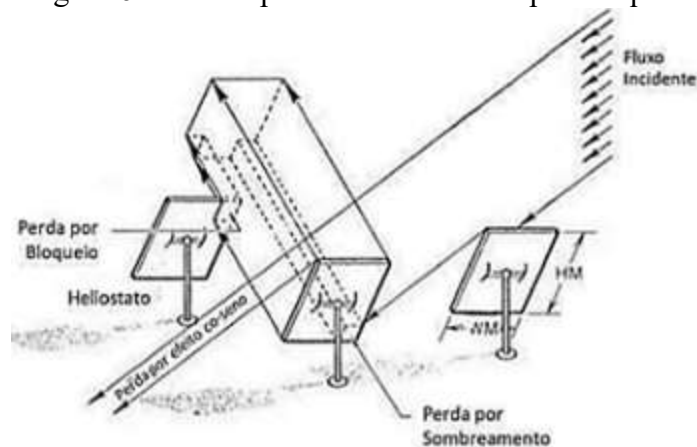


Fonte (OLIVEIRA, 2014)

A perda por efeito cosseno é aquela onde a posição dos heliostatos varia através do ângulo teta que diminui ou aumenta a reflexão, conforme o horário do dia. Ela pode ser verificada no croquis da Figura 86, conforme posicionamento do Sol, onde é possível observar por meio do esquema do heliostato B, que a área de reflexão é menor, já para o campo norte, é possível verificar um grande aumento na área de reflexão do heliostato A, sendo essa a posição ideal (OLIVEIRA, 2014).

A perda por sombreamento é devida à posição do Sol durante o correr do dia, que pode diminuir a reflexão dos heliostatos, conforme a interferência entre os mesmos. A Figura 87 apresenta como se procede o sombreamento por bloqueio e o sombreamento por efeito cosseno (OLIVEIRA, 2014).

Figura 62: Perdas por sombreamento e por bloqueio



Fonte: (MARANHÃO, 2015)

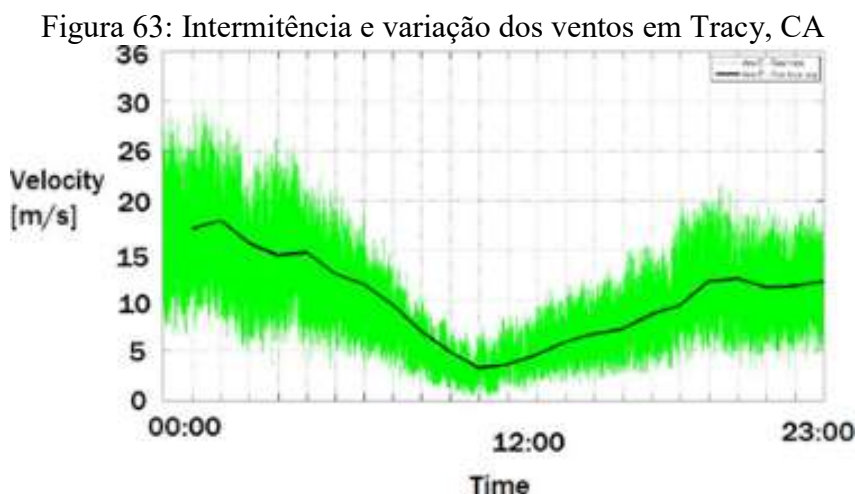
Como as usinas solares heliotérmicas normalmente são instaladas em desertos, com pouca proteção natural, são sujeitas a cargas aerodinâmicas importantes devido a ventos fortes.

Isso pode aumentar radicalmente os custos de manutenção e de manufatura dos heliostatos, uma vez que sua estrutura deve ser estável o suficiente para resistir a essa condição (NUSSBAUMER, 2011).

O problema da operação em campos de heliostatos devido aos esforços aerodinâmicos, podem ser divididos em dois itens: no primeiro, as cargas aerodinâmicas que deformam elasticamente a estrutura dos suportes dos espelhos, reduzindo a qualidade óptica do feixe de luz refletida, o chamado problema de rigidez estrutural (VASQUEZ-ARANGO, 2015).

O segundo problema é devido às cargas aerodinâmicas, que podem colapsar a estrutura devido a ventos de rajadas intensas, que causam sobrecarga ou fadiga, devido a cargas de vento cíclicas, provocando falha material e colapso, conforme o tempo de uso. Além disso, uma vez que o carregamento aerodinâmico é variável, devido às fortes rajadas de vento intermitentes, há vibrações nos postes, o que pode degradar o controle de rastreamento dos heliostatos (BJÖRKMAN, 2014).

Como exemplo de campo, pode-se observar os dados do anemômetro do Google, coletados em Tracy, CA, EUA, em 23 de maio de 2011, 2,75 m acima do solo, apresentado na Figura 66. Tracy é conhecida como uma região alta e plana. A curva verde é a velocidade do vento em tempo real e a linha preta é a velocidade média de vento de uma hora (GOOGLE, 2011).



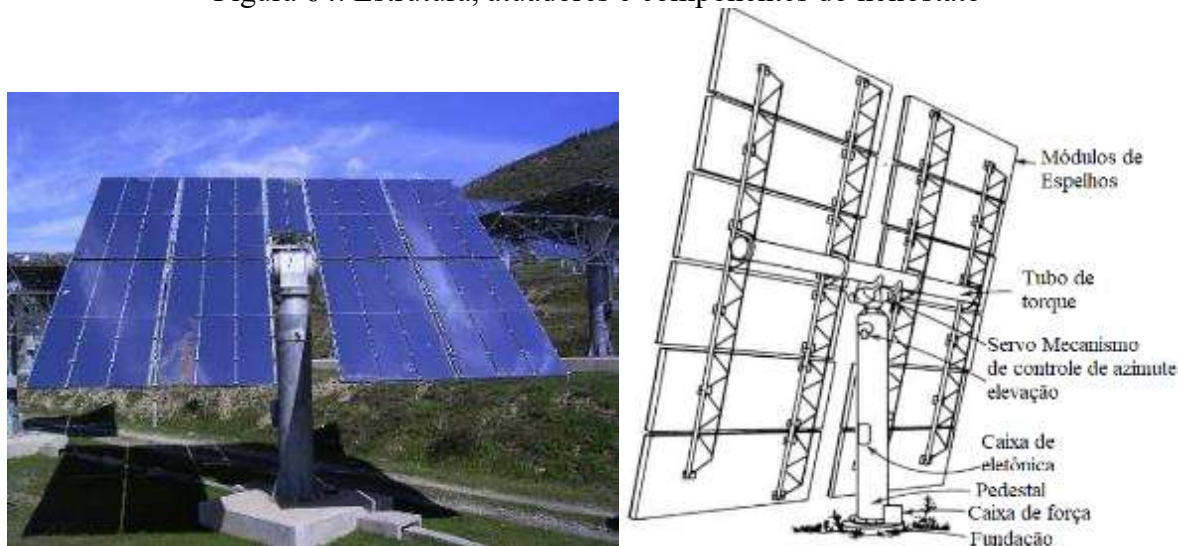
Fonte: (GOOGLE, 2011).

Outro fator que pode afetar a geração solar heliotérmica é a expansão térmica dos materiais utilizados para a estrutura. Uma vez que mesmo pequenas, deflexões acima de 2 mRad da superfície do espelho, causam desvios de foco significativos (VANT-HUL., 2012). Logo, a seleção do material deve ser executada com critério.

De acordo com Spellning, os seguintes requisitos estão presentes no projeto de heliostatos, e afetam diretamente a operação em usinas de torre central: alta reflectividade, alta precisão óptica, alta precisão de rastreamento solar e estrutura robusta (SPELLNING, 2012).

Os sistemas agregados aos heliostatos, como servomotores, mecanismo de deslocamento e alinhamento de foco, necessitam de bons requisitos de projeto estrutural e de montagem, para boa qualidade de funcionamento do equipamento. Na Figura 67, se observa o exemplo de um heliostato com a estrutura e seus sistemas agregados ao equipamento da usina de Themis, na França (TÉLLEZ, 2014).

Figura 64: Estrutura, atuadores e componentes do heliostato



Fonte: (TÉLLEZ, 2014)

3.2. Potencial de Geração

O potencial de usinas geradoras de energia elétrica solar heliotérmica comercial no Brasil é enorme, devido à isolação presente no país (EPE, 2016), conforme informações consolidadas na Tabela 20.

Tabela 20: Potencial de geração por torre solar central com armazenamento de 7,5 horas

	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro Oeste	Sul	BRASIL
Potência (GW)	749	42.271	6.375	9.414	26.760	85.000
Eletricidade (GWh)	2.685	162.503	21.221	31.594	85.897	303.899

Fonte: (GIZ, 2014)

Devido à pouca utilização das tecnologias heliotérmicas e como incentivo à utilização de geração por fontes renováveis, em 2014, o governo alemão, por meio do *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), levantou o potencial de geração heliotérmica por torre solar central no Brasil (GIZ, 2014), por região. Esse estudo considerou usinas com o armazenamento de sete horas e meia.

3.3. Eficiência de Geração por Torre Central

Usinas de geração de energia elétrica por torre central têm as seguintes eficiências energéticas e exergéticas, com levantamentos feitos em campo, conforme apresentado nas Tabela 21 e 22 (XU, 2011).

Tabela 21: Análise energética para a geração por torre central

Subsistema	Recebida (kW)	Entregue (kW)	Perdas (kW)	Eficiência (%)
Campo de heliostatos	8.000,0	6.000,0	2.000,0	75,00
Receptor central	6.000,0	5.401,3	598,7	90,02
Bloco de geração	5.401,3	5.401,3	0,0	100,00
Bloco de potência	5.401,3	2.080,6	3.320,7	37,85
Total	8.000	1.830,9	6.169,1	22,89

Fonte: (XU, 2011)

Tabela 22: Análise exergética para a geração por torre central

Subsistema	Recebida (kW)	Entregue (kW)	Perdas (kW)	Eficiência (%)
Campo de heliostatos	7478,8	5.609,1	1.869,7	75,00
Receptor central	5.609,1	3.111,7	2.497,4	55,48
Bloco de geração	3.111,7	2.793,5	318,2	89,77
Bloco de potência	2.793,5	2.080,6	712,9	74,48
Total	7.478,8	1.830,9	5.647,9	24,48

Fonte: (XU, 2011)

Uma questão operacional importante, que reduz a eficiência em usinas heliotérmicas, é a possibilidade de acúmulo de poeira nos espelhos solares heliostáticos ou em coletores solares por calha parabólica, instalados em diferentes regiões áridas, ou semi-áridas. É fato que a reflexão dos espelhos nos receptores se reduz devido ao acúmulo de poeira, assim como a eficiência geral do sistema heliotérmico (XU, 2016).

Portanto, é necessária grande quantidade de água para as plantas heliotérmicas. Para os sistemas heliotérmicos atuais, o requisito de água é estimado entre 3 e 3,5 m³/kWh, onde 95 % dos quais são atribuídos à torre de resfriamento e 5 % são consumidos para a limpeza de espelhos. O desenvolvimento de métodos de resfriamento a seco e a autolimpeza dos espelhos são necessários para minimizar o uso de água nas usinas heliotérmicas (W.D., 2014).

Em geral, é desejável ter troca de calor rápida durante a partida de uma usina. Porém, as razões são limitadas, principalmente, por tensões térmicas, que, se muito altas, podem comprometer a vida útil dos componentes.

Além disso, no caso de utilização de maiores razões de aquecimento pode haver outros componentes com problema de material por excesso de temperatura. Portanto, a razão de

troca de calor por aquecimento solar é limitante da partida. As limitações na inicialização de componentes podem ser verificadas nas curvas de carga da turbina para diferentes partidas e calculando-se a variação admissível da temperatura do fluido nos componentes no sistema gerador de vapor, no evaporador e no vapor gerado.

3.4. Custos

Este item pretende levantar os custos de implementação, de operação e de manutenção de usinas renováveis heliotérmicas por torre solar central. Todos os valores monetários levantados em dólar foram convertidos, sempre que possível para real, com cotação de 3,2 por 1, de março de 2018.

O custo para o campo de heliostatos da torre central é menor que o da calha parabólica e o potencial de redução de custo é estimado em 28 % até 2025, de forma bastante uniforme, sobre todos os subcomponentes, exceto para o sistema HTF (fluido de transferência de calor), conforme apresentado no Tabela 23 (DLR, 2016).

Tabela 23: Implementação atual e potencial futuro para a torre central

Campo heliostatos Torre central	Custos 2015 (US\$/m ²)	Custos 2025 (US\$/m ²)	Variação (%)
Motores	45	33,8	-25
Estrutura e fundação	42	31,5	-25
Automação	4	3,2	-20
Cabeamento	15	12,0	-20
TOTAL US\$	143	103	-28

Fonte: (DLR, 2016)

O custo para o sistema de armazenagem da torre central, assim como no de calha parabólica, tende a diminuir devido aos novos desenvolvimentos nos sistemas e no aumento da temperatura de operação do sal fundido, com a pesquisa de novas misturas. O custo de armazenagem atual é menor que o de um sistema com calha parabólica, devido à maior temperatura de armazenamento, sendo que a redução chegará a 38 % até 2025 (DLR, 2016).

Tabela 24: Custo de implementação atual e futura de armazenagem em usina de torre central

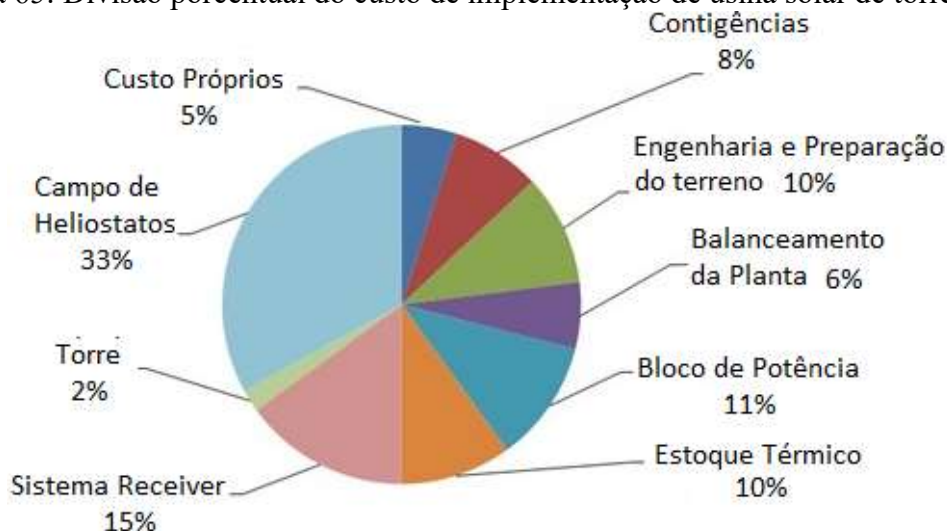
Sistema de armazenagem da torre central	Custos 2015 (US\$/kWh)	Custos 2025 (US\$/kWh)	Variação (%)
Estoque médio (fluidos)	10,4	9,4	-10
Tanques	12	9,0	-25
Bombas e trocadores de calor	2	1,8	-10
Controle do balanço de estoque	2	1,8	-10
TOTAL US\$	26	22	-17

Fonte: (DLR, 2016)

A tecnologia do bloco de potência é madura e o potencial de redução de custos é baixo para os próximos 10 anos. Com custo de 1.270 US\$/kW, em 2015, o bloco de energia para sistemas de torre é 50 US\$/kW mais caro do que para os sistemas de calha parabólica devido à maior temperatura e ao nível de pressão.

Em 2025, os custos são estimados em 1.100 US\$/kW para ambas as tecnologias. Como exemplo, a divisão de custos de uma usina solar de calha parabólica de 100 MW, com a presença do sistema de armazenamento, pode ser observada na Figura 68.

Figura 65: Divisão porcentual do custo de implementação de usina solar de torre central



Fonte: (IRENA, 2018)

A Tabela 25 apresenta os valores de algumas usinas solares de torre central existentes no mundo em conjunto com sua relação de custo por MW instalado.

Tabela 25: Comparação de custos de implementação de usinas de torre central

Empreendimento	Ano	País	Investimento (US\$)	Investimento (R\$)	Potência (kW)	R\$/kW Instalado
Crescent Dunes	2015	Est. Unidos	800 Milhões	2,56 Bilhões	110.000	23.300
Khi Solar One	2016	África do Sul	450 Milhões	1,44 Bilhões	50.000	28.800
Delingha Supcon	2018	China	120 Milhões	384 Milhões	50.000	7.700

Fonte: (CSPWORLD, 2018)

Os custos de operação e de manutenção pesquisados são apresentados na Tabela 26, sendo baseados em levantamento feito pela IRENA, em 2017.

Tabela 26: Custos de operação e de manutenção de usinas solares de torre central

US\$/kWh Ano	R\$/kWh Ano
0,02 a 0,03	0,096 a 0,128

Fonte (IRENA, 2018)

3.5. Preço de Venda de Eletricidade Solar Heliotérmica

Os resultados do leilão de energia elétrica pelo mundo sugerem que a energia heliotérmica terá queda no custo nivelado de eletricidade (LCOE) de 100 US\$/MWh para 60 US\$/MWh até 2020, como estima a agência internacional de energia renovável (IRENA, 2018), que também afirma que os preços da geração heliotérmica cairão a uma taxa de 30 % por cada duplicação da capacidade instalada cumulativa de 2010 a 2020, em comparação com uma taxa de aprendizado de 35 % para a solar fotovoltaica e 21 % para a eólica.

O *CSP Today*, em 2017, levantou ofertas de 73 US\$/MWh em Dubai, 63 US\$/MWh na Austrália e menos de 50 US\$/MWh no Chile (SHEMER, 2018). Devido à proximidade econômica do Chile com o Brasil, foi adotado o preço de venda daquele país.

Tabela 27: Preço internacional de venda de energia heliotérmica

	US\$/MWh	R\$/MWh
Fixo	50	160

Fonte: (SHEMER, 2018)

4. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR CALHA PARABÓLICA

4.1. Características de Operação

Um estudo de caso sobre essa tecnologia é o da usina de solar por calha parabólica de Solana no deserto do Arizona (ABENGOA, 2014). O desempenho básico da usina pode ser observado na Tabela 28.

Figura 66: Usina de Solana



Fonte: (NREL, 2016)

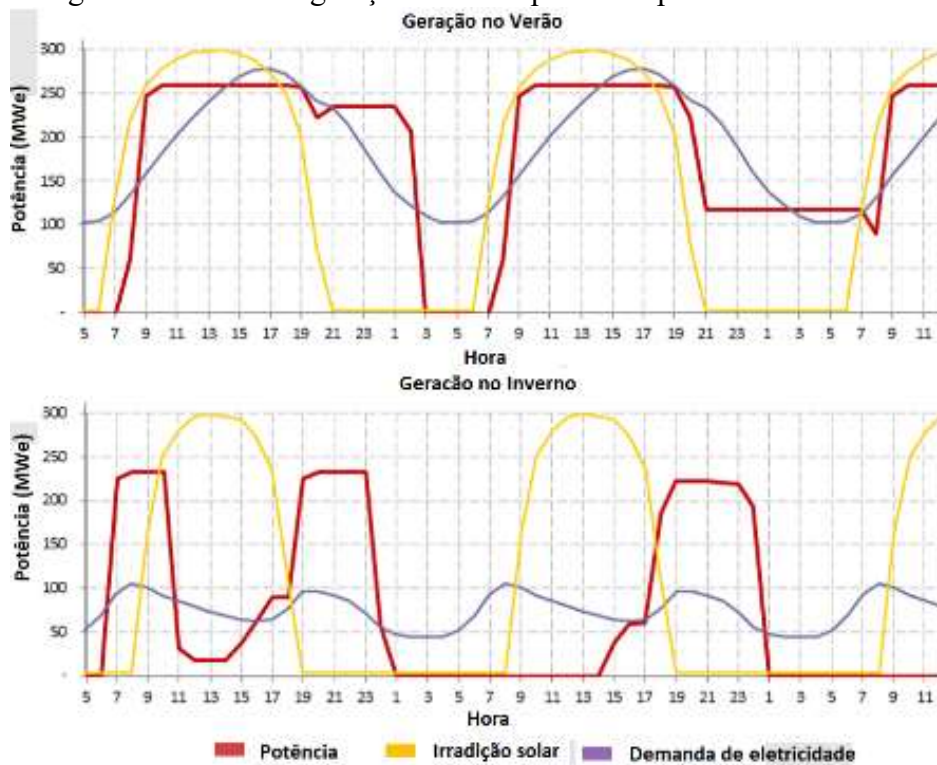
Tabela 28: Desempenho básico da usina de Solana

Item	Característica
Fabricante	ABENGOA
Comprimento da calha	300 m
Área total	4,83 km ²
Área de reflexão	2,20 km ²
Geração de vapor	Com estoque de calor
Fluido de transferência de calor (HTF)	Therminol VP-1
Temperatura operacional do HTF	393 °C
Pressão operacional	100 bar
Pico de saída elétrica	250 MW _e
Geração anual	944 GWh/ano

Fonte: (NREL, 2018a)

Essa usina tem disponível seis horas de estoque de calor, em condição de plena carga, por meio de dois tanques de armazenagem de calor com sal fundido. A Figura 70 apresenta os ciclos de potência na geração elétrica com o armazenamento de calor, nos picos e nos vales de radiação, do verão e do inverno.

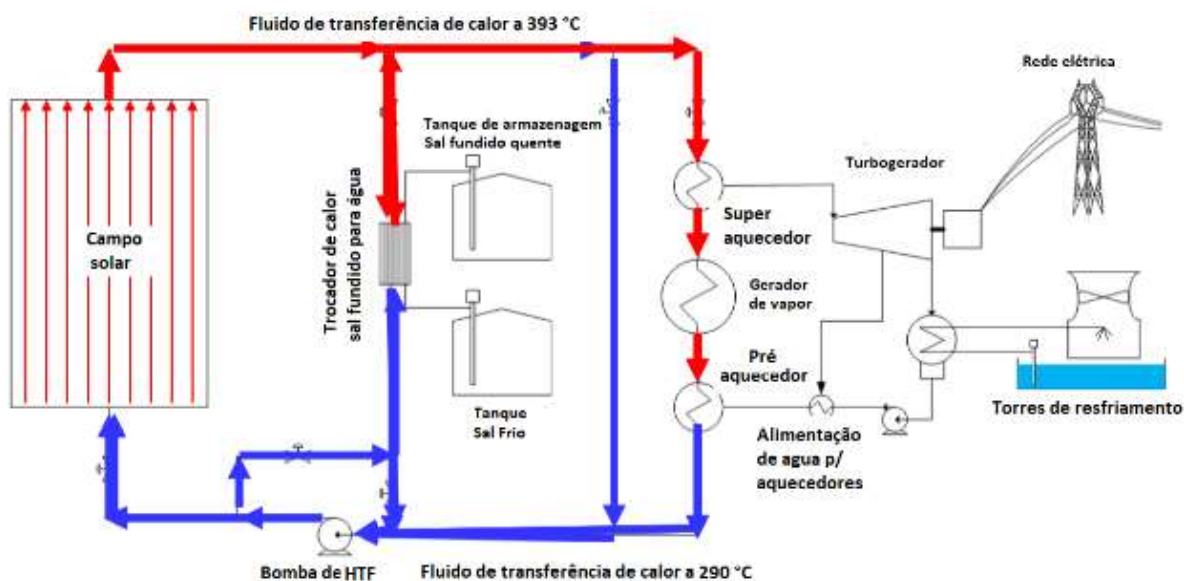
Figura 67: Ciclos de geração da usina por calha parabólica de Solana



Fonte: (ABENGOA, 2014)

É possível notar uma expressiva queda na potência gerada no inverno, quando a usina de Solana não é capaz de fazer uma geração ininterrupta, como a Gemasolar, devido à capacidade projetada para o estoque de calor ser de seis horas para geração noturna. A geração mensal inserida na rede elétrica americana pela usina de Solana pode ser acompanhada no Capítulo 7, assim como o funcionamento já descrito no item 2.23. A Figura 71 apresenta o esquema de geração da usina com o bloco de potência e o bloco de geração, com a interligação à rede, conforme os ciclos de geração da Figura 70.

Figura 68: Esquema de funcionamento da usina de Solana



Fonte: (ABENGOA, 2014)

Esses sistemas não são localizados próximos aos receptores solares e não evitam as perdas térmicas. A Figura 72 apresenta o quão esses sistemas são adensados na usina.

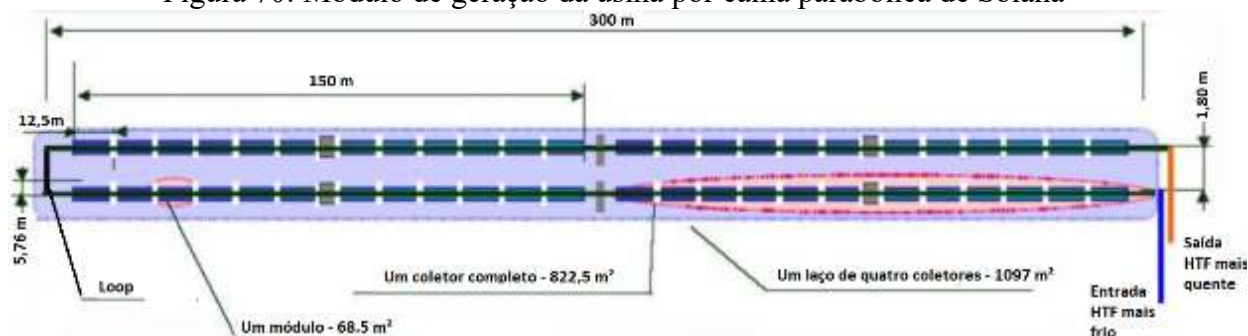
Figura 69: Blocos de potência e de geração da usina de Solana



Fonte: (ABENGOA, 2014)

O coletor solar parabólico completo é formado por dez ou doze módulos, sendo um módulo do coletor é formado por 28 espelhos de quatro linhas e sete colunas com 300 m de comprimento (ABENGOA, 2015), conforme apresentado na Figura 73 e descrito na Figura 75.

Figura 70: Módulo de geração da usina por calha parabólica de Solana



Fonte: (ABENGOA, 2014)

Os coletores parabólicos são acoplados em *loops* para manter um processo de aquecimento contínuo em cada planta, sendo que um *loop* é formado por quatro unidades (ABENGOA, 2015). O fluido de transferência de calor percorre a distância de 600 m de cada *loop* para que a temperatura operacional do HTF atinja os 393 °C, em pico, para injeção no bloco de geração em dois turbogeradores de 140 MW_e cada, para geração de energia elétrica. A Figura 74 ilustra como é esse processo. Uma grande inovação dessa usina é reutilizar a água das plantações próximas. A redução de emissões devido a essa codição são da ordem de 457 mil toneladas de CO₂, 1.065 t de NO_x e 520 t de SO₂ (ABENGOA, 2014).

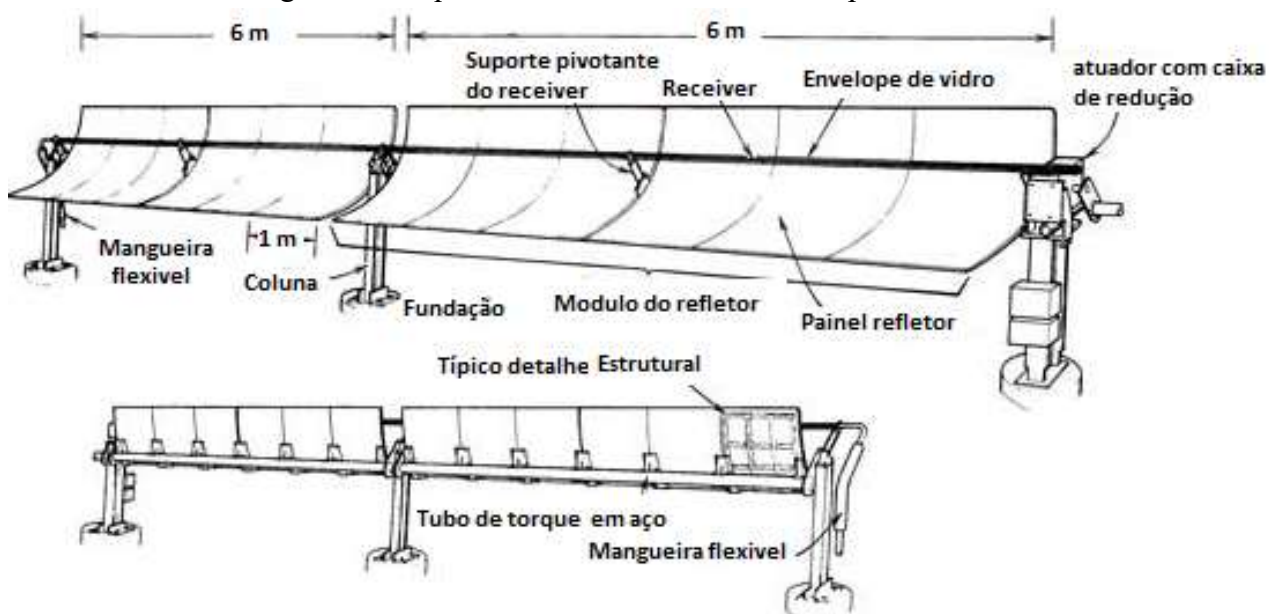
Figura 71: Esquema do funcionamento dos campos de calhas parabólicas da usina Solana



Fonte : (NREL, 2009)

Os principais elementos de um coletor de calha parabólica são: fundação e quadro de suporte, superfície reflexiva, tubos absorventes envelopados, sistema de rastreamento solar com atuador com caixa de redução, sistema hidráulico, instrumentação e controle (ABENGOA, 2015), que podem ser observados na Figura 75.

Figura 72: Esquema do módulo da calha solar parabólica



Fonte: (STINE, 2001)

O coletor parabólico é fabricado em vidro conformado de alta precisão para evitar distorções e utiliza filme reflexivo da empresa 3M com 94 % de reflexibilidade para que se

obtenha alto desempenho. A fabricação do vidro do coletor e da película reflexiva 3M *Solar Mirror Film 1100* estão apresentadas na Figura 76.

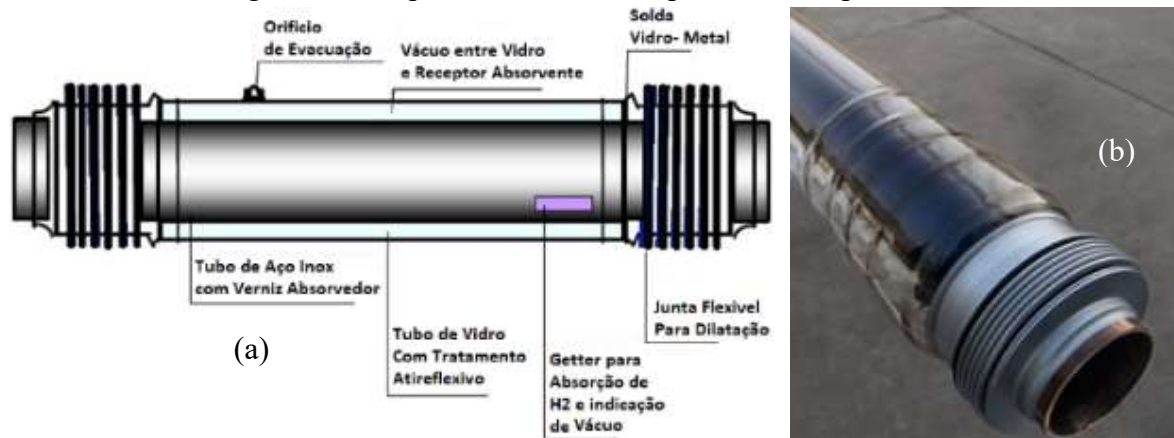
Figura 73: Fabricação do coletor de vidro parabólico e do coletor parabólico com receptor



Fonte: (a) (ABENGOA, 2014) e (b) (3M, 2012)

O tubo receptor absorvedor está sendo apresentado no esboço e na foto na Figura 77. Esses dois componentes são os mais importantes de uma calha parabólica. Para uma melhor transmissão da irradiação solar, existe pressão negativa (vácuo) entre o tubo absorvente e o tubo de vidro, que elimina a propagação do calor por condução e por convecção entre os dois tipos de tubos, que são concêntricos. O tubo receptor da calha parabólica é fabricado com material absorvente de calor, composto por vidro no tubo externo, também chamado de envelopamento, e por tubo de aço inoxidável interno, chamado de tubo absorvedor.

Figura 74: Esquema e foto do receptor da calha parabólica



Fonte: (a) (ABENGOA, 2014) e (b) (GAIA SOLAR ENERGY, 2018)

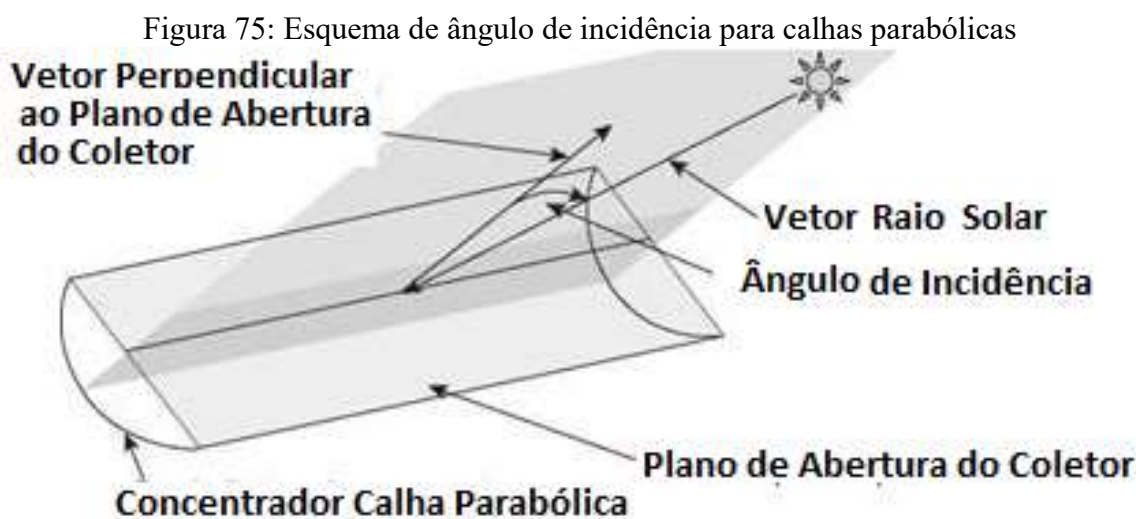
A irradiação passa pelo tubo de vidro, pelo vácuo e então é recebida pelo tubo absorvedor, então transferida ao fluido interno circulante (HTF), em geral, sal fundido. Para absorver as expansões térmicas, nas pontas do receptor, existe uma junta dilatadora, tipo fole, chamada de Getter, para manter a pressão negativa (ABENGOA, 2014).

As perdas ópticas têm várias fontes em um sistema coletor e receptor por calha parabólica, por exemplo, os erros de fabricação micro e macroscópicos nos espelhos, que são aqueles com presença de áreas de rugosidade ou distorção focal fora do especificado, na

superfície, espalhando a radiação do feixe refletido (ABNT, 2005). Normalmente, problemas de rugosidade são resolvidos aplicando-se película reflexiva apropriada (3M, 2012). Outro tipo de erro geométrico é o posicionamento do espelho e do receptor; um deles é o erro de orientação devido à torção estrutural do coletor, pois o comprimento pode ser grande, e um segundo devido a problema no sistema de rastreamento solar (DLR, 2012).

As perdas ópticas ocorrem pela reflexão limitada, absorção ou transmitância dos componentes ópticos. Os espelhos de vidro com filme solar têm uma reflexão quase ilimitada em torno de 94 % (3M, 2012). Em caso de utilização de espelhos comuns com vidro, a transmitância é limitada a 92 % (ABENGOA, 2015). A transmitância do tubo envelopamento de vidro do receptor é de aproximadamente 67 % (DLR, 2012). Claro, os valores apresentados são válidos apenas para espelhos e receptores totalmente limpos e são limítrofes, pois, os espelhos e receptores nunca estão absolutamente limpos em condições reais de operação. Para os tubos absorvedores, os revestimentos têm reflexão muito baixa, de modo que os altos valores de absorção sejam atingidos.

As perdas ópticas também são causadas, em terceiro lugar, pela variação do ângulo da incidência direta de radiação no coletor. As calhas parabólicas são rastreadas em torno de apenas um eixo e o ângulo de incidência do Sol na calha parabólica muda continuamente, conforme esboço apresentado na Figura 78 (DLR, 2012).



Fonte: (MOYA, 2012)

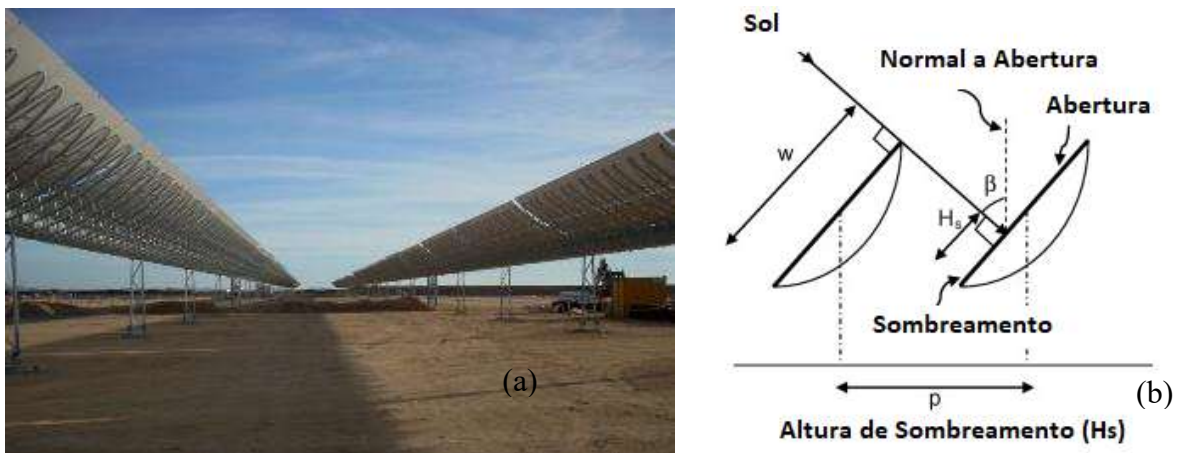
Os ângulos de incidência solar variáveis em somente um eixo de rotação, influenciam negativamente no desempenho geométrico e óptico da calha parabólica de várias maneiras: na reflexividade dos espelhos, na transmissão do tubo de vidro receptor e na absorção do tubo absorvente, onde todos ficam reduzidos (MOYA, 2012).

Com um ângulo de incidência crescente, quanto maior o ângulo de incidência, mais longo é o caminho dos raios de Sol nos espelhos para o receptor, o que causa amplitude mais alta dos raios de Sol, o que reduz o fator de interceptação. Ângulos de incidência maiores que zero implicam em perdas de calor no final dos módulos de coletores. Em uma extremidade, a radiação, que é refletida nos últimos espelhos, perde o tubo absorvente e, na outra extremidade, uma parte do tubo absorvente não está iluminada pela radiação refletida (DLR, 2012).

Todos esses erros causam a redução do fator de interceptação, que é definido como a proporção da radiação refletida no coletor parabólico que atinge o tubo absorvedor e, também, pode ser definido como a medida da radiação refletida, que se perde porque não atinge o alvo, ou seja, o tubo absorvedor. Os fatores de interceptação das calhas parabólicas comerciais atualmente disponíveis estão entre 0,96 e 0,97 (DLR, 2012).

Outro efeito importante são nos pequenos ângulos de incidência solar. As fileiras de coletor podem se sombrear, onde pequenas distâncias implicam altas perdas por sombreamento; grandes distâncias implicam grandes áreas de campo solar e tubos mais longos, com maiores custos de materiais e maiores perdas térmicas, apresentadas na Figura 79. A distância ideal entre fileiras de calhas parabólicas é considerada em cerca de três vezes a largura da abertura (SHARMA, 2013).

Figura 76: Sombreamento e esquema de coletor em calha parabólica



Fonte: (a) (SENER, 2018) e (b) (SHARMA, 2013)

A Figura 80 apresenta as perdas totais aproximadas, devido ao ângulo de incidência variável e às perdas por sombreamento típicas, para uma usina solar por calha parabólica, no equinócio de primavera, ou outono, a uma latitude de 30 ° Norte (DLR, 2012).

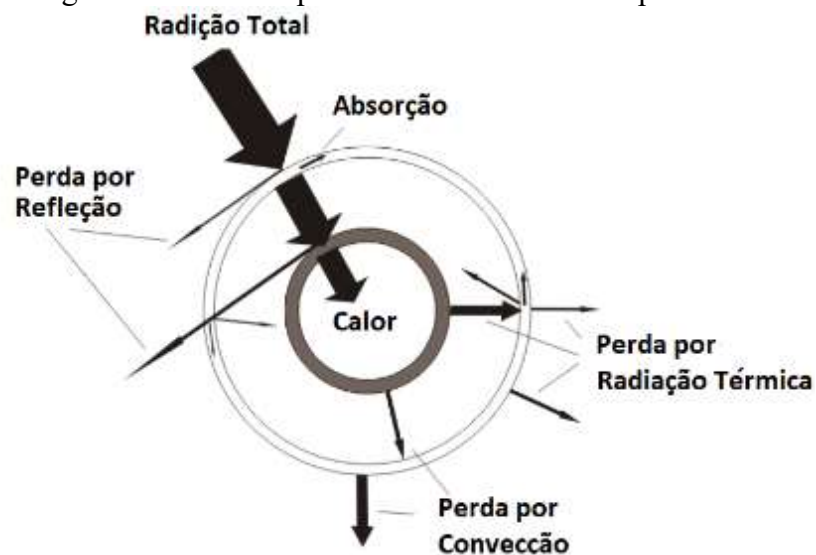
Figura 77: Perdas por sombreamento e por ângulo de incidência em coletor de calha parabólica



Fonte: (DLR, 2012)

As perdas térmicas ocorrem nos tubos absorventes e no fluido de transferência de calor (HTF). Em um determinado sistema, essas perdas dependem da diferença de temperatura entre o receptor e o ar circundante. A Figura 81 apresenta como a radiação solar flui em um corte transversal de seção do receptor. Essa radiação que se deslocou pelos vários componentes do receptor, aquece o fluido de transferência de calor localizado na parte interna do tubo absorvedor. O esquema mostra como são as parcelas de perdas, representadas por vetores.

Figura 78: Fluxo de perdas do coletor de calha parabólica



Fonte: (DLR, 2012)

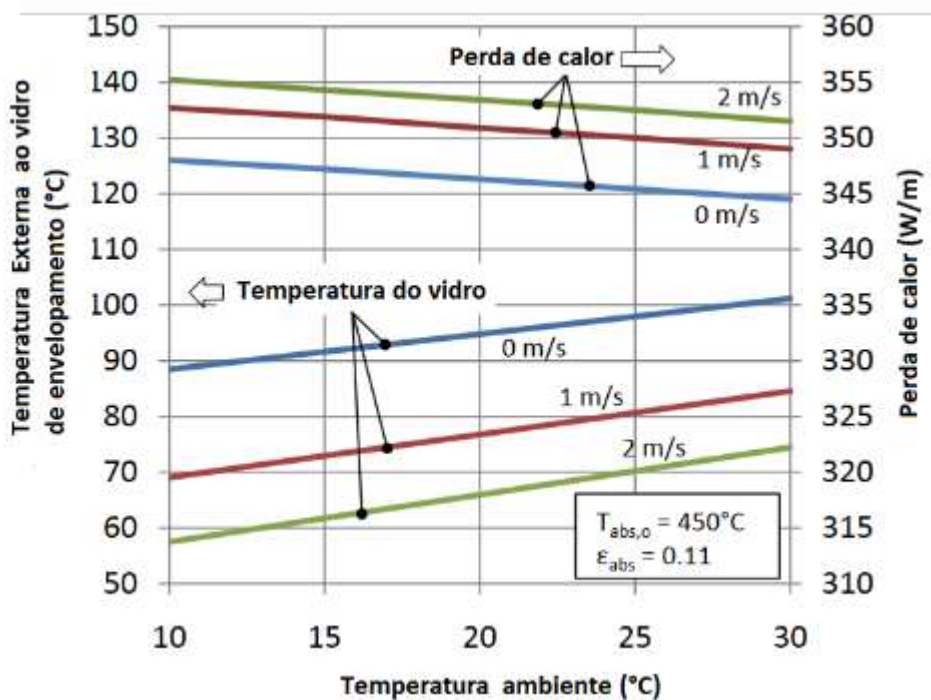
A perda de calor por radiação do tubo absorvente para o ar ambiente é reduzida por um revestimento seletivo, que diminui consideravelmente a emitância radiante às temperaturas comuns de operação. A perda de calor convectiva é reduzida por um tubo de vidro evacuado, que envolve o tubo absorvedor. A perda de calor no tubo absorvente é por radiação térmica e a perda de calor no tubo de vidro envolvente é por convecção. A temperatura do vidro

envelopante é muito inferior à temperatura do tubo absorvedor. Em operação estável, a perda de calor do tubo absorvente e a perda de calor do tubo de vidro são próximas (DLR, 2012).

Como ambos os mecanismos de perda de calor dominante é no transporte de HTF através dos tubos, que dependem proporcionalmente das diferenças de temperatura, todo o processo de perda de temperatura nos tubos cresce com a diferença entre a temperatura do HTF e a temperatura do ar. Geralmente, a perda de calor radiativa domina nas altas temperaturas e a perda de calor convectiva domina nas baixas temperaturas, portanto, é importante manter a tubulação com o menor comprimento possível, de modo a manter baixas as perdas térmicas. Essa é uma razão importante para localizar o bloco de energia dentro do campo solar e não fora dele (DLR, 2012).

Outro fator de perda de desempenho em usinas com calha parabólica é a presença de vento no receptor do sistema. A Figura 82 ilustra que as temperaturas do ambiente e a velocidade do vento podem afetar a temperatura do vidro de envelopamento em $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ do seu valor médio (NREL, 2009).

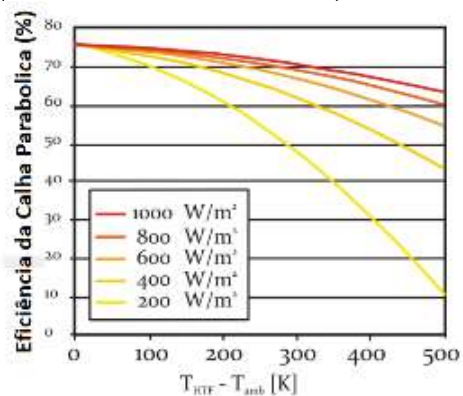
Figura 79: Perdas por velocidade do vento externa ao tubo de envelopamento do receptor



Fonte: (NREL, 2009)

A eficiência total do coletor solar por calha parabólica é função da irradiância e da diferença entre a temperatura do fluido de transferência de calor e a temperatura ambiente, que estão sendo ilustradas na Figura 83. Para o coletor EuroTrough 150, equipado com um receptor Solel da Siemens, as temperaturas mais elevadas do fluido de transferência térmica implicam maiores perdas e menores eficiências do coletor. A irradiância direta mais baixa, a uma dada temperatura de HTF, implica também em uma menor eficiência do coletor.

Figura 80: Eficiência em função da variação da temperatura e da irradiação e *EuroTrough 150*



Fonte: (DLR, 2012)

Também pode ser comum ocorrerem danos no tubo de vidro, ou tubo de envelopamento, externo do receptor devido às mudanças de temperatura e de dilatação, mais frequentemente na área de solda dos dois tubos individuais. Como comentado, o receptor desempenha um papel vital na operação ideal de qualquer usina de energia solar, pois qualquer problema relacionado a esses absorvedores diminuem a eficiência e o desempenho de toda a planta de geração (GHIAT, 2017)

Figura 81: Problema operacional da quebra do vidro de envelopamento do receptor



Fonte: (GHIAT, 2017)

Uma causa comum desse problema operacional é perder o vácuo na parte do anel de vedação entre tubos, ou junta de dilatação. Quando o vácuo é perdido em qualquer posição, resulta na quebra do envelopamento de vidro. Também a variação na distribuição de temperatura e, portanto, estresse térmico resultante no tubo de vidro pode afetar a estrutura do tubo de vidro (GHIAT, 2017).

4.2. Eficiência de Geração

Cinco usinas de geração de energia elétrica solar por calha parabólica têm os seus rendimentos médios anuais típicos apresentados na Tabela 29 (GIOSTRI, 2012).

Tabela 29: Rendimento anual médio de usinas solares por calha parabólica

Item	Eficiência (%)
Óptico	56,3
Térmico	85,8
Tubulação	98,4
Bloco de potência	35,5
Campo solar	98,7
Total (%)	16,6

Fonte: (GIOSTRI, 2012)

A melhora de rendimento em usinas solares heliotérmicas, mesmo quando integradas ao armazenamento de energia térmica, estão sujeitas à partida e aos desligamentos intermitentes devido à variação da radiação solar ou ao início da operação diária. Para maximizar o desempenho é essencial a melhora dessas operações intermitentes no sistema de produção de vapor e da turbina a vapor (FERRUZZA, 2016).

Vários estudos relataram o efeito da acumulação de poeira em dispositivos solares em regiões semi-áridas e áridas. De acordo com o Solar Power World, 40 % da conversão de energia solar diminui devido a uma camada de poeira de 4 g/m² (HUNTER, 2014).

Outro estudo de campo realizado foi o efeito da acumulação de poeira em coletores solares de tipo tubo flutuante evacuado instalado nos Emirados Árabes Unidos, que obtiveram redução de 70 % no desempenho do coletor (EL-NASHAR, 1994).

4.3. Custos

O potencial de redução de custo total para o campo da calha parabólica é estimado em 23,5 %, exceto para o sistema HTF (exceto fluidos de transferência).

Tabela 30: Custo de implementação atual e futuro para o campo de calha parabólica

Campo solar calha parabólica	Custos 2015 (US\$/m ²)	Custos 2025 (US\$/m ²)	Variação (%)
Preparação de terreno	25	20	-20
Estrutura do coletor	66	52	-20
Fundação	22	18	-20
Motores	7	5	-20
Espelhos	22	19	-15
Receptor	27	19	-30
Cabeamento	4,2	3,7	-10
Fluido de transferência	21	3	-88
Sistema fluido de transferência	38	38	0
TOTAL (\$)	231	177	-23,5

Fonte: (DLR, 2016)

O custo para o sistema de armazenagem com campo de calha parabólica, tende a diminuir devido a novos desenvolvimentos no sistema de armazenagem e no aumento da temperatura de operação do sal fundido, com a pesquisa de novas misturas. Estima-se que a redução de custos de armazenagem chegará a 38 % em 2025.

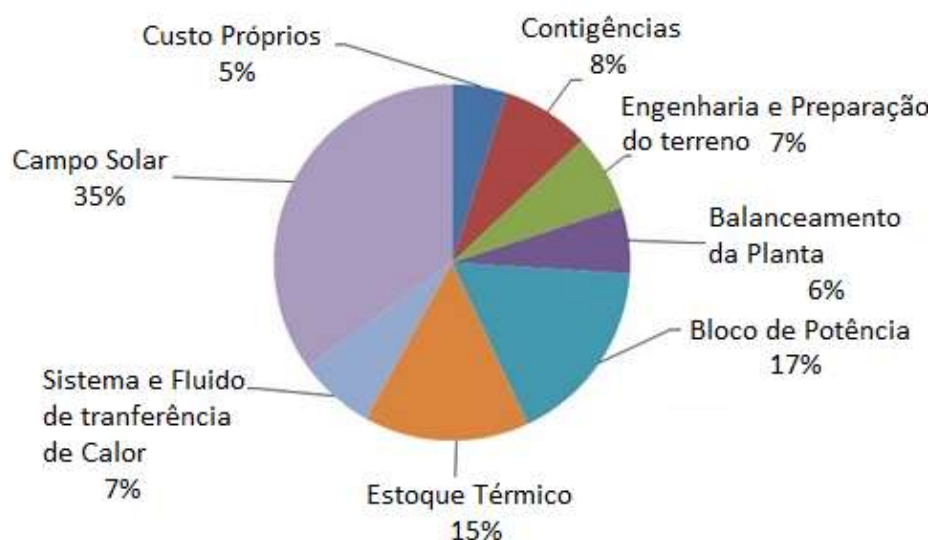
Tabela 31: Custo de implementação atual e futuro de armazenagem em usina solar por calha parabólica

Sistema de armazenagem Calha parabólica	Custos 2015 (US\$/kWh)	Custos 2025 (US\$/kWh)	Variação (%)
Estoque médio (fluidos)	23	11,6	-50
Tanques	12	10,8	-10
Bombas e trocadores de calor	5	1,8	-64
Controle do balanço de estoque	2	1,8	-10
TOTAL	42	26	-38

Fonte (DLR, 2016)

A tecnologia do bloco de potência é madura e o potencial de redução de custos é baixo para os próximos 10 anos. Com 1.270 US\$/kW, o bloco de energia para sistemas de torre for 50 US\$/kW mais caro do que para sistemas de torre solar central, em 2015, devido à menor temperatura e ao nível de pressão. Em 2025, os custos são estimados em 1.100 US\$/kW para ambas as tecnologias. Como exemplo, a divisão de custos de uma usina solar por calha parabólica de 100 MW, com a presença do sistema de armazenamento, pode ser observada na Figura 85 (IRENA, 2018).

Figura 82: Divisão percentual do custo de implementação de usina solar por calha parabólica



Fonte: (IRENA, 2018)

A Tabela 32 apresenta os valores de algumas usinas solares por calha parabólica existentes no mundo em conjunto com sua relação de custo por MW instalado.

Tabela 32: Comparação de custos de implementação de usinas solares por calha parabólica

Empreendimento	Ano	País	Investimento (US\$)	Investimento (R\$)	Potência (kW)	R\$/kW Instalado
Golmud	2018	China	*807.000.000	2.582.400.000	200.000	12.900
Xina Solar One	2016	Afr. do Sul	*880.000.000	2.816.000.000	100.000	28.160
Solana ¹	2010	Est. Unidos	1.000.000.000	3.200.000.000	280.000	11.430

Fonte: (CSPWORLD, 2018) e ¹ (NREL, 2018a)

O custo de operação e manutenção pesquisados e apresentados na Tabela 30 foram baseados no levantamento da (IRENA, 2018).

Tabela 33: Custos de operação e manutenção de usinas solares por calha parabólica

US\$/kWh Ano	R\$/kWh Ano
0,02 a 0,03	0,064 a 0,096

Fonte: (IRENA, 2018)

4.4. Potencial de Geração

O potencial das usinas geradoras de energia elétrica solar heliotérmica comercial no Brasil é enorme, devido à isolação presente no país (EPE, 2016), conforme informações consolidadas no Tabela 34.

Tabela 34: Potencial de geração por calha solar parabólica no Brasil

	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro Oeste	Sul	BRASIL
Calha Parabólica sem armazenamento						
Potência (GW)	5.055	151.098	39.357	103.460	47.895	346.000
Eletricidade (GWh)	9.110	284.696	62.488	166.780	79.686	602.761
Calha Parabólica com armazenamento de 6h						
Potência (GW)	2.305	78.891	15.212	49.625	20.566	166.000
Eletricidade (GWh)	7.470	269.928	46.044	150.634	63.941	538.016

Fonte: (GIZ, 2014)

Devido à pouca utilização das tecnologias heliotérmicas e com o incentivo à utilização de geração por fontes renováveis, em 2014, o governo alemão por meio do *Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) levantou o potencial da geração heliotérmica por calha parabólica no Brasil (GIZ, 2014), por região. Esse estudo considerou usinas com armazenamento de seis horas e meia.

4.5. Preço de Venda de Eletricidade

O preço de venda da energia heliotérmica é comum entre as várias tecnologias de geração e foi descrito no Item 3.5 desta dissertação.

5. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR REFLETOR LINEAR SOLAR FRESNEL

5.1. Características de Operação

Um estudo de caso para usina por refletor linear solar Fresnel (RLF) é a de Puerto Errado 2 (PE2), com 30 MW de capacidade, construída pela Novatec Solar e em operação comercial na Espanha. O bloco de geração da PE2 tem superfície espelhada de 302.000 m², tornando-a a maior central térmica solar não operacional do mundo (não é híbrida).

A geração elétrica de 30 MW da PE2 é realizada exclusivamente por energia solar e produz 50 milhões de kWh de eletricidade por ano, que equivale a uma redução de emissões de dióxido de carbono de mais de 16.000 t, gerando energia suficiente para alimentar 12.000 lares espanhóis (NOVATEC, 2012).

Figura 83: Usina por refletor solar Fresnel de Puerto Errado 2 (PE2)



Fonte: (INDUSTRIAL, 2018)

O desempenho básico da usina Puerto Errado 2 pode ser observado na Tabela 35.

Tabela 35: Desempenho básico da usina de Puerto Errado 2 (PE2)

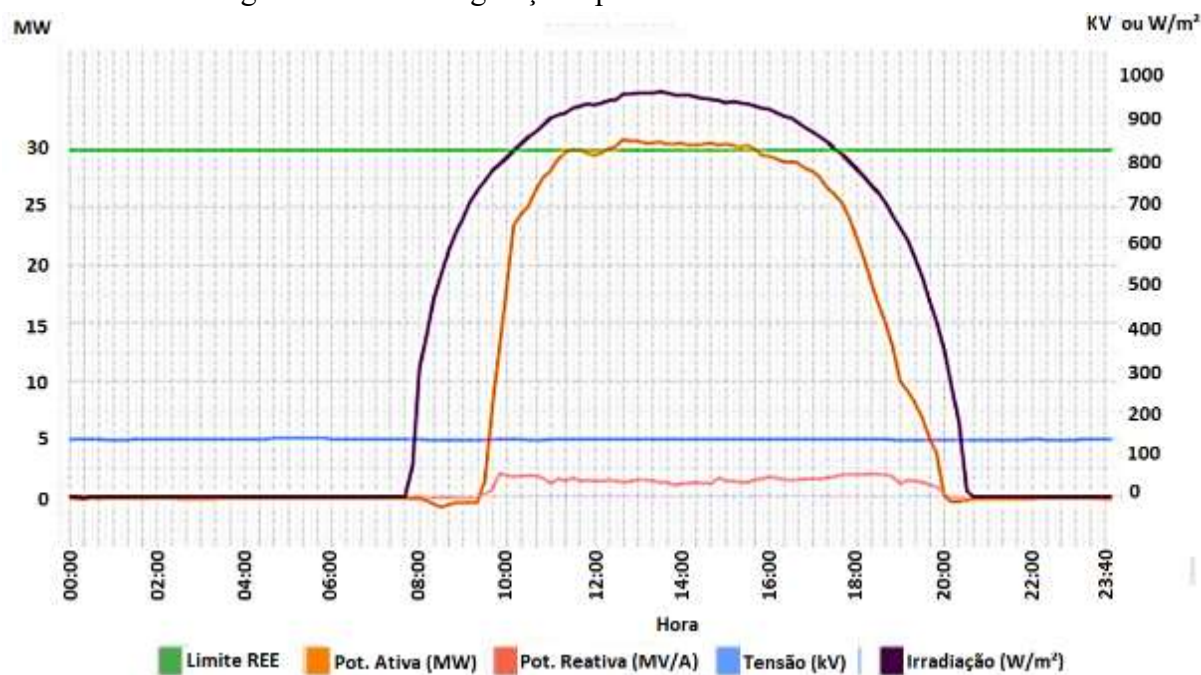
Item	Característica
Fabricante	Novatec Solar
Produto	Nova-1
Modelo	28 fileiras de refletores 2 turbogeradores 15W GE
Comprimento do campo solar	1.000 m
Área de reflexão	302.000 m ²
Geração de vapor	Direta (sem estoque de calor)
Temperatura operacional	270 °C
Pressão operacional	55 bar
Pico de saída térmica	150 MW _t
Pico de saída elétrica	30 MW _e
Geração anual	49 GWh/ano

Fonte: (HELIOCSP, 2016)

A Novatec Solar, projetista de Puerto Errado 2, é uma fornecedora global de caldeiras solares *turnkey* de baixo custo. Está baseada em *Karlsruhe*, na Alemanha. O foco dessa empresa é a produção, o desenvolvimento, a implementação e a operação de caldeiras solares baseadas na tecnologia de coletores Fresnel.

A Figura 87 apresenta os ciclos de geração de potência elétrica em função da irradiação solar disponível em um dia típico para a usina de Puerto Errado 2.

Figura 84: Ciclo de geração típico da usina de Porto Errado 2



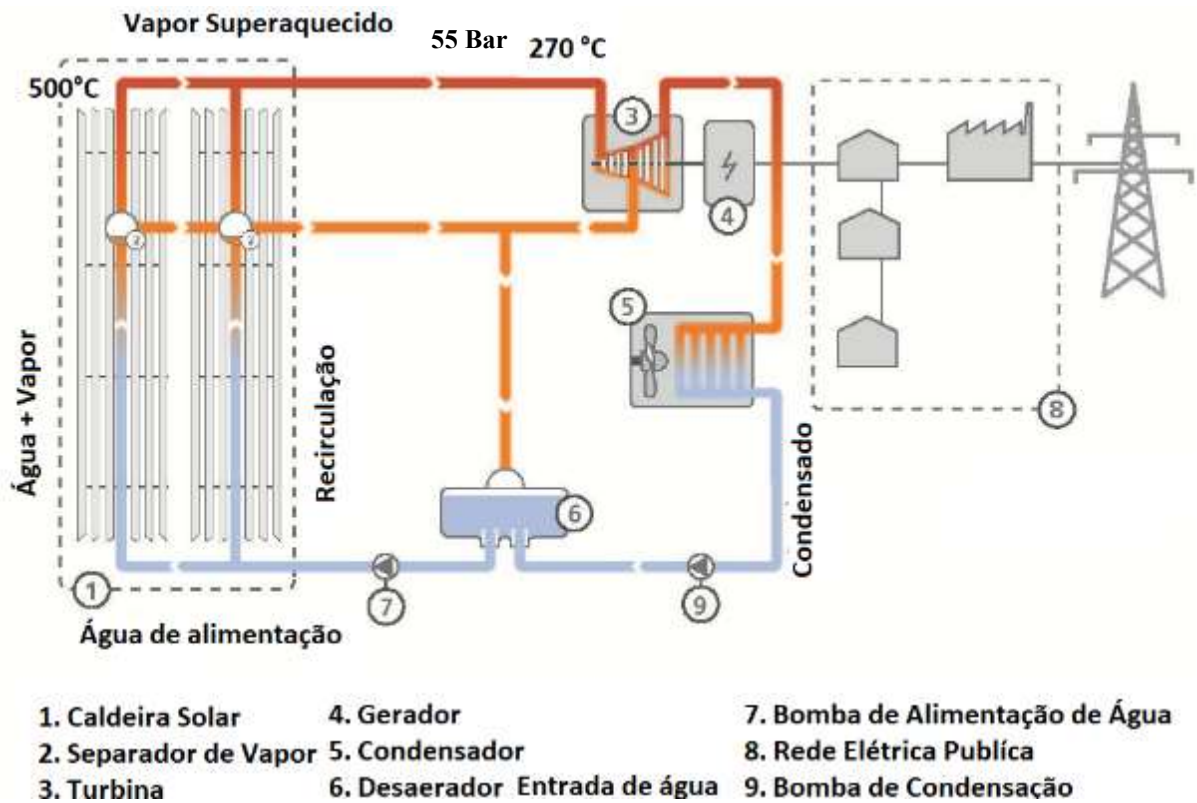
Fonte: (BASILDO, 2016)

É possível observar que essa usina não tem geração noturna como as heliotérmicas que operam com estoque de calor. Ela começa a operar por volta das 9h30 devido aos procedimentos de partida com subida rápida na potência gerada, se mantendo relativamente estável até às 18h00, quando a geração decresce rapidamente (BASILDO, 2016).

A usina RFL de Puerto Errado 2, basicamente, funciona aquecendo água no bloco de geração, que é transformada em vapor superaquecido com potência de $150 W_t$, para alimentar o bloco de potência que tem duas unidades turbogeradoras de $15 MW_e$. A usina está conectada à rede elétrica espanhola desde 2012. Condensadores refrigerados a ar são usados para recircular a água de volta para a caldeira solar, a fim de conservar a água, que é valiosa na região árida onde se encontra a usina (HELIOCSP, 2016).

A Figura 88 apresenta o esquema de geração da usina e seus componentes básicos, o bloco de potência com itens um e dois, também chamado de caldeira solar, o bloco de geração com os itens de três a sete, nove e a interligação à rede através do item oito (NOVATEC, 2012).

Figura 85: Comparação entre concentradores linear Fresnel e parabólico



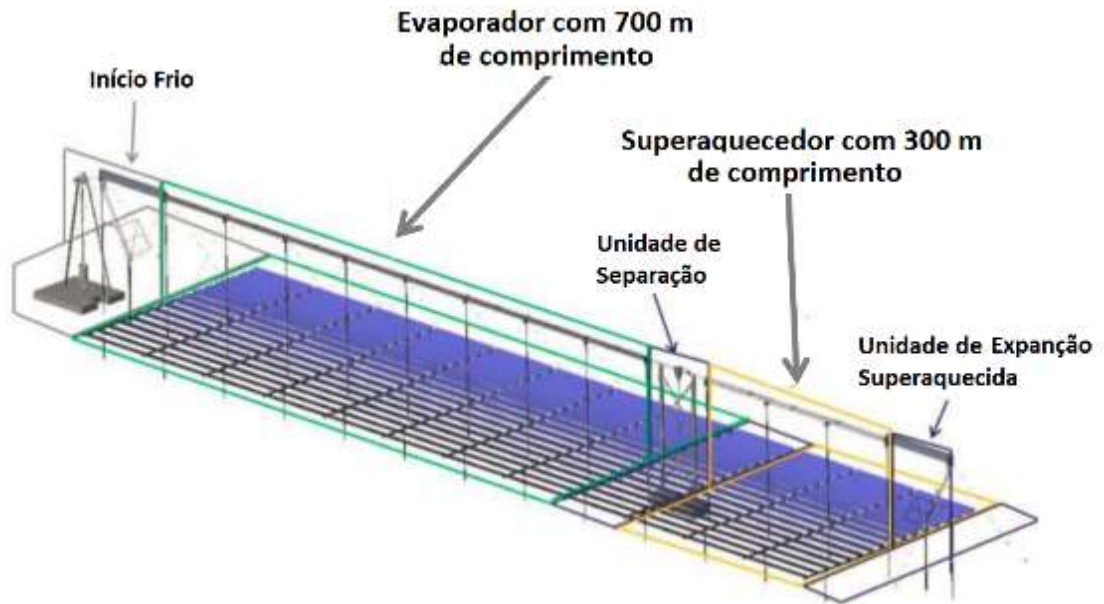
Fonte: (NOVATEC, 2012)

Puerto Errado 2 não utiliza estoque de calor, ou seja, a geração de energia térmica no bloco de geração é diretamente consumida no bloco de potência pelos dois turbogeradores para a geração de energia elétrica e a interligação à rede externa, a chamada geração de vapor direta (NOVATEC, 2012).

Essa usina, também, se utiliza de um sistema de superaquecimento do fluido de transferência de calor (HTF). Primeiro a água fria é evaporada na linha coletores solares Fresnel de 700 m de comprimento. Depois o fluido sai pela unidade de separação, onde é retirada toda água líquida ainda existente, logo em seguida o vapor remanescente é reinserido em uma segunda linha em série, com 300 m de comprimento, para se gerar o vapor superaquecido (NOVATEC, 2012). Portanto, a água de alimentação que é transportada através do tubo absorvedor é transformada diretamente em vapor saturado de até 285 °C e 70 bar, valores máximos definidos em projeto (HELIOCSP, 2011).

As duas linhas de evaporação e superaquecimento, que formam o bloco de geração em uma fileira, estão apresentadas na Figura 89 (NOVATEC, 2012).

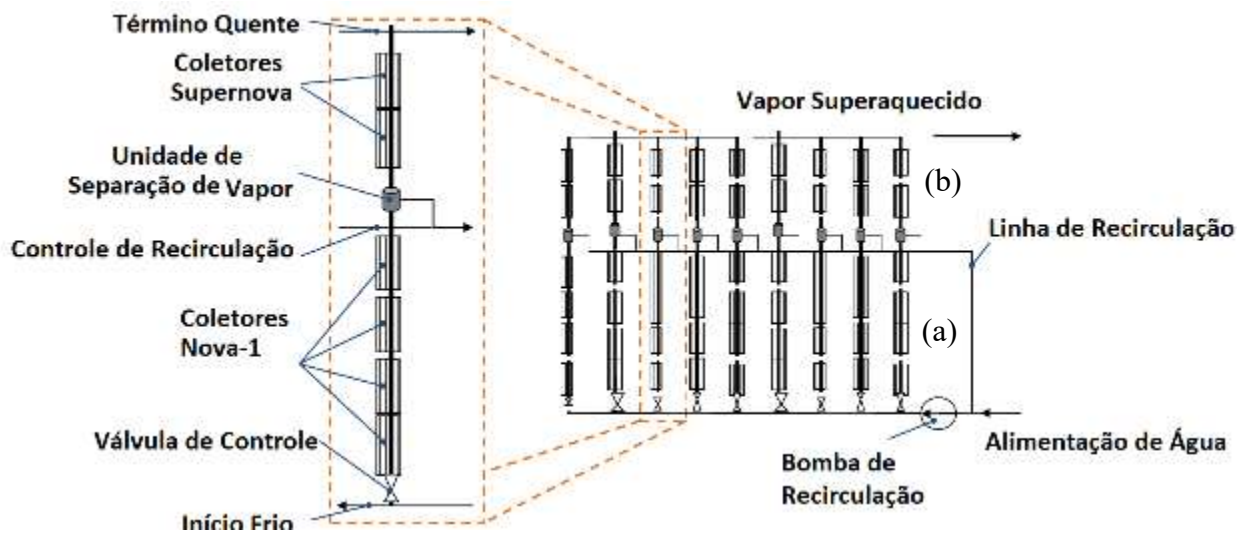
Figura 86: Esquema do bloco de geração da usina de Puerto Errado 2 (PE2)



Fonte: (NOVATEC, 2012)

A Figura 90 apresenta como o sistema de superaquecimento opera na planta. Esse processo funciona com blocos formados por linhas de coletores solares Fresnel na usina PE2, para transformar a água em vapor superaquecido.

Figura 87: Vista do bloco de geração da usina de Puerto Errado 2 (PE2)



Fonte: (NOVATEC, 2012)

O primeiro bloco aumenta a temperatura até transformar a água totalmente em vapor, recirculando e levantando a temperatura até quando necessário (a) e depois o segundo bloco para levantar mais a temperatura para se obter o vapor superaquecido (b) (NOVATEC, 2012).

O bloco de geração da PE2 consiste de 28 fileiras de refletores lineares solares Fresnel, com 15 de espelhos móveis cada uma, com aproximadamente 950 metros de comprimento. Esses espelhos são instalados a aproximadamente um metro acima do solo e refletem a luz do Sol em

um receptor localizado a oito metros do solo (NOVATEC, 2012). A Figura 91 dá a noção do comprimento do bloco de geração, principalmente, do tubo receptor.

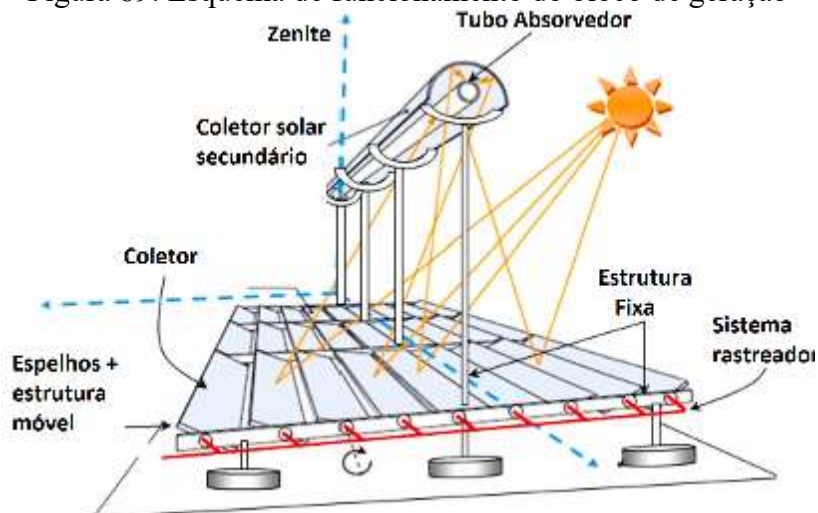
Figura 88: Bloco de geração da usina de Puerto Errado 2 (PE2)



Fonte: (BASILDO, 2016)

Os espelhos do bloco de geração são longos, estreitos e de baixa curvatura ou mesmo planos. São montados em esquema Fresnel, sobre estrutura própria e com ângulo variável controlado por sistema de controle automatizado de rastreamento. O coletor focaliza a luz solar em um receptor linear, formando um coletor secundário, e por um tubo absorvedor, que é posicionado acima do receptor, em distância focal apropriada, conforme apresentado na Figura 92 (AJDAD, 2019).

Figura 89: Esquema de funcionamento do bloco de geração



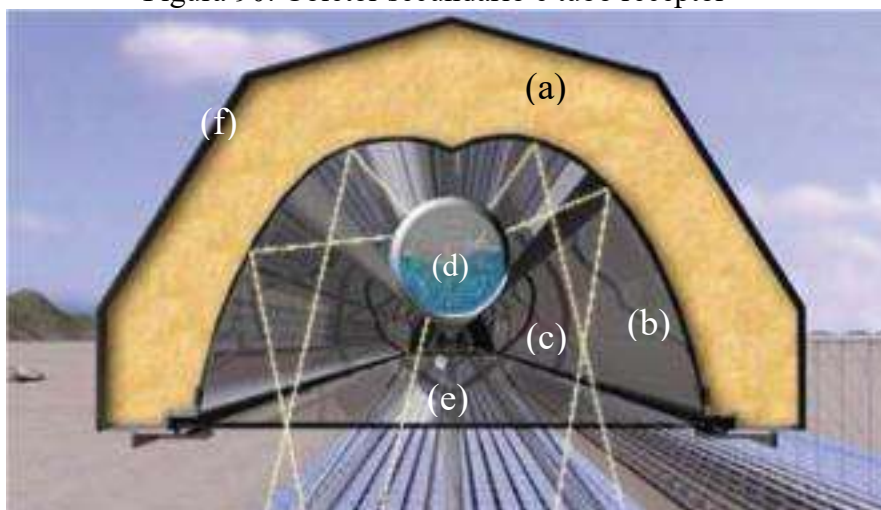
Fonte: (AJDAD, 2019)

O interior do tubo absorvedor contém fluido de transferência de calor (HTF), que pode ser água, óleo ou mesmo sal fundido em alguns projetos. No caso de Puerto Errado 2 foi utilizado sal fundido devido às altas temperaturas de operação. No sistema de persiana do coletor, toda a estrutura gira em torno de um eixo coincidente para cada fila de espelhos. Isso significa que os espelhos e o coletor estão conectados mecanicamente, exigindo mancais através dos quais o tubo do coletor deve passar para que exista atuação do sistema de rastreamento

solar. No sistema de Fresnel, as fileiras de espelhos giram para rastrear o Sol, o que também permite o controle individual de cada espelho, efetivamente alterando a configuração do refletor para otimizar sua função (HELIOCSP, 2017).

O coletor secundário é um pequeno espelho parabólico conectado à estrutura, para melhorar ainda mais a absorção da radiação solar, e internamente encontra-se o tubo receptor, como apresentado na Figura 93.

Figura 90: Coletor secundário e tubo receptor

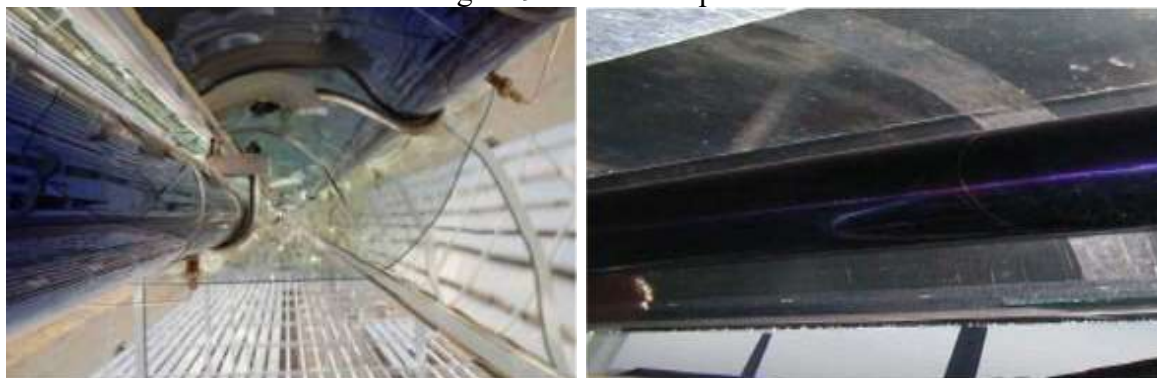


Fonte: (DLR, 2012b)

O coletor secundário é envolvido por isolamento térmico (a), película reflexiva (b), ar (c), tubo absorvedor metálico com vidro externo concêntrico (d), tampa de vidro tipo Pyrex (e) e revestimento em alumínio (f) (BELTAGY, 2017).

O tubo absorvedor tem tecnologia muito similar à da calha solar parabólica, apresentada nas Figuras 92 e 93, porém não existe a presença de vácuo, sendo mais simples. A montagem interna do receptor secundário pode ser observada na Figura 94 (DLR, 2012b).

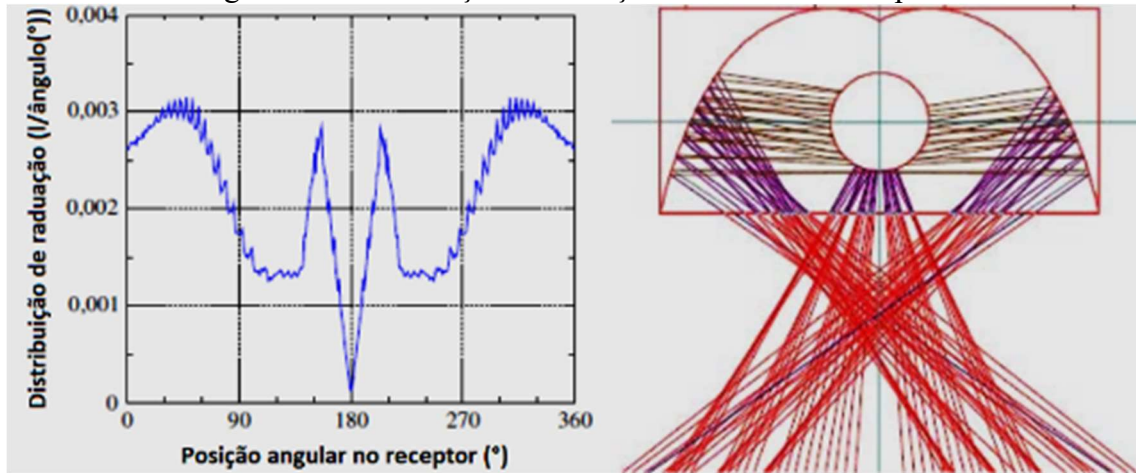
Figura 91: Tubo receptor



Fonte: (DLR, 2012b)

Existe uma variação da radiação incidente no coletor secundário e no tubo receptor em função do ângulo dos espelhos do coletor que pode ser observada no gráfico e no esquema vistos na Figura 95.

Figura 92: Distribuição de radiação solar no tubo receptor

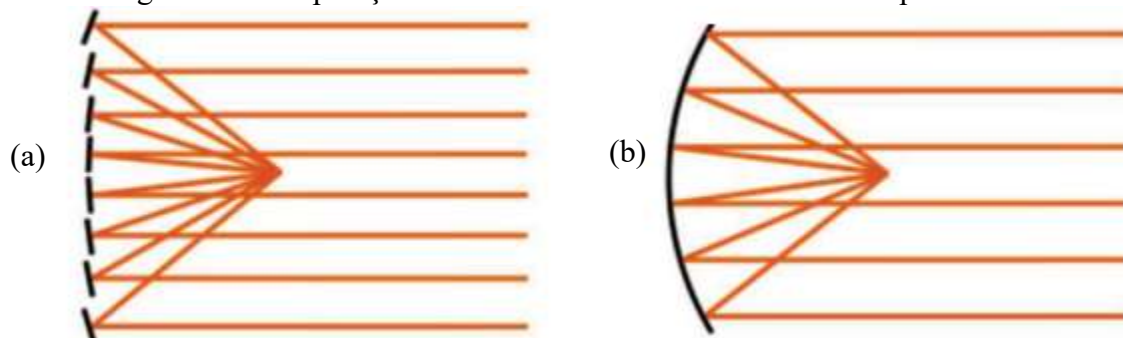


Fonte: (DLR, 2012b)

Utilizando-se a referência de ângulo de 0° como o de chegada ao receptor pela parte de baixo, é possível observar que para os ângulos de 45° aproximados, olhando a chegada dos raios emitidos pela esquerda do coletor, é máxima. Seguindo-se em sentido horário, por volta de 140° , no mesmo vale, existe um segundo pico de radiação que chega ao receptor. De forma similar, a radiação refletida pelo coletor pelo lado direito, refletida no coletor secundário, cria dois picos, ou seja, a radiação absorvida no receptor é variável e a 180° é inexistente (DLR, 2012b).

Os sistemas do coletor linear solar Fresnel têm como objetivo oferecer custos gerais mais baixos, compartilhando um receptor entre vários espelhos (Figura 96(a)), diferentemente dos conceitos de calha solar parabólica e de disco solar parabólico, que têm espelho único (Figura 96(b)). Coletores lineares Fresnel aplicam a geometria mais simples, onde a reflexão ocorre em linhas de vários espelhos, porém em somente um eixo de rastreamento solar, construídas perto do solo e com formato plano. Esse tipo de projeto se assemelha ao da usina com calha solar parabólica, porém diferentemente da filosofia das torres solares centrais e dos discos solares parabólicos, que têm rastreamento por eixo duplo (HELIOCSP, 2017).

Figura 93: Comparação entre concentradores linear Fresnel e parabólico



Fonte: (HELIOCSP, 2017)

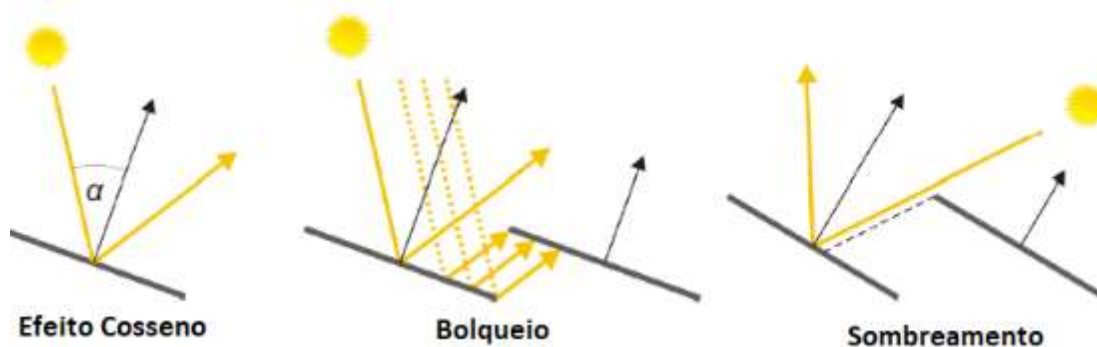
Como o receptor é estacionário, não são necessários acoplamentos no fim de cada linha térmica do tubo absorvedor, como seria necessário em sistema de calha ou de disco solar, que operam em formato de *loops*. Os espelhos também não precisam suportar o peso do receptor, por isso são estruturalmente mais simples. Quando são utilizados métodos de focagem apropriados, com espelhos destinados a diferentes receptores, e em diferentes momentos do dia, pode haver um empacotamento de área reflexiva, e, portanto, redução do uso da terra.

A RLF Puerto Errado 2 não tem capacidade de geração noturna, como comumente acontece em usinas por calha solar parabólica e com torre solar central, que utilizam o processo de estoque de calor. Ela funciona dependendo diretamente da irradiação solar, gerando energia de forma variável, conforme o horário do dia e a estação do ano (NOVATEC, 2012).

Coletores lineares solar Fresnel têm desempenho de conversão de irradiação em calor como uma função das eficiências óptica e térmica. A eficiência óptica tem relação com a condição de pico de irradiação, ou seja, com o Sol alto em relação ao horizonte (ABBAS, 2016), onde acontecem perdas de astigmatismo, devido aos espelhos do coletor solar Fresnel não formarem uma parábola perfeita, para refletir a irradiação para o coletor secundário, fato que não acontece nos coletores solares parabólicos, devido à absorção de radiação pelos espelhos do coletor, devido à eficiência de reflexão, do sombreamento do coletor pelo receptor e pelo coletor secundário, da área molhada da superfície espelhada, que é menor do que nos coletores solares parabólicos e por fim as perdas laterais, devido à colisão dos feixes de irradiação com a lateral do coletor secundário.

Mas, também podem existir perdas ópticas na condição de irradiação baixa, ou seja, quando o Sol está em ângulo pequeno em relação ao horizonte (DLR, 2012b), conforme ilustrado na Figura 97. As perdas nessa situação podem ser do tipo sombreamento entre fileiras de espelhos do coletor, pelo bloqueio entre fileiras de espelhos do coletor e a perda por efeito cosseno, onde a posição dos espelhos do coletor variam através do ângulo α , o que diminui ou aumenta a reflexão, conforme o horário do dia.

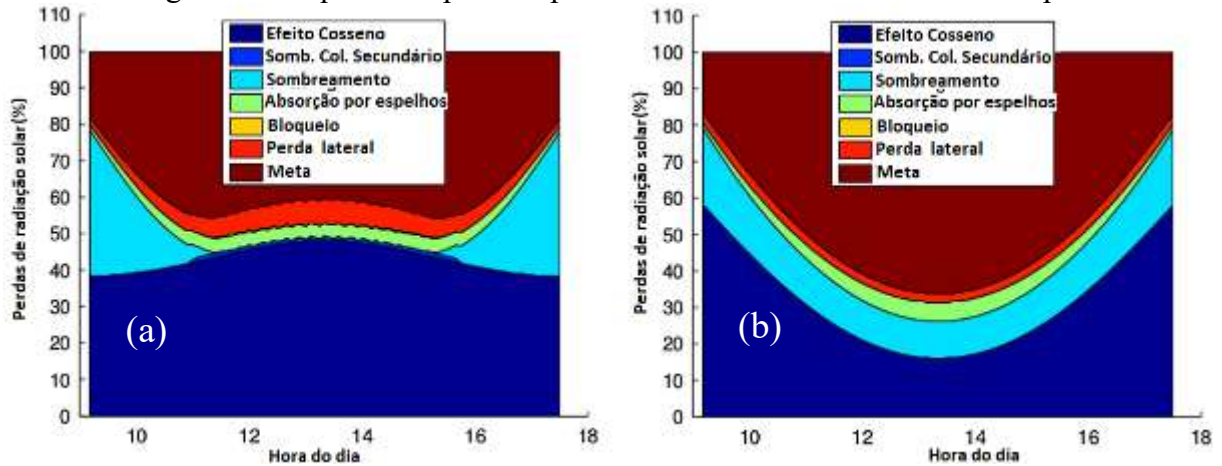
Figura 94: Esquema de perdas ópticas no coletor solar Fresnel



Fonte: (DLR, 2012b)

Um típico exemplo de campo de perdas ópticas em um módulo coletor solar Fresnel, medidas no deserto do Saara, podem ser observadas na Figura 98, para condições de solstício de verão no hemisfério sul, e, portanto, condição de maior irradiação, com orientação norte-sul do coletor (a), onde ocorrem os maiores valores de perdas ópticas devido à orientação do módulo.

Figura 95: Esquema de perdas ópticas no coletor solar Fresnel em campo

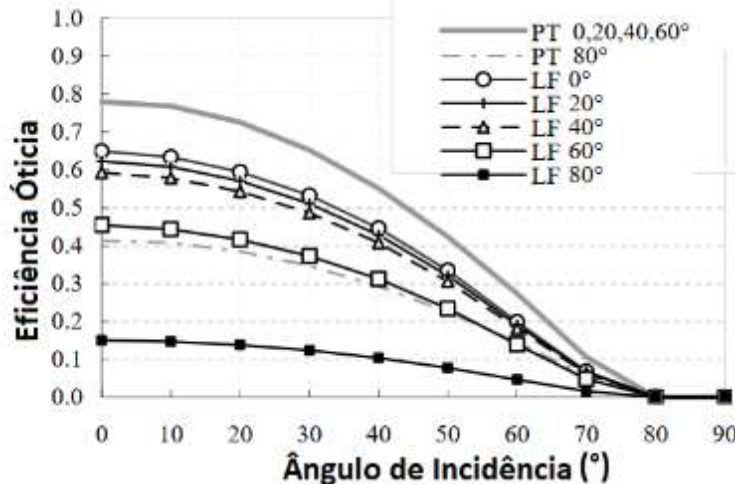


(ABBAS, 2016)

E, para orientação Leste-Oeste (b), onde ocorrem os menores valores de perdas, novamente devido à orientação do módulo. Nessas figuras, o item meta é a energia refletida pelo módulo solar Fresnel.

A Figura 99 apresenta o estudo de eficiência óptica realizada em campo pelo Instituto Aeroespacial Alemão (DLR) para duas tecnologias de concentradores solares, conforme aumento do ângulo de incidência. Com essa figura é possível concluir que a eficiência óptica dos coletores lineares solar Fresnel da empresa Novatec (LF), típicos da usina de *Puerto Errado 2*, é menor do que calhas solares parabólicas *EuroTrough* (PT), apresentadas na Figura 81 (HEIKO SCHENK, 2014).

Figura 96: Comparativo da eficiência dos coletores EuroTrough (PT) e Novatec (LF)

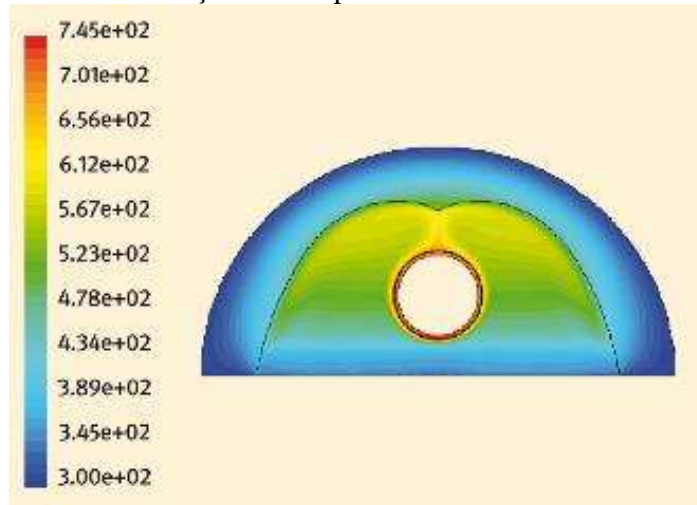


(HEIKO SCHENK, 2014)

As perdas térmicas do coletor secundário devem considerar mecanismos de transferência de calor típicos: radiação, convecção e condução, além da geometria geral dos elementos. Os principais parâmetros que são considerados no projeto são a emissão térmica do tubo absorvedor, o coeficiente de transferência de calor da tampa de vidro e o coeficiente de condutividade térmica do isolamento traseiro (HÄBERLE, 2002).

Uma análise experimental interessante é a de BINE (2013), que conseguiu simular o diagrama de temperatura de uma instalação com coletor secundário modelando em *Computing Fluid Dynamics* (CFD), aplicando-se o *software* ANSYS Fluent. Nota-se que a temperatura na superfície do tubo receptor alcança 745 K (470 °C).

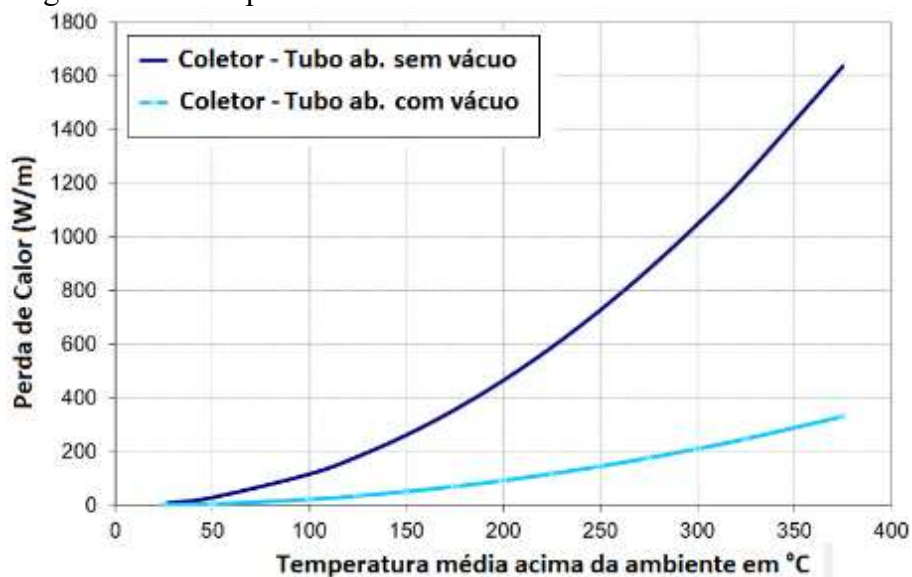
Figura 97: Distribuição de temperaturas no coletor secundário (K)



Fonte: (BINE, 2013)

As perdas térmicas totais de um coletor linear solar Fresnel foram levantadas pelo Instituto Aeroespacial Alemão (DLR), considerando o tubo absorvedor com e sem vácuo, independentemente do tipo do coletor utilizado (HÄBERLE, 2002).

Figura 98: Desempenho de um coletor linear solar Fresnel secundário



Fonte: (DLR, 2012b)

É possível notar a enorme perda de calor dos tubos absorvedores evacuados de ar, quando comparados com os que não o são (HÄBERLE, 2002).

O importante para a eficiência do sistema óptico, é que os espelhos da PE2 sejam limpos periodicamente para retirada de poeira. Para tanto, um sistema de limpeza automatizado é empregado para que o consumo de água e o esforço humano sejam reduzidos. A limpeza de espelho no sistema linear solar Fresnel é facilitada pela acessibilidade do equipamento (BASILDO, 2016).

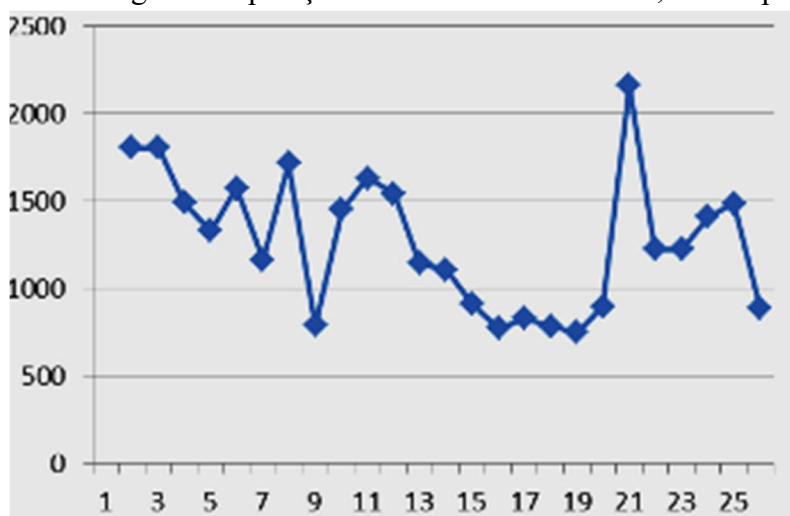
Figura 99: Limpeza dos espelhos da usina de Porto Errado 2



Fonte: (BASILDO, 2016)

O consumo de água de reposição da usina Porto Errado 2 chega a 2.000 m³ de água diários, com grande variação durante do mês, conforme demanda de sistemas e de limpeza dos espelhos. Tal variação pode ser observada na Figura 103.

Figura 100: Água de reposição da usina Porto Errado 2, em m³ por mês



Fonte: (BASILDO, 2016)

5.2. Potencial de Geração

Não existem estudos para usinas por refletor linear solar Fresnel para a realidade brasileira. Porém, devido à similaridade técnica com a geração por calha solar parabólica é possível admitir, por aproximação, que o potencial de geração é similar. Logo, os valores aproximados da potência de geração para o Brasil são os descritos na Tabela 36.

Tabela 36: Potencial de geração por usina por refletor linear solar Fresnel

	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro Oeste	Sul	BRASIL
Geração por refletor linear solar Fresnel						
Potência (GW)	5.055	151.098	39.357	103.460	47.895	346.000
Eletricidade (GWh)	9.110	284.696	62.488	166.780	79.686	602.761

Fonte: (GIZ, 2014)

5.3. Eficiência de Geração

Segundo HANI (2015), com parâmetros da NREL, uma usina linear de refletor solar Fresnel otimizada tem as eficiências na conversão da energia solar como listadas na Tabela 37.

Tabela 37: Eficiências de uma usina linear de refletor solar Fresnel

Eficiência	Parcela (%)
Útil anual óptica	62
Captura térmica	78
Ciclo (menos autoconsumo)	39
Eficiência global (anual integrado, de solar para eletricidade)	19

Fonte: (HANI, 2015)

5.4. Custos de Implementação

A principal vantagem das usinas por refletor linear solar Fresnel é que seu projeto é mais simples, com espelhos planos e receptores fixos, o que requer custos de investimento mais baixos e oferece uma ampla gama de configurações (HELIOCSP, 2017).

Um estudo de caso aplicável é o feito por HANI (2015), que realizou a estimativa de custos de implementação com dados da construção industrial padrão na Espanha, já que esse país é um dos principais geradores de energia heliotérmica no mundo, exceto para os tubos receptores, que são muito específicos.

Na Espanha existe uma dificuldade de utilização de aço estrutural, que tem um custo total, incluindo a montagem, de 5 €/kg, em aplicações industriais gerais, tornando-se caro para aplicação em instalações solares térmicas, conforme apresentado na Tabela 38.

Uma planta típica, necessita de 300 módulos com um comprimento total de 30 km, que faz um campo solar custar 105 milhões de euros. Com a instalação do bloco de potência e

dos demais equipamentos elétricos, os custos crescem para 500 €/kW_e, totalizando 40 M €. Também é necessário adicionar nos custos os valores de terreno, de engenharia, de licenças e de impostos, que pode, de forma estimada, chegar em 25 milhões de euros. No total, o investimento total chega a 170 M € (HANI, 2015).

Assim, alcança-se o custo específico de 2,15 €/W_e, que é uma boa meta para o desenvolvimento de uma usina linear de refletor solar Fresnel. Se a vida útil da usina for de 15 anos, o custo operacional pode ser de 11,33 M €/ano. E se utilizada por 2.200 horas de operação, a geração anual seria de 176.000 MWh e o custo operacional seria de 65 €/MWh (6,5 centésimos €/kWh) (HANI, 2015).

Tabela 38: Custo de implementação de módulo coletor solar Fresnel

Campo solar	Material	Custo €*1.000
Coletor - estrutura	Aço	100
Coletor - espelhos	Aço e espelhos	19
Receptor secundário	Vidro	19
Receptor - tubos	Aço inox	3,7
Rastreamento	Eletrônica	3
Tubulação externa	Aço	38
TOTAL (\$)	Coletor de 100 m	177

Fonte: (NREL, 2012)

Tabela 39: Comparação de custos de implementação de uma usina linear de refletor solar Fresnel

Empreendimento	Ano	País	Investimento (€)	Investimento (R\$)	Potência (kW)	R\$/kW Instalado
ELLO	2018	França	60.000.000	240.000.000	9.000	26.700
URAT ¹	2018	China	191.880.000	767.520.000	50.000	15.350
Puerto Errado 2	2013	Espanha	80.610.000	322.440.000	30.000	10748

Fonte: (NREL, 2018a) e ¹(YANG, 2018)

5.5. Preço de Venda da Energia Elétrica

O custo total da eletricidade gerada por uma usina linear de refletor solar Fresnel inclui a operação e manutenção, incluindo substituições de componentes, que é da ordem de 20 % do custo fixo, totalizando 80 €/MWh, que está perto de competir com fontes clássicas de geração de eletricidade (HANI, 2015).

Tabela 40: Preço internacional de venda de energia

	€/MWh	R\$/MWh
Fixo	80	320

Fonte: (HANI, 2015)

6. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA POR DISCO PARABÓLICO E MOTOR STIRLING

Existem poucas usinas heliotérmicas por disco solar parabólico comerciais no mundo (NREL, 2018a), sendo que a maior usina é a de Maricopa, no deserto do Arizona, que foi descomissionada em 2011. Para este trabalho, aprofundar-se-á nos concentradores por disco solar parabólicos atuais e em seu desempenho. Com isso, é possível a verificação do desempenho desse tipo de geração para sua eventual utilização na geração de energia elétrica no Brasil.

6.1. Concentrador Disco Solar Parabólico EuroDish

Um estudo de caso típico é o concentrador solar parabólico da empresa EuroDish, que vem sendo desenvolvido durante a última década.

Figura 101: Concentrador solar parabólico da EuroDish



Fonte: (SBP, 2018)

O desempenho básico do concentrador com disco solar parabólico EuroDish pode ser observado na Tabela 41.

Tabela 41: Desempenho do concentrador com disco solar parabólico EuroDish

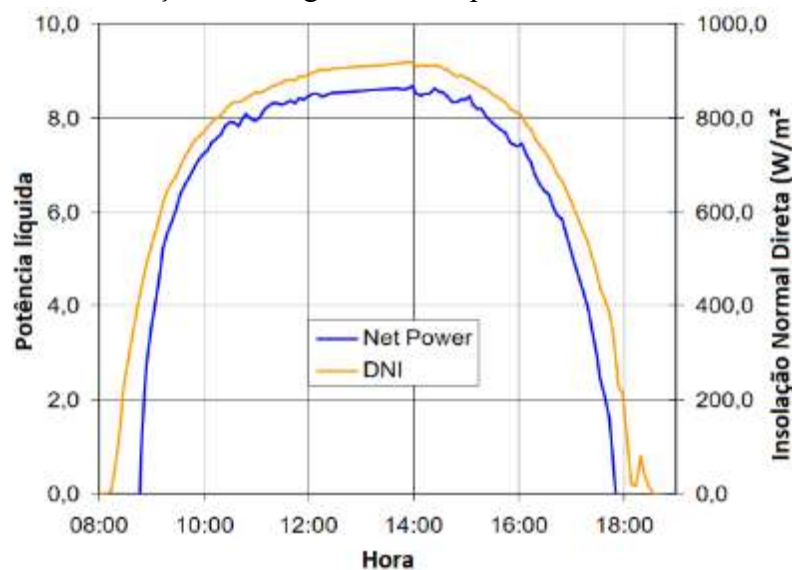
Concentrador		Motor Stirling	
Item	Característica	Item	Característica
Diâmetro	8,5 m	Tipo	90 ° em V
Área projetada	56,7 m ²	Cilindrada	160 cm ³
Distância focal	2.500	Potência bruta	9 kW _e
Media de concentração solar	2.500	Potência líquida	8,4 kW _e
Reflexibilidade	94 %	Grid	400 V, 50 Hz
Velocidade máxima do vento	65 km/h	Temperatura do receptor	650 °C
Velocidade de giro	60 °/min	Gás de trabalho	Hélio - 20 a 150 bar

Fonte: (BERGERMANN, 2001)

6.1.1. Geração De Energia Elétrica

A características típicas de geração estão apresentadas na Figura 105. Como resultado das limitações da qualidade reflexiva do disco óptico, os valores de desempenho ainda estão abaixo do desejado. Em um futuro próximo, os sistemas serão convertidos para o uso de hidrogênio como gás de trabalho, em vez de hélio, e espera-se atingir os valores desejados. Os sistemas da EuroDish vêm funcionando de forma totalmente automática, sete dias por semana, no deserto do Saara, na Argélia, com uma disponibilidade técnica de 90 a 95 %.

Figura 102: Geração de energia elétrica típica do concentrador Eurodish



Fonte: (KECK, 2001)

6.1.2. Descrição dos sistemas

O concentrador consiste em 12 segmentos simples manufaturados em composto de fibra de vidro em segmentos que formam uma concha parabólica quase perfeita. A Figura 106 apresenta como os segmentos são fixados na estrutura. A estrutura é reforçada por uma treliça tipo anel (b); os rolamentos de elevação e os suportes do motor Stirling são fixados. Espelhos de vidro fino, 0,8 mm de espessura (a), são colados sob os segmentos, a fim de se obter uma alta refletividade durável de cerca de 94 % (DLR, 2012c). A Figura 107 descreve os principais componentes do sistema.

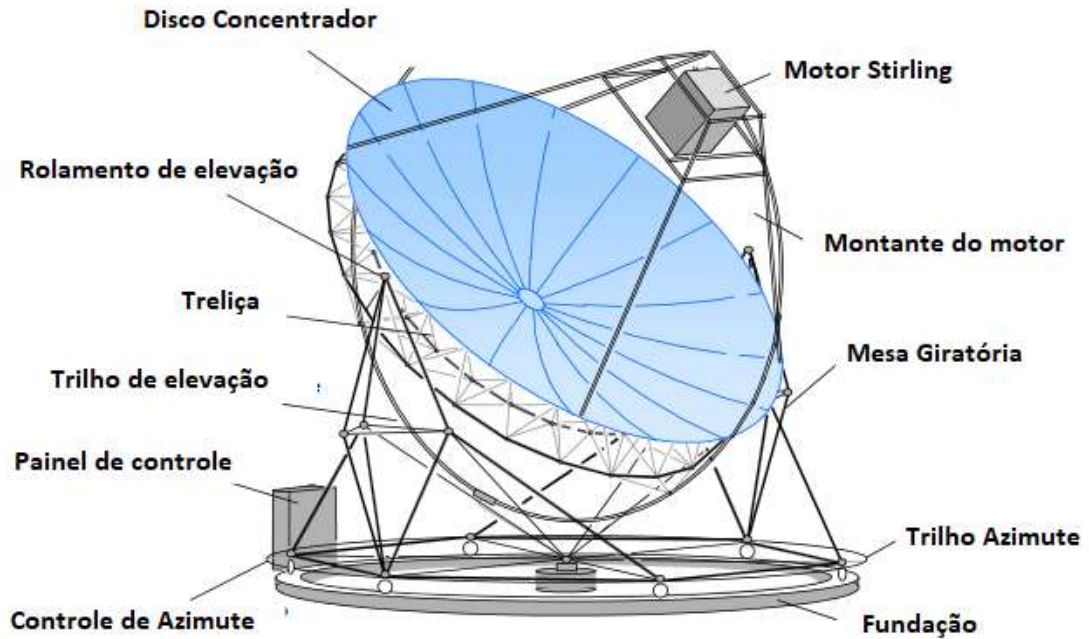
Figura 103: Montagem do concentrador EuroDish



Fonte: (DLR, 2012c)

O sistema de rastreamento de dois eixos, orienta o concentrador para o Sol e é controlado por um sensor de rastreamento solar em conjunto com um programa computacional, que prevê o posicionamento de acordo com a melhor irradiação. Para tanto, uma simples construção em aço, móvel e sobre seis rodas foi desenvolvida, possibilitando movimentação horizontal pelo trilho de azimute e vertical pelo trilho de elevação (SAYMA, 2013).

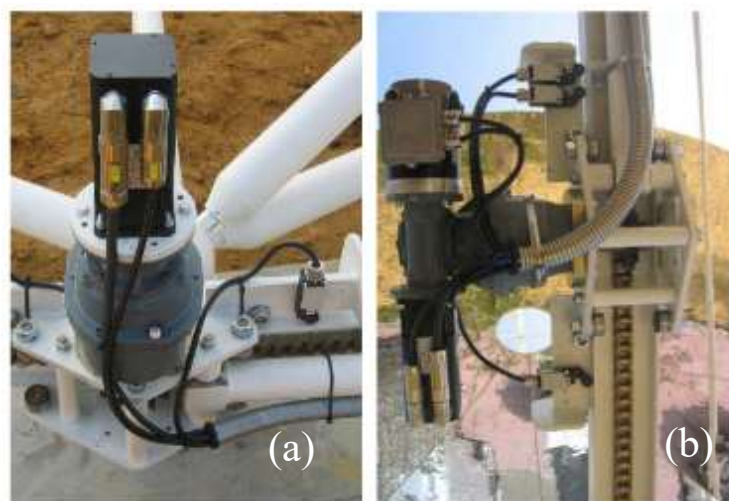
Figura 104: Principais componentes do sistema do concentrador EuroDish



Fonte: (PETER HELLER, 2012)

A orientação da concentração é feita por um pequeno servomotor apresentado na Figura 108, sendo (a) aquele que faz o posicionamento de azimute e (b) o posicionamento de elevação. A orientação para o Sol é determinada por um sensor de rastreamento solar ou um programa de computador, que prevê a posição do Sol (PETER HELLER, 2012).

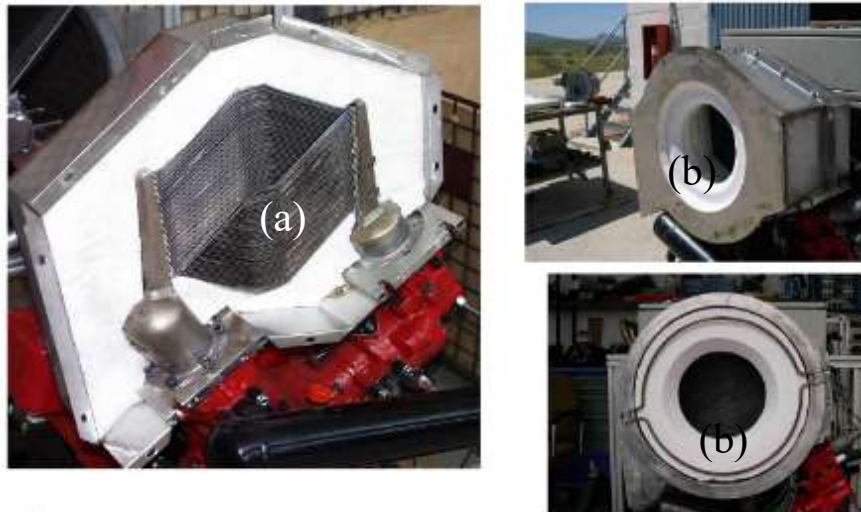
Figura 105: Servomotores



Fonte: Fonte: (PETER HELLER, 2012)

O receptor consiste de tubos muito finos, de aproximadamente 3 mm de diâmetro, em formato específico para otimizar a troca de calor e resistir a temperaturas muito altas, Figura 109 (a). Eles estão envolvidos em área de isolamento térmico cerâmico, Figura 109 (b). Existe também uma cavidade onde a radiação solar passa. Com isso, a radiação solar concentrada aquece o gás hélio de trabalho para aproximadamente 650 °C (BERGERMANN, 2001).

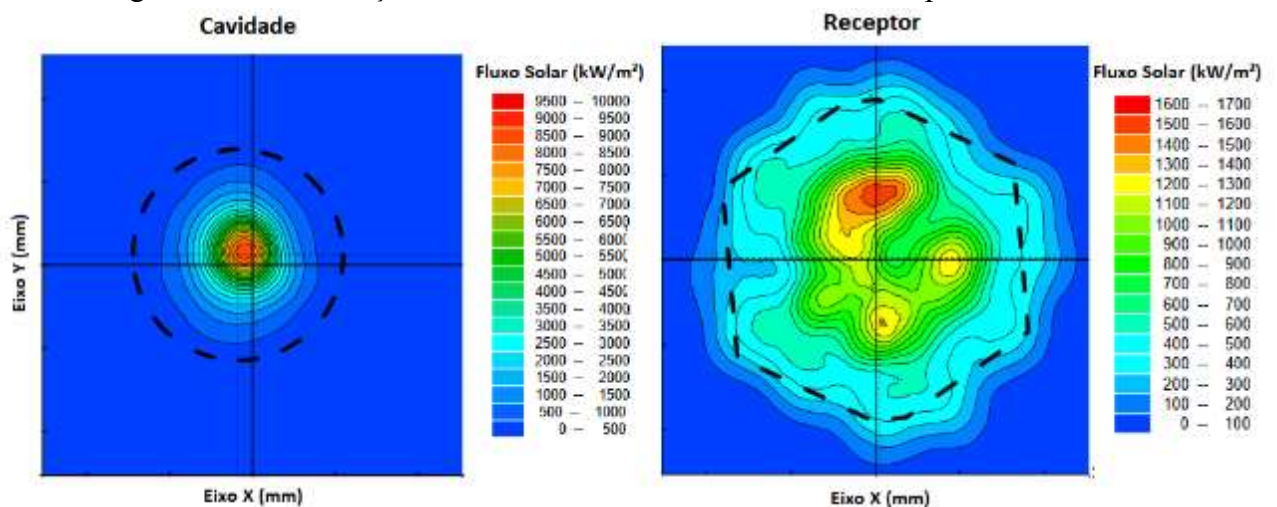
Figura 106: Receptor e isolamento térmico cerâmico



Fonte: (PETER HELLER, 2012)

A distribuição de calor na cavidade pode chegar a 10.000 kW/m² e nos tubos absorvedores 1.700 kW/m², segundo estudo de fluxo de calor realizado com CFD. A Figura 110 apresenta como esses fluxos de calor se desenvolvem em secção na cavidade e nos tubos receptores (SAYMA, 2013). É possível observar uma boa distribuição de calor devido à qualidade óptica dos espelhos concentradores (KECK, 2001).

Figura 107: Distribuição de fluxo de calor na cavidade e no receptor cerâmico

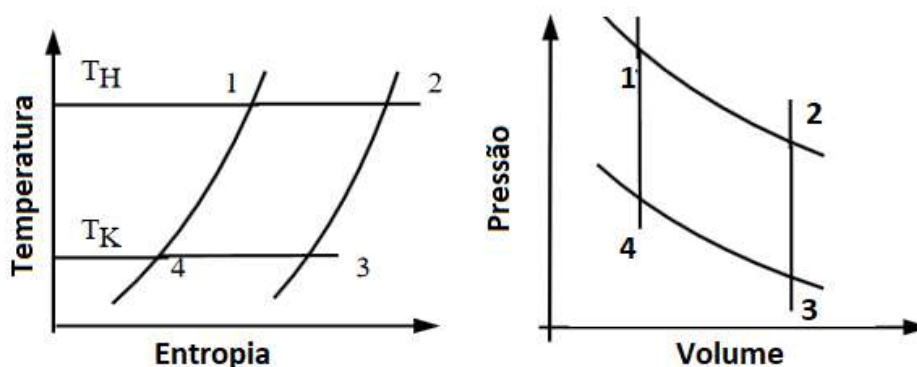


Fonte: (PETER HELLER, 2012)

O motor da EuroDish é a versão mais simples de um motor Stirling. Ele consiste em um sistema selado, com dois cilindros (cilindro de expansão e compressão) preenchidos com um gás de trabalho (hélio), Figura 111. Os pistões desses cilindros estão conectados a um virabrequim.

Se o gás de trabalho for aquecido pela irradiação solar no cilindro de expansão (cilindro de trabalho), ele se expandirá devido ao aumento da temperatura e vai empurrar o pistão para baixo, conforme apresentado na Figura 111 (1-2) e, assim, produzirá a potência (BERGERMANN, 2001).

Figura 108: Ciclos de expansão e de compressão do motor Stirling



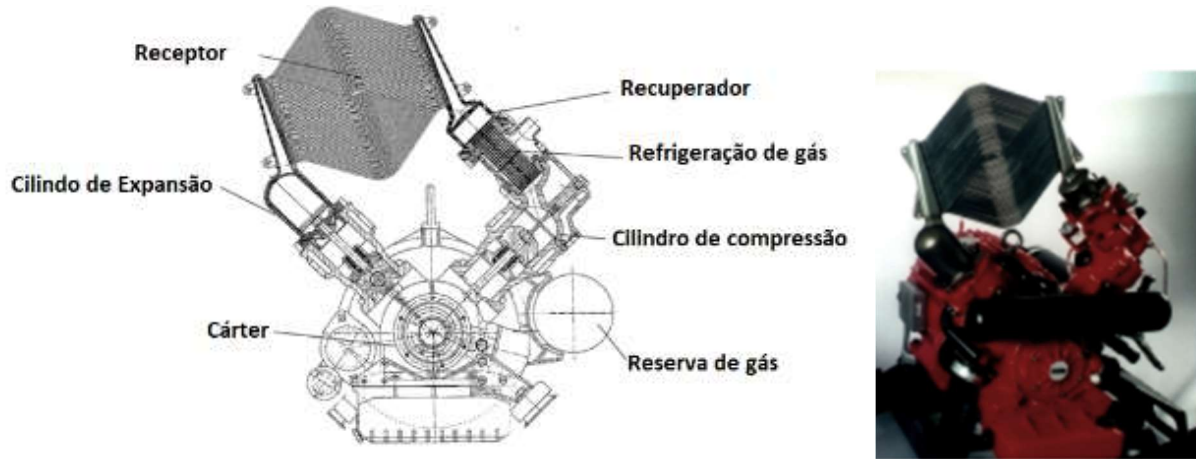
Fonte: (PETER HELLER, 2012)

Parte dessa potência é agora utilizada para empurrar o gás de trabalho quente, do cilindro de expansão para o cilindro de compressão (2-3). No caminho, o gás de trabalho passa por um recuperador, onde grande parte do calor é armazenado e também através de um resfriador de gás, refrigerado a água, onde será resfriado em níveis mais baixos (2-3) (BERGERMANN, 2001).

Uma vez completada a compressão, esse pistão do cilindro de compressão retornará, devido à inércia do virabrequim, e o gás de trabalho é comprimido a baixa temperatura (3-4). Ao reabsorver o calor armazenado no recuperador, o gás é empurrado de volta para o cilindro de expansão (4-1).

Em termos gerais, a expansão do gás quente no cilindro de expansão produz mais energia do que a necessária para a compressão do gás frio no cilindro de compressão. Esse excedente de energia pode ser usado para operar um gerador elétrico que é diretamente ligado ao virabrequim do motor (BERGERMANN, 2001).

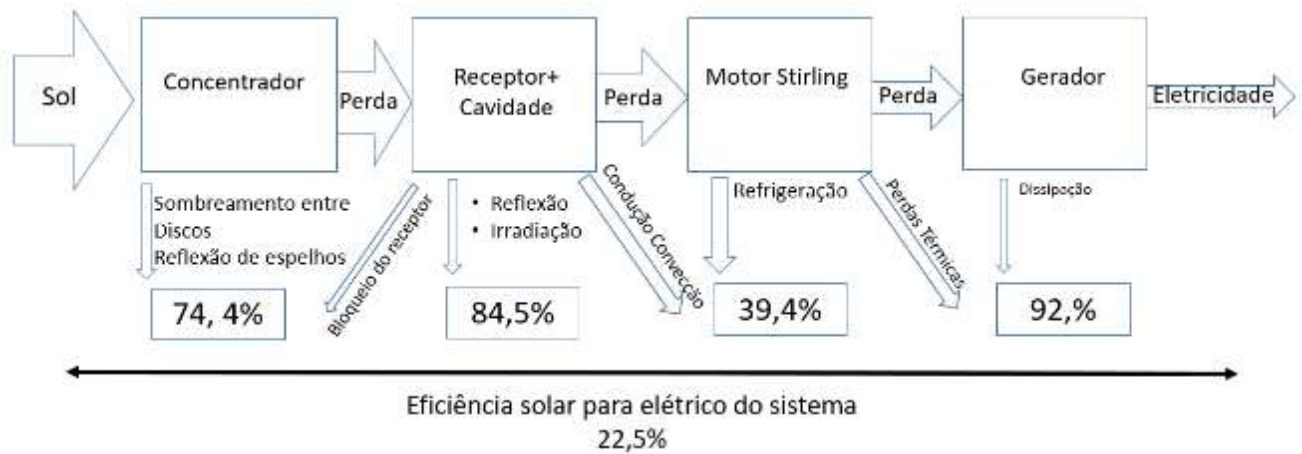
Figura 109: Estema e foto do motor Stirling com tubo receptor



Fonte: (DLR, 2012c)

As perdas de geração no concentrador EuroDish são tecnicamente similares a outras gerações heliotérmicas e podem ser observadas na Figura 113. A eficiência da conversão solar em elétrica é da ordem de 22,5 %.

Figura 110: Perdas do sistema de geração solar EuroDish



Fonte: (PETER HELLER, 2012)

6.1.3. Usinas e Concentradores Disco Solar Parabólicos de Referência

Um ótimo apanhado do que é a tecnologia de disco solar parabólico é apresentado no artigo “Dish Systems for CSP”, publicado em 2017, pelo laboratório do governo americano Sandia, onde todos os tipos de concentradores desenvolvidos no mundo são apresentados (SANDIA, 2017). Porém, nenhum equipamento descrito tem real utilização comercial ficando no âmbito da demonstração tecnológica e de pesquisa.

As usinas que utilizam concentradores solares parabólicos, normalmente, assim como as que os desenvolvem, são demonstradoras de tecnologia. Neste capítulo, foram selecionadas cinco unidades geradoras para levantamento de tabela comparativa, três mais antigas, conforme levantamento da DLR (BERGERMANN, 2001), e duas mais atuais, que foram desenvolvidas na última década, como exemplos. O intuito é conhecer a evolução da tecnologia de geração por disco solar parabólico, que ainda é considerada experimental.

Uma das primeiras usinas piloto foi a de Almería, com concentradores SBP, que foi idealizada pela empresa de projeto alemã *Schlaich Bergermann Partner* (SBP), em 2001, com apoio de vários institutos de pesquisa alemães e espanhóis, para desenvolvimento da tecnologia de concentradores solares parabólicos. Os concentradores SBP também foram utilizados de forma experimental na Argélia, na Índia, na Alemanha e na Itália (KECK, 2001).

Figura 111: Concentradores SBP – Almería, Espanha



Fonte: (SBP, 2018c)

Uma iniciativa para pesquisa foi a do laboratório norte-americano Sandia, em Albuquerque, para desenvolvimento de um parque solar com concentradores de disco solar parabólico e motor Stirling, entre 1999 e 2002 (SANDIA, 2017). O parque solar é composto por dez concentradores WGA instalados na área de pesquisa do *National Solar Thermal Test Facility* (SANDIA, 2018).

Figura 112: Usina de concentrador WGA (Mod. 1) – Laboratório Sandia



Fonte: (MAPIO, 2018)

A usina solar piloto de Maricopa, em Peoria, no deserto do Arizona, foi construída em 2009 e inaugurada em 2010, pela empresa Tessera Solar, como uma seção de uma usina maior, para prova de conceito (POWER TECHNOLOGY, 2018). Utiliza 60 concentradores Boeing SES. Infelizmente, a usina foi descomissionada em 2011 devido a questões de ordem financeira (NREL, 2018a). Existe também outro parque solar com concentradores SES, no *National Solar Thermal Test Facility* (SANDIA, 2018)

Figura 113: Usina de concentrador SES - Maricopa



Fonte: (POWER TECHNOLOGY, 2018)

O concentrador solar experimental da 38 kW DS-CSP da empresa *Xiangtan Electric* é o mais novo sistema de grande porte, desenvolvido em 2018. O equipamento solar é enorme, com disco parabólico de 17,7 m de diâmetro. É uma das maiores iniciativas em concentrador de disco solar parabólico com motor Stirling da atualidade (YAN, 2017).

Figura 114: Concentrador de 38 kW DS-CSP - China



Fonte: (YAN, 2017)

O estado da arte em inovação tecnológica, em termos de concentradores solares com movimento em dois eixos, é o HelioBooster. Esse sistema é do tipo Fresnel, multifacetados, desenvolvidos depois de vinte anos de experiência em concentradores pela empresa de projeto alemã *Schlaich Bergermann Partner*. O concentrador HelioBooster não utiliza motor Stirling e sim uma nova tecnologia de geração por ar quente ou microturbina especialmente desenvolvida. Hoje, o sistema está em ensaio em Dimona, Israel (SBP, 2018c), desde 2011, pela empresa Heliofocus, onde uma usina piloto está em construção, e em Wuhai, na Mongólia, onde desde 2013 opera uma usina demonstradora com oito concentradores (SBP, 2018a).

Figura 115: Usina de concentrador HelioBooster –Mongólia



Fonte: (SBP, 2018a)

Enfim, a Tabela 42 apresenta a comparação entre cinco concentradores de referência, desenvolvidos entre 1999 e 2018, onde se pode observar a evolução tecnológica básica da geração por concentradores de disco solar parabólico.

Tabela 42: Comparação entre concentradores de disco solar parabólico

Item	SBP	WGA (Mod. 1)	SES	38 kW DS-CSP	HelioBooster
Introdução					
Projeto	<i>Shalich Bergman Partner</i> (a)	<i>Sandia Laboratory</i> (b)	<i>Boeing Company</i> (c)	<i>Xiangtan Electric</i> (d)	<i>Shalich Bergman Partner</i> (e)
Origem	Alemanha	EUA	EUA	China	Alemanha
Utilização	Argélia, Índia, Alemanha, Itália	EUA	EUA	China	Israel, Mongólia
Ano	1999	2000	2010	2017	2013
Concentrador					
Tipo	Parabólico	Parabólico	Aproximado parabólico	Parabólico	Fresnel
Nº de segmentos	12	32	82	164	219
Área de espelho (m ²)	60	42,9	87,7	204	493
Reflexibilidade (%)	0,94	0,94	0,91	17,7	0,94
Dimensão (m)	-	-	8,8 x 8,8	-	27,5 x .25,7
Diâmetro (m ²)	8,5	8,7	-	17,7	-
Peso (kg)	3.980	2.864	6.760	25.200	130.000
Distância focal (m)	4,5	5,45	7,45	9,49	14
Concentração (sóis)	12.730	11.000	7.500	-	-
Motor					
Modelo	STM 4-120	SES 4-95	SOLO 161	SOLO 161	-
Número de Cilindros	2	2	4	4	Unidade a ar quente
Cilindrada (cm ³)	160	160	380	-	(100 °C)
Fluido de trabalho	Hélio	Hidrogênio	Hidrogênio	Hidrogênio	ou Microturbina
Gerador	480 V trifásico	480 V trifásico	480 V trifásico	480 V trifásico	
Eficiência (%)	22,5	25	24	26,6	
Potência (kW _e)	10	10	25	38	130

Fonte: (a), (b) e (c) (MANCINI, 2003), (d) (YAN, 2017) (e) (SBP, 2018c)

6.2. Potencial de Geração

Não existem estudos para usinas por disco parabólico e motor Stirling para a realidade brasileira. Porém, devido à similaridade técnica com a geração por torre solar central é possível admitir, por aproximação, que o potencial de geração é similar. Logo, os valores aproximados da potência de geração para o Brasil são os vistos na Tabela 43.

Tabela 43: Potencial de geração por disco parabólico e motor Stirling

	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro Oeste	Sul	BRASIL
Potência (GW)	749	42.271	6.375	9.414	26.760	85.000
Eletricidade (GWh)	2.685	162.503	21.221	31.594	85.897	303.899

Fonte: (GIZ, 2014)

6.3. Eficiência de Geração

Segundo PETER HELLER (2002), com parâmetros da DLR, um concentrador por disco solar parabólico tem as eficiências na conversão da energia solar como listadas na Tabela 44.

Tabela 44: Eficiências do concentrador por disco solar parabólico

Eficiência	Parcela (%)
Concentrador	74,4
Receptor	84,5
Motor Stirling	39,4
Gerador	92,4
Eficiência global	22,5

Fonte: (PETER HELLER, 2012)

6.4. Custos de Implementação

Usinas de geração de energia elétrica solar por disco solar parabólico têm os custos de instalação como apresentados na Tabela 45.

Tabela 45: Custos de implementação do disco solar parabólico

Item	US\$/kW	R\$/kW
Concentrador	500	1600
<i>Receiver</i>	90	288
Motor	100	320
Gerador	40	128
Sistema de refrigeração	30	96
Eletroeletrônica	25	80
Prédios	125	400
Taxa de engenharia	149	477
Total	1.059	3.390

Fonte: (SAYMA, 2013)

A Tabela 46 apresenta os valores para o desenvolvimento completo de uma usina com concentrador por disco solar parabólico. Esses valores não são os de implementação comercial, pois o *status* desse tipo de tecnologia é experimental e por enquanto não é comercial.

Tabela 46: Comparação de custos de implementação de usinas por disco solar parabólico

Empreendimento	Ano	País	Investimento (US\$)	Investimento (R\$)	Potência (kW)	R\$/kW Instalado
Maricopa	2010	Est. Unidos	200 Milhões	640 Milhões	1.500	430.000

Fonte: (PHOENIX BUSINESS JOURNAL, 2010)

6.5. Preço de Venda da Energia

Como as usinas de geração de energia elétrica com concentrador por disco solar parabólico da atualidade estão em *status* experimental e não existem usinas gerando de forma comercial (NREL, 2018a), não existe, por enquanto, uma análise de preço de venda de energia para a geração de energia elétrica com concentrador por disco solar parabólico.

7. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS NA GERAÇÃO HELIOTÉRMICA

7.1. Impactos Ambientais

Os relatórios de impactos ambientais são, em geral, similares para as quatro principais heliotérmicas comerciais no mundo. Os impactos ambientais nas usinas de geração solar heliotérmica podem ser classificados em:

- **Uso da terra:** Apesar da alocação de certo montante de terra, usinas solares heliotérmicas comumente são construídas em regiões semiáridas, desérticas ou improdutivas, geralmente descartadas pelo setor agrícola, sendo que as áreas disponíveis globalmente para desenvolvimento e expansão heliotérmica excedem as necessidades atuais (ENERGIAHELIOTERMICA, 2018).
- **Erosão do solo:** Durante a construção de uma usina heliotérmica acontecem danos à vegetação devido ao tráfego e à escavação de fundações, que podem aumentar a erosão do solo em áreas próximas à instalação dos equipamentos da usina. No entanto, usando simulações, estudos mostraram que se os coletores de luz solares fossem usados como quebras de vento, isso poderia proteger o solo da erosão, pois reduziria os ventos para abaixo da velocidade limite necessária para o movimento de terra (WU, 2015).
- **Temperatura do solo:** Foram coletadas informações de temperatura em vários horários, de forma experimental, em *Yanqing, Pequim*, entre agosto de 2010 e outubro de 2013. Esses dados foram comparados com áreas próximas sem coletores e os resultados apresentam que os coletores heliotérmicos baixaram as temperaturas do solo entre 0,5 e 4 °C na primavera e no verão e aumentaram as temperaturas de 0,5 a 4 °C durante o inverno. Os pesquisadores atribuíram essas mudanças à alteração dos fluxos de ar e do sombreamento. Essa descoberta pode ser importante, pois quando o uso da terra é combinado com o cultivo, já que o crescimento das plantas pode ser especialmente sensível à temperatura do solo.
- **Uso de água:** A limpeza dos espelhos requer o uso de água, mas está mais eficiente com o passar dos anos. A refrigeração do ciclo água-vapor em torres de refrigeração utiliza muita água, em torno de 0,4 a 0,5 milhões de m³ por ano, mas existe uma tendência que o resfriamento seja inteiramente feito com ar, devido ao fato das usinas estarem em locais desérticos, com pouca disponibilidade de água, isso reduz o uso a água de resfriamento de 3,6 L/kWh para 0,25 L/kWh, segundo estudos da NREL (REVE, 2012).
- **Impacto visual:** O terreno sobre o qual uma usina solar heliotérmica está instalada pode perturbar a visão, pois são mais visíveis, podendo aparecer pontos muito brilhantes na paisagem rural. Porém, para fins de comparação, para energia eólica e devido às atitudes

sociais contemporâneas, esses, normalmente, são interpretados pela população como uma novidade técnica e um sinal de progresso, não causando rejeição (REVE, 2012).

- Fluidos: Os fluidos de transferência de calor utilizados nas usinas não poluem o solo e nem as águas subterrâneas, apesar do risco de vazamento, principalmente, quando óleo térmico é utilizado. No entanto, não é venenoso, e qualquer contaminação pode ser controlada. Além disso, existe utilização extensa de sal fundido que não é poluente (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2018).
- Reflexo: As torres solares centrais, campo de heliostatos e de calha parabólica, brilham com intensidade, mas, os aviões voam em altura onde não há risco, além do que as usinas solares nunca são construídas perto de aeroportos. Pessoas e cidades em nível do solo também pouco são afetados pelos mesmos motivos (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2018).
- Aves: É verdade que a torre central representa certo perigo para as aves. Entretanto, algumas técnicas para afastar as aves têm alcançado resultados promissores, o que torna o risco das torres baixo, se comparada a prédios espelhados e torres de transmissão (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2018).
- Fauna e flora: Apesar do impacto causado pela construção de usinas solares heliotérmicas, a sombra dos espelhos e a água usada para limpá-los gera um microclima mais ameno. Isso favorece aos animais e à vegetação do local. O planejamento das usinas solares exige estudos ambientais, pois o estabelecimento maciço de plantas em uma área, pode afetar as populações regionais de animais ou plantas, cortando rotas de dispersão e isolando parcialmente as populações (REVE, 2012).
- Reciclagem: Os principais materiais utilizados são *commodities* comuns, tais como aço, vidro e concreto, cujas taxas de reciclagem são elevadas: geralmente mais de 95 % para o vidro, o aço e outros metais, lembrando que o ciclo de vida de uma usina solar heliotérmica é por volta de 30 anos (REVE, 2012).

7.2. Impactos Sociais

Na área social, usinas heliotérmicas no Brasil ainda são inexistentes (BEN, 2017), porém o país conta com uma usina piloto para estudos. Esse tipo de tecnologia é normalmente aplicada em áreas desérticas e semi-áridas do mundo, beneficiando populações muitas vezes carentes.

Um bom estudo de caso é a geração de energia elétrica pela usina com calha parabólica no deserto de Noor, no Marrocos (SCHINKE, 2015), país que não tem reservas significantes de petróleo, gás natural ou carvão para geração de energia elétrica e importa 95 % de sua eletricidade. Em sua primeira fase, essa usina gerou 160 MW, sendo que mais quatro campos

solares estão em construção e até 2020 ajudará esse país com 30 % da sua necessidade de energia elétrica.

Na cidade de Ouarzazate, as principais preocupações da comunidade local eram que uma grande parcela de empregos deveria beneficiar a força de trabalho local e, portanto, foram concedidos aos trabalhadores locais cerca de 700 dos 1.800 empregos criados durante a fase de construção da usina. Outros 850 empregos foram concedidos a trabalhadores de outras partes do Marrocos e os 250 restantes foram para engenheiros internacionais. Muito menos vagas de emprego serão necessárias para operar a central elétrica para a sua manutenção, que, ainda assim, será dada prioridade às empresas marroquinas (SCHINKE, 2015).

A capacitação das pessoas na região normalmente é baixa e, portanto, existe um foco especial sobre os programas para formar pessoas para empregos especializados e a criação de programas de treinamento para formação em terceiro grau na universidade local. Também está havendo a compensação pela perda do uso da terra. Apesar do tamanho da usina de energia solar, não havia necessidade de reassentamento, no entanto, o uso da terra será restrito no futuro, por exemplo, lenha e ervas medicinais não podem mais ser coletadas e os criadores de gado não terão mais acesso para fins de pastoreio. Assim, as comunidades afetadas receberam uma compensação monetária e o bem-estar local como a educação e os estabelecimentos de saúde foram melhorados (SCHINKE, 2015).

Uma grande preocupação local era que os recursos hídricos vitais se perderiam por causa da água necessária para refrigerar a usina e, em resposta a isso, foi tomada a decisão de utilizar tecnologia de refrigeração a seco para as fases do projeto Noor II e III, assim, as comunidades de oásis afetadas receberam apoio para o gerenciamento de recursos hídricos (SCHINKE, 2015).

8. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS HELIOTÉRMICAS

Este capítulo apresenta o sumário dos resultados levantados durante toda pesquisa de forma tabelada e simplificada para que seja fácil a comparação entre as tecnologias renováveis intermitentes heliotérmica, fotovoltaica e eólica.

	Torre solar central	Calha solar parabólica	Linear solar Fresnel	Disco solar parabólico	Fotovoltaica	Eólica
Geração centralizada	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Custo de implementação	Alto	Alto	Médio	NA	Baixo	Baixo
Rendimento	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Área ocupada	Alta	Média	Média	Pequena	Alta	Alta
Tempo de geração anual	Alta	Alta	Média	Média	Média	Baixa
Complementa a curva de carga do SIN no verão	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Intermitência de fornecimento a rede	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta
Geração Noturna	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim
Estoque de energia	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Custo do estoque de energia	Baixo	Baixo	NA	NA	Alto	Alto
Estoque de calor	Alta	Média	Baixa	NA	NA	NA
Utilização em áreas inclinadas	Médio	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto
Tipo de geração	Indireta	Indireta	Indireta	Direta	Direta	Sim
Maturidade	Madura	Madura	Madura	Experim.	Madura	Madura
Atende à quarta transição energética	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Utilização de água	Alta	Média	Média	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma

É possível observar que a torre solar central, para geração centralizada de grande porte, tem um desempenho, em geral, maior do que as outras tecnologias devido à maior quantidade de itens favoráveis, como apresentados na tabela. Isso também ocorre em escala menor na geração por calha solar parabólica.

Isso se deve à utilização de tanques para estoque de calor, que cria a possibilidade de geração noturna e a entrega de potência à rede elétrica tem valores com patamares mais constantes e menos variáveis, se comparados com as demais tecnologias apresentadas. Porém, as energias heliotérmicas ainda têm custos de implementação altos devido à falta de escala de produção de componentes e consome uma quantidade de água considerável, para condições desérticas ou semiáridas onde são instaladas.

8.1. Comparação de Custos de Implementação no Brasil

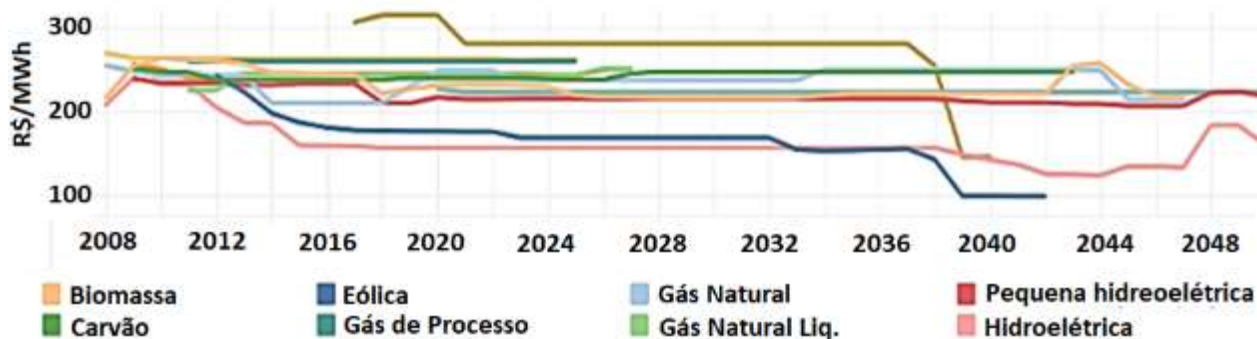
Os custos médios de implementação de usinas renováveis e intermitentes variam e acordo com a tecnologia aplicada.

Torre	Calha	Fresnel	Disco	Fotovoltaica	Eólica
19.993	17.497	17.799	NA	4.342	4.102

Vale destacar que os custos de implementação chinês para torre é de 7.700 R\$/kW e para calha é de 11.430 R\$/kW, ambos mais baixos que a média obtida. Também, existe uma necessidade de cotação do sistema heliotérmico para a realidade brasileira, o que pode ser complexo de realizar. Segundo estudos, as energias heliotérmicas poderão ter o custo de implementação reduzidos em até 38 %, até 2025, o que pode viabilizar economicamente sua utilização no Brasil.

8.2. Valor de venda da Energia Gerada

O valor de venda de energia heliotérmica é de 160 R\$/kW no mercado mundial e pode ser comparado com os valores de contrato de venda futura dos leilões de energia elétrica por fonte, da Câmara de Comércio de Energia Elétrica (CCEE), do governo brasileiro, apresentados na figura que se segue.



Atualmente, o preço de venda médio das energias heliotérmicas é compatível com as demais gerações de energia elétrica brasileira e se espera que decresça de forma similar à geração eólica, devido ao aumento de escala de produção mundial.

8.3. Geração Heliotérmica mais promissora para o Brasil

A escolha da geração heliotérmica mais promissora para o Brasil é uma questão técnica, pois os valores implementação são similares.

Até o momento, a tecnologia de disco solar parabólico é experimental e não é utilizada comercialmente. Apesar de ter alto potencial para desenvolvimento, não são ideais para a geração centralizada, pois os concentradores ficam distantes do sistema de armazenamento de calor, o que gera perdas consideráveis.

Usinas por refletor linear Fresnel são mais baratas e simples de implementar, porém, em geral não operam com temperaturas altas de fluido de transferência de calor como as demais heliotérmicas, e, portanto, têm rendimento de conversão de energia solar para a rede elétrica menor. Ela também não tem sistema de armazenamento de calor em geral, o que impede a geração elétrica noturna. Essa tecnologia, em geral, fica restrita à geração de vapor direta durante o dia, sendo que a produção de potência elétrica entregue à rede é variável, conforme a disponibilidade da irradiação diária.

Portanto, as tecnologias de disco solar parabólico e de refletor linear solar Fresnel não são as mais adequadas ao Brasil.

As tecnologias viáveis ao Brasil são a de torre solar central e de calha solar parabólica, mas depende da região de instalação. Segundo estudos do Instituto Aeroespacial Alemão, o potencial de geração por torre solar central com armazenamento é menor que o da calha solar parabólica também nessa condição, indicando que a área de geração por TC é menor. Logo, as torres solares são viáveis economicamente em regiões de mais alta insolação. Sistemas de calhas parabólicas podem ser instaladas em uma área maior onde a irradiação é menos intensa.

Usinas por calha solar parabólica típica têm 300 m de comprimento, contando com um sistema de rastreamento solar de somente um eixo, o que faz com que as perdas sejam maiores que nas usinas por torre solar central. Em termos de eficiência, não é a tecnologia mais aplicável, mas tem condições de operar em níveis de irradiação menores.

Porém, do ponto de vista técnico, as torres solares centrais são ideais, pois concentram a energia solar em um único ponto, gerando alta temperatura, sendo que a distância entre os blocos de geração e de potência é pequena, fazendo com que esse tipo de tecnologia tenha o melhor rendimento entre as energias renováveis não hidráulicas.

Portanto, do ponto de vista técnico-comercial, as usinas de torre solar central são as mais promissoras para o Brasil. E com potencial de 304 MW médios, essa tecnologia pode fornecer sozinha, toda a energia elétrica, 24 horas por dia, durante o ano todo, caso haja irradiação e disponibilidade solares na região de instalação.

Não se observa no plano decenal brasileiro, publicado em 2017, nenhuma previsão de instalação de usinas heliotérmicas, apesar de todas as outras fontes de energia, inclusive a tecnologia solar fotovoltaica, estarem com previsão de implantação em várias localidades. Os resultados obtidos indicam que isso pode ser um equívoco, pois o Brasil está perdendo a chance de gerar energia heliotérmica, que tem os mais altos rendimentos entre as gerações renováveis em regiões semiáridas, onde a necessidade social é alta.

9. CONCLUSÕES

A geração de energia elétrica por usinas heliotérmicas são tecnicamente viáveis ao Brasil. É possível concluir que a tecnologia heliotérmica tem seu pico de geração no verão brasileiro, época em que as chuvas são mais intensas e a geração hidroelétrica é maior. Se o Brasil tivesse o mesmo perfil de geração heliotérmica anual da Espanha, seria possível, nos meses de verão, reduzir o consumo de água dos reservatórios hidroelétricos poupando o recurso para os meses de seca.

É viável fazer uma geração de energia elétrica heliotérmica centralizada principalmente por torre solar central nas poucas áreas de máxima irradiação solar na região Nordeste e, de forma secundária, por calha solar parabólica, em outras regiões de irradiação menor, como nas regiões Centro-Oeste e Sudeste.

Essas tecnologias têm como característica entregar potência elétrica em patamar estável à rede elétrica, com alto rendimento na transformação de energia solar em elétrica, com pouca oscilação e com possibilidade de geração noturna, devido à tecnologia de armazenamento de calor. Essas características são desejáveis e similares à geração por usinas termoelétricas a combustíveis fósseis e a biomassa. Isso torna essa geração elegível como complementar à hidroelétrica na Matriz Elétrica Brasileira.

Esse tipo de geração pouco emite gases de efeito estufa em seu ciclo de vida, que são nos mesmos níveis da geração eólica, o que é por volta de dezesseis vezes menor que uma geração termoelétrica convencional a combustível fóssil e metade da geração solar fotovoltaica. Mas, infelizmente, a utilização de água em seus processos ainda é um desafio a ser vencido, com muita pesquisa sendo realizada no mundo.

Porém, os custos de implementação atuais ainda são proibitivos para a realidade brasileira. Mas, desde que a redução dos custos de implementação global de 30 %, esperada até 2022, torne-se real, é possível a viabilidade econômica aos níveis da geração eólica, principalmente pelo aumento da escala de produção dos componentes e a criação da cadeia produtiva de fornecedores, ainda inexistente no país.

9.1. Recomendação de Futuros Estudos

Pesquisas para melhoria dos sistemas de armazenamento de calor para usinas heliotérmicas são de extrema importância para o aumento de eficiência da geração de energia elétrica.

É interessante se pesquisar adicionalmente, sistemas híbridos de geração, como por exemplo, heliotérmica-termoelétrica e heliotérmica-eólica, que são gerações de perfil complementar, melhoria da gestão e redução da intermitência da carga injetada no SIN.

Referências

ABBAS. Parabolic trough collector or linear Fresnel collector? A comparison of optical features including thermal quality based on commercial solutions. **Solar Energy**, n. 124, p. 198-215, 2016.

ABENGOA. **Dispatchable Solar Power, Solana**, 2014. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/AbengoaIntl/dispatchable-solar-power-solana-abengoa>>. Acesso em: 2 dez. 2018.

ABENGOA. **Solar Thermal Energy I.Parabolic Trough Technology II. Tower Technology**, 2015. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/AbengoaIntl/solar-thermal-energy-parabolic-trough-technology-versus-tower-technology>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

AGRA, J. **Políticas Públicas De Incentivo Ao Desenvolvimento Da Energia Eólica No Rio Grande Do Norte, Dissertação**. Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte. Natal, p. 264. 2015.

AJDAD, H. Particle swarm optimization algorithm for optical-geometric optimization of linear fresnel solar concentrators. **Renewable Energy**, v. 130, p. 992-1001, jan. 2019.

ANEEL. **Energia Eólica**, 2003. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_6_1.htm>. Acesso em: 1 dez. 2018.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010. Estabelecer, de Forma Atualizada e Consolidada, As Condições Gerais de Fornecimento**. Agência Nacional de Energia Elétrica (MME). Brasília. 2010. (RN 414).

ANEEL. **Capacidade Instalada De Energias Renováveis no Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2017.

ANEEL. **Capacidade Instalada De Energias Renováveis no Brasil**. Agência Nacional De Energia Elétrica (MME). Brasília. 2017.

ANEEL. BIG-Banco de Informações de Geração. **Capacidade de Geração do Brasil**, 01 dez. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 01 2018 2018.

ASME. Catching-the-Sun. **The American Society of Mechanical Engineer Magazine**, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15198: Espelhos de Prata, Beneficiamento e Instalação**. [S.l.]. 2005.

BARDELIN, C. E. A. **Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica**, **Dissertação**. USP. São Paulo. 2004.

BARDELIN, C. E. A. **Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica**”, **Dissertação**. USP. São Paulo. 2004.

BASILDO, J. A. **PUERTO ERRADO 2 - Presentación de la Planta Termosolar**. Congresos Científicos de la Universidad de Murcia. Murcia: [s.n.]. 2016. p. 28.

BELTAGY, H. Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type. **Renewable Energy**, n. 101, p. 782-793, jan. 2017.

BEN. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. EPE - Empresa de Pesquisa Energética (MME-Ministério das Minas e Energia). Brasília. 2017.

BEN. **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. EPE - Empresa de Pesquisa Energética (MME-Ministério das Minas e Energia). Brasília, p. 62. 2018.

BERGERMANN, S. **EuroDish – Stirling System Description**. Stuttgart, p. 9. 2001.

BINE. **Solar thermal power plants**. BINE Information Service. [S.l.], p. 20. 2013. (ISSN-1610).

BITHAS, K. **Revisiting the Energy-Development Link Evidence from the 20th Century for Knowledge-based and Developing Economies**. 1. ed. [S.l.]: Springer International Publishing, v. 1, 2016.

BJÖRKMAN, N. **“Heliostat Design**. Master of Science Thesis KTH Industrial Engineering and Management Machine Design. Stockholm. 2014.

BOHRER, S. L. **ESTUDO DE INTEGRAÇÃO DE ENERGIA HELIOTÉRMICA EM UMA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte: [s.n.]. 2016. p. 8.

BONIFÁCIO, M. V. H. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica para Instalação de uma Usina Eólica no Rio Grande do Norte, Dissertação.** Universidade de Brasília, UnB. Brasília. 2016.

BP. **British Petroleum Energy Outlook 2017 Edition.** Londres. 2017.

BRASIL. LEI Nº 9.648, DE 27 DE MAIO DE 1998, **Autoriza O Poder Executivo a Promover a Reestruturação da Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás e de suas Subsidiárias e Dá outras Providências.** Poder Legislativo. [S.l.]. 1998.

BRASIL. **PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica , Decreto nº 5.025, 2004.** Presidência da República. Brasília. 2004.

BRASIL. LEI Nº 11.428, **Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica.** Presidência da República - Casa Cível. Brasília. 2006.

BRASIL. **Energia Solar No Brasil: Situação E Perspectivas.** Camara dos Deputados - Consultoria Legislativa. [S.l.]. 2017.

CAMARGO, R. **Impacto do Aquecimento Global em Sistemas de Condicionamento de Ar. Impacto do Aquecimento Global em Sistem Journal of Exact Sciences, TAUBATÉ, 2008.**

CARVALHO, C. C. **Fontes Heliotérmicas: Um Estudo Sobre o Funcionamento e o Potencial de Implementação no Brasil.** Dissertação do Departamento Acadêmico De Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2016.

CASTRO, D. E. CASTRO, D. E, **“Análise das Perdas de Eficiência Produtiva em Sistemas de Geração De Energia Eólica Utilizando o Coeficiente de Eficiência Global OEE Do TPM” , dissertação.** CEFET-MG. [S.l.]. 2013.

CEISE. **A Bioeletricidade e o Planejamento Energético.** VII Seminário de Bioeletricidade / UNICA 25ª Fenasucro & Agrocana. Sertãozinho: [s.n.]. 2017.

CEISE. Centro Nacional das Industrias do Setor Sucoenergético e Biocombustíveis. **Cerradinhobio inaugura nova fase da cogeração de energia,** Chapadão do Céu, 2017a. Disponível em: <<http://www.ceisebr.com/conteudo/cerradinhobio-inaugura-nova-fase-da-cogeracao-de-energia.html>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Brasilia. 2001.

- CEPEL. **Energia Solar**, 2017. Disponível em: <<http://www.cepel.br/linhas-de-pesquisa/menu/energia-solar.htm>>. Acesso em: 01 dez. 2018.
- CHESF. **Chesf Torre Solar 1- Alcides Codeceira Neto**. IV dia da industria Heliotérmica. SÃO PAULO. 2017.
- CHONG, K. Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field. **International Journal of Photoenergy**, 2012.
- CLEANTECH. **cleantech news, reviews, & analysis site in the world**, 2018. Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2015/09/20/energy-storage-revolutionizes-solar-technology-beats-natural-gas-says-abengoa-ct-exclusive-interview/solana-csp-energy-storage/>>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- CODECEIRA, A. **Chesf Torre central 1**. ITA- 1ST SYMPOSIUM ON ENERGY CHALLENGES, 201. [S.l.]. 2017.
- CONSOL. **O Mapa da Mina Da Geração Fotovoltaica Centralizada**, 24 jun. 2016.
- CONVERY, M. **System and method for aligning heliostats of a solar power tower**. US8344305B2, 18 mar. 2009.
- COROLIS, I. **Present status and needs and gaps for Concentrated Solar Power**. Ecole Polytechnique Palaiseau. [S.l.]. 2017.
- CRESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Acesso em: 01 dez. 2018.
- CRUZ. **Monitoramento e Diagnóstico em Usinas Nucleares PWR Utilizando a Análise Exergética, Dissertação**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2016.
- CSPPLAZA. **See Actual Performace of Ivanpah, Solana and Crescent Dunes in 9 Months**, 2016. Disponível em: <<http://en.cspplaza.com/see-actual-performace-of-ivanpah-solana-and-crescent-dunes-in-9-months/>>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- CSPWORLD. CSP World Map. **List**, 2018. Disponível em: <http://cspworld.org/cspworldmap?field_country_map_tid=All&field_purpose_tid=All&field_status_tid=244>. Acesso em: 1 31 2018.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista.** USP. São Carlos. 2010.

DARWICHE, T. J. **Déficit da geração hídrica e a repactuação do risco hidrológico no setor elétrico brasileiro: uma análise sob a perspectiva da teoria dos grupos de interesse.** USP. São Paulo. 2016.

DLR. **Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 5, Parabolic Trough Technology.** [S.l.]: [s.n.], 2012.

DLR. **Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 5, Parabolic Trough Technology.** German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. [S.l.]. 2012a.

DLR. **Linear Fresnel Collectors - A Technology Overview.** DLR/SFERA Summer School 2012. Almería. 2012b.

DLR. **Advanced CSP Teaching Materials - Chapter 7 - Solar Dish.** German Aerospace Center. Cologne, p. 63. 2012c.

DLR. **LCOE Reduction Potential of Parabolic Trough and Solar Tower CSP Technology until 2025.** German Aerospace Center, Institute of Solar Research. [S.l.]. 2016.

DS. Desvalidos da Sorte. **Energia solar na Espanha**, 2013. Disponível em: <<http://desvalidosdasorte.blogspot.com/2013/07/energia-solar-na-espanha.html>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

EBC. **Pernambuco pode Receber Projeto Inédito de Sistema De Energia Solar em 2017.** Agência Brasil. Brasília. 2017.

EIA. **Energy Outlook.** Energy Information Administration. Washington. 2017.

EIA. Solar Thermal Power Plants – Basics. **Solar dish/engines**, 2018. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/print.php?page=solar_thermal_power_plants#SolarDish>. Acesso em: 1 dez. 2018.

ELETRONUCLEAR. **Nossas Atividades**, 2018. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01_02_caracterizacao.html>. Acesso em: 1 dez. 2018.

ELLABBAN, O. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014.

EL-NASHAR. “The Effect of Dust Accumulation on the Performance of Evacuated Tube Collectors. **Solar Energy Magazine**, 1994.

EMBRAPA. **Atlas digital dos cenários climáticos projetados para o Brasil com base no Quarto Relatório do IPCC (2007)**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Meio Ambiente. [S.l.]. 2013.

ENERGIAHELIO TéRMICA. **Duas torres solares serão construídas no Brasil em 2016**, 2016. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias/489-duas-torres-solares-serao-construidas-no-brasil-em-2016>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

ENERGIAHELIO TéRMICA. **Seis Mitos Sobre a Energia Heliotermica**, 2018. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/>>. Acesso em: 2 dez. 2018.

EPE. **Demanda de Energia 2050**. Empresa de Pesquisa Energética (Ministério das Minas e Energia). Rio de Janeiro. 2015. (Estudos de Demanda, Nota Técnica DEA 13/15).

EPE. **Energia Renovável, Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. ISBN 978-85-60025-06-0. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.

EPE. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE - Empresa de Pesquisa Energética (MME-Ministério das Minas e Energia). Rio de Janeiro. 2016.

EPE. **A Bioeletricidade e o Planejamento Energético, VII Seminário de Bioeletricidade CEISE BR / UNICA 25ª Fenasucro & Agrocana**. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. Sertãozinho. 2017b.

EPE. **Projeção da Demanda de Energia para os Próximos 10 Anos (2017-2026)**. Empresa de Pesquisa Energética (MME, Ministério das Minas e Energia). Rio de Janeiro. 2017c. (NOTA TÉCNICA DEA 001/17).

ÉPOCA NEGÓCIOS. **Enel Prevê que Usina Solar De R\$ 1,2 Bilhão na Bahia deve ser Ativada nas Próximas Semanas**. Revista. [S.l.]. 2017.

ERSE. **Perdas nas Redes de Distribuição**. ERSE Entidade Reguladora de Serviços Energéticos. [S.l.]. 2017.

ESPANOLES, I. ingenieros.es. **INGENIEROS ESPANOLES**, 2012. Disponível em: <<http://www.ingenieros.es/noticias/ver/proyecto-termsolar-de-puerto-errado-2/2904>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

EUSTÁQUIO. **Simulação e Análise do Comportamento do Campo de Heliostatos de uma Central de Concentração Solar Termoeétrica de Receptor Central, Tese de Mestrado Integrado**. Universidade do Porto. Cidade do Porto. 2011.

EXAME. Revista Exame. **Maior usina solar do mundo começa a gerar eletricidade**, 2014. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/economia/maior-usina-solar-do-mundo-comeca-a-gerar-eletricidade/>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

FAPESP. Agência Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. **Potencial eólico em terra do Brasil pode ser seis vezes maior do que o estimado**, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/potencial-eolico-em-terra-do-brasil-pode-ser-seis-vezes-maior-do-que-o-estimado/24053/>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

FARIAS, L. . M. Uso da Energia ao Longo da História: Evolução e Perspectivas Futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, 2011.

FERRUZZA. **Start-Up Performance of Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plants**. Department of Mechanical Engineering, DTU, Technical University of Denmark. [S.l.]. 2016.

FINKLE, A. **Relação Do Crescimento Econômico E Consumo De Energia Elétrica**. UNIJUÍ. [S.l.]. 2014.

FLORANCE, B. Progresso Tecnológico Versus Sustentabilidade: Um Impasse Nas Organizações. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, Americana, v. 1, n. 1, p. 136, out. 2016.

FRANCE PRESSE. **Conheça da Maior Usina de Energia Solar da América Latina, em Pirapora**. Reportagem. [S.l.]. 2017.

FREITA, S. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Belo Horizonte: Apostila, 2017.

FREITAS, G. M. **Biomassa, uma Fonte de Energia**. UFRJ/ Escola Politécnica. [S.l.]. 2016.

FVG. **CPDOC**. Conselho Nacional De Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico. [S.l.]. 2018.

GAIA SOLAR ENERGY. **Both Side Open Parabolic Trough Evacuated Solar Collector Tube**, 2018. Disponível em: <<https://gaisolar.en.made-in-china.com/product/xBnERDKGvNkg/China-Both-Side-Open-Parabolic-Trough-Evacuated-Solar-Collector-Tube.html>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

GHIAT. **Damage Analysis of CSP Parabolic Trough Heat Collector Element for Efficiency Improvement**. School of Science and Engineering. [S.l.]. 2017.

GIOSTRI, A. Comparison of Different Solar Plants Based on Parabolic Trough Technology. **ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability**, Milano, 2012.

GIZ. **Parabolic Trough, State of the art and market overview**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (Ministry for Economic Cooperation and Development). Parabolic Trough, State of the art and market overview. 2014.

GOOGLE. **Sueface Level Wind Data Colletion**. Google.org. Tracy, p. 6. 2011.

GOVERNO DE SERGIPE. **Usina Termoeétrica de Sergipe será a maior da América Latina**, 2017. Disponível em: <http://www.nenoticias.com.br/98393_usina-termoeletrica-de-sergipe-sera-a-maior-da-america-latinahtml>. Acesso em: 1 mar. 2018.

GOVERNO DO PIAUÍ. **Maior usina de energia fotovoltaica da América Latina será instalada no Piauí**. imprensa oficial. [S.l.]. 2017.

GREENPEACE. **SOLAR THERMAL ELECTRICITY GLOBAL OUTLOOK 2016**. Greenpeace International). Amsterdam, p. 114. 2016.

HÄBERLE, A. The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations. **Concentrated Solar Power**, 2002.

HANI. Fresnel-based modular solar fields for performance/cost optimization in solar thermal power plants: A comparison with parabolic trough collectors. **Applied Energy**, v. 141, n. 1, p. 175-189, mar. 2015. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.074>.

HARTWELL. **The Industrial Revolution and Economic Growth**. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2017.

HEIKO SCHENK. Energetic Comparison of Linear. **Journal of Solar Energy Engineering**, Stuttgart, v. 136, p. 11, nov. 2014. ISSN ASME 041015-10.

HELIO, M. O. **Crise Hídrica e Geração Elétrica Renovável Centralizada no Brasil**. XICBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Cuiabá: [s.n.]. 2018.

HELIOCSP. **Fresnel Solar Power Plant Achieves Financial Close**, 2011. Disponível em: <<http://helioscsp.com/fresnel-solar-power-plant-achieves-financial-close/>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

HELIOCSP. **Environmental Impacts of CSP, Water, Land, Materials, Emissions, Flora and Fauna**, 2015. Disponível em: <<http://helioscsp.com/environmental-impacts-of-csp-water-land-materials-emissions-flora-and-fauna/>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

HELIOCSP. **Concentrated Solar Power would need to meet 8%-10% of global electricity demand by 2050**, 2016. Disponível em: <<http://helioscsp.com/concentrated-solar-power-would-need-to-meet-8-10-of-global-electricity-demand-by-2050/>>. Acesso em: 31 dez. 2018.

HELIOCSP. **Puerto Errado 2, World's largest CSP based on Linear-Fresnel technology**, 2016. Disponível em: <<http://helioscsp.com>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

HELIOCSP. **Linear Fresnel systems and the future for Concentrated Solar Power**, 2017. Disponível em: <<http://helioscsp.com/linear-fresnel-systems-and-the-future-for-concentrated-solar-power/>>. Acesso em: 23 dez. 2018.

HLT. Energia Heliotermica. **Existem projetos heliotérmicos no Brasil?**, 2018. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/existem-projetos-heliotermicos-no-brasil>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

HUNTER. Low Cost Anti-Soiling Coatings for CSP Collector Mirrors and Heliostats. **SPIE Proceedings Vol. 9175**, San Diego, 2014.

IBGE. **Áreas Especiais IBGE, Mapa do Semi Árido**. IBGE -Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [S.l.]. 2017.

IEA.

Energy from the Desert: Very Large Scale PV Power Plants for Shifting to Renewable Energy Future. International Energy Agency. [S.l.]. 2015. (ISBN 978-3-906042-29-9).

IEA. **World Energy Outlook**. International Energy Agency. [S.l.]. 2016.

IEMA. **Emissões dos Setores De Energia, Processos Industriais E Uso De Produtos**. Instituto de Energia e Meio Ambiente. São Paulo. 2017.

IEMA. **Emissões Dos Setores de Energia Processos Industriais e Uso de Produtos**. Instituto de Energia e Meio Ambiente e Observatório do Clima. São Paulo, p. 90. 2018.

IFC. **A Project Developer’s Guide to Utility-scale Solar Photovoltaic Power Plants**”, Banco Mundial. Washington. 2015.

INDUSTRIAL, O. OHL INDUSTRIAL. **30 MW Puerto Errado 2 Thermosolar Plant. Murcia**, 2018. Disponível em: <<http://www.ohlindustrial.com/en/projects/30-mw-puerto-errado-2-thermosolar-plant-murcia/>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

INFOVENTO. **Infovento online**, 2018. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/01/05_Infovento-online.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2018.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE- Instituto de pesquisas Espaciais e UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. São José dos Campos. 2016.

IRENA. **“Rethinking Energy 2017 Accelerating the Global Energy Transformation**. International Renewables Energy Agency. Abu Dhabi. 2018.

IRENA. International Renewables Energy Agency. **Cost Data - CSP Summary Charts**, 2018. Disponível em: <<http://www.irena.org/costs/Charts/CSP>>. Acesso em: 01 jan. 2019.

ITA. **1ST SYMPOSIUM ON ENERGY CHALLENGES**. ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Jose dos Campos. 2017.

ITIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife: Cidade Universitária, 2000.

JORNAL PIAUÍ HOJE. **Piauí Ganhou Nove Parques Eólicos na Chapada do Araripe**. JORNAL. [S.l.]. 2017.

KECK, T. **ENVIRODISH AND EURODISH**. Schlaich Bergermann und Partner (SBP GmbH). [S.l.], p. 7. 2001.

KECK, T. **ENVIRODISH AND EURODISH**. Schlaich Bergermann und Partner (SBP GmbH). Stuttgart, p. 7. 2001.

KINJO, T. Output Levelling of Renewable Energy by Electric Double-Layer Capacitor Applied for Energy Storage System. **IEEE Transactions on Energy Conversion** , v. 21, n. 1, p. 227, fev. 2006. ISSN DOI: 10.1109/TEC.2005.853752.

LAJEOSA, Q. **Esquema de Central de Biomassa para Produção de Calor e Eletricidade, Curso Técnico em Energias Renováveis Variante Bioenergia**. Escola profissional agrícola Quinta Lajeosa. Portugal. 2013.

LARSSON, M. **Coordinated Voltage Control**. IEA-International Energy Agency. [S.l.]. 2013.

LEESA, L. Inverter Technology Drives Lower Solar Costs. **Renewable Energy World**, 2013.

LIMA, L. C. A. **Desafios Do Desenvolvimento Sustentável: Estudo Sobre As Mudanças Na Matriz Energética Brasileira**. Escola de Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense. [S.l.]. 2016. (Trabalho (Conclusão de Curso)).

MANCINI, T. **Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status**. [S.l.]. 2003. (DOI: 10.1115/1.1562634).

MAPIO. **Stirling Solar Engine, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico**, 2018. Disponível em: <<https://mapio.net/pic/p-25904702/>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

MARANHÃO, I. M. **Estudo Sobre a Tecnologia Heliotérmica e sua viabilidade No Brasil**. Dissertação, Universidade de Brasília UnB. Brasília. 2015.

MARCOVITCH, J. **Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades**. 1. ed. São Paulo: IBEP Gráfica, v. 1, 2017.

MATAVELLI, A. C. **Energia Solar: Geração de Energia Elétrica Utilizando Células Fotovoltaicas - Dissertação**. USP. Lorena. 2013.

MAXWELL. Windpower Engineering Development. **Maxwell intros new Ultracapacitor Grid Energy Storage Subsystem with Siemens' transmission system**, 2018. Disponível em: <<https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/maxwell-intros-new-ultracapacitor-grid-energy-storage-subsystem-with-siemens-transmission-system/>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

MD. Why Solar? The Advantages of PV Solar Energy Compared to the Other Renewables. MEDIUM CORPORATION, Solar Dao, article, 2017. [S.l.]. 2017.

MEDEIROS, N. F. **A Grande Transição Energética.** Agência Canal Energia. Rio de Janeiro. 2017.

MILLENNIUM, S. **AG Presentation**, 2009. Disponível em: <https://www.caissedesdepots.fr/fileadmin/PDF/international/smag_eu_climate_foundation_03_12_09.pdf>. Acesso em: 01 Dezembro 2018.

MME. **Resenha Energética Brasileira.** Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (MME- Ministério de Minas e Energia). Brasília. 2017.

MME. **PDE-Plano Decenal de Expansão de Energia 2026.** BRASIL - MME- Ministério das Minas e Energia. Brasília. 2018.

MME. **Resenha Energética Brasileira 2018 Ano Base 2017.** Ministério de Minas e Energia (MME) - Departamento de Informações e Estudos Energéticos. Brasília, p. 31. 2018.

MOYA, Z. Parabolic-trough concentrating solar power (CSP) systems. **Concentrating Solar Power Technology**, 2012. 197-239.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **GISTEMP Team, GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), NASA Goddard Institute for Space Studies**, 2018. Disponível em: <<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/news/20170918/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

NOBRE. **Álvaro Alberto e o Início da Energia Nuclear no Brasil.** HCTE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. [S.l.]. 2001.

NOVATEC. **Novatec Solar Presentation to Lanco Novatec**, 2012. ISSN <https://vdocuments.mx/120715-novatec-solar-presentation-to-lanco-novatec.html>. Acesso em: 22 dez. 2018.

NOVATEC. **World's Largest Linear Fresnel Solar Power Station Commences Operation**, 2012. Disponível em: <<https://www.pressebox.com/pressrelease/novatec-solar-gmbh/Worlds-Largest-Linear-Fresnel-Solar-Power-Station-Commences-Operation/boxid/544470>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

- NREL. **Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems**. National Renewable Energy Laboratory, Prepared for the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition. Lake Buena Vista. 2005. (NREL/CP-520-37358).
- NREL. **Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems**. National Renewable Energy Laboratory. Golden, p. 9. 2005. (NREL/CP-520-37358).
- NREL. **Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Technical**. National Renewable Energy Laboratory. Golden, p. 58. 2009. (NREL/TP550-45633).
- NREL. **Results and comparison from SAM Linear Fresnel performance model**. National renewable energy laboratory. [S.l.]. 2012. (NREL/CP 5500-5457).
- NREL. **Land Use Requirements for Solar Power Plants in the United States**. National Renewable Energy. [S.l.], p. 47. 2013. (NREL/TP-6A20-56290).
- NREL. **On the Path to SunShot: Advancing Concentrating Solar Power Technology, Performance, and Dispatchability**. National Renewable Energy Laboratory. [S.l.]. 2016. (TP-5500-65688).
- NREL. **On the Path to SunShot: Advancing Concentrating Solar Power Technology, Performance, and Dispatchability**. National Renewable Energy Laboratory. [S.l.]. 2016. (NREL/TP-5500-65688).
- NREL. **Power Tower Projects**. National Renewable Energy Laboratory. [S.l.]. 2017.
- NREL. **Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap**. National laboratory of the U.S. Department of Energy. [S.l.]. 2017a. (TP-5500-67464).
- NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Concentrating Solar Power Projects**, 2018. Disponível em: <https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/parabolic_trough.cfm>. Acesso em: 1 dez. 2018.
- NREL. Concentrating Solar Power Projects by Technology. **Dish/Engine Projects**, 2018a. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/by-technology/dish-engine>>. Acesso em: 16 dez. 2018.
- NUMES, M. **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável e coerência em políticas: recomendações da OCDE na edição 2016 de Better Policies for Sustainable**

Development, Material didático-instrucional complementar para vídeo-aulas.

Repositório da Universitário. [S.l.]. 2017.

NUNES, C. J. A. **Análise de Viabilidade de uma Instalação Fotovoltaica para Alimentação dos Serviços Auxiliares numa Central de Cogeração.** Universidade do Porto - Dissertação. Porto. 2016.

ODC. **Mudanças Climáticas Podem Levar 720 Milhões À Miséria.** OBSERVATÓRIO DO CLIMA. [S.l.]. 2015.

OLIVEIRA, C. L. **PROJETO SMILE.** ITA- 1ST SYMPOSIUM ON ENERGY CHALLENGES, 2017. [S.l.]. 2017. ().

OLIVEIRA, C. M. D. **Metodologia Para Estudo de Implantação de Uma Usina Heliotérmica De Receptor Central No Brasil.** Engenharia Elétrica Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

ONS. **Boletim de Carga Mensal - Setembro 2018.** Operador Nacional do Sistema Elétrico (MME- Ministério de Minas e Energia). Brasília. 2018.

(<http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/BoletimMensalCarga%20-%20set-2018.pdf>).

ONS. Operador Nacional do Sistema. **Mapas para download, Sistema de Transmissão - Horizonte 2017,** 2018a. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 01 Dezembro 2018.

ONS. **Boletim Diário da Operação Usina Solar,** 2018b. Disponível em: <<http://sdro.ons.org.br/SDRO/DIARIO/index.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

ONS. **Geração de energia por tipo de usina,** 2018c. Disponível em: <http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em: 1 dez. 2018.

PATEL, P. **Thermal Performance Evaluation of Receiver for Linear Fresnel oncentrator (LFC) for CSP -DSG System, Master Thesis.** CSEM - U.A.E Innovation Centre LLC. Lousanne, p. 77. 2013.

PEREIRA, A. T. F. **Projeto, Construção E Análise De Um Sistema De Posicionamento Automático De Pannel Solar Fotovoltaico.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Dissertação. [S.l.]. 2016.

PERKINS. **Changing Energy, The Transition to a Sustainable Future**. [S.l.]: University of California, 2016.

PERKINS J, H. **Changing Energy: The Transition to a Sustainable Future**. 1. ed. Oakland: University of California, v. 1, 2017.

PETER HELLER. **Parabolic Dishes Course**. DLR. Madrid, p. 49. 2012.

PHOENIX BUSINESS JOURNAL. **Tessera debut new solar plant in Peoria**, 2010.

Disponível em: <<https://www.bizjournals.com/phoenix/stories/2010/01/18/daily87.html>>.

Acesso em: 11 dez. 2018.

PICOLLO, A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino Física**, São Paulo, v. 36, n. 4, 2014.

PORTAL SOLAR. **Como funciona o painel solar fotovoltaico**, 2018. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

POWER TECHNOLOGY. **The Maricopa Solar Plant Project, USA**, 2018. Disponível em:

<<https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

PRADO, G. O. **Estado da Arte em Tecnologias de Captação da Energia Solar para Fins Térmicos**. XX COBEQ, Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis: [s.n.]. 2014.

PRARTHAN, J. R. **Solar Power Plant, Presentation**. [S.l.]. 2017.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica**. [S.l.]: Editora Manole, 2015.

REN21. **Renewables 2017 Global Status Report**. United Nations and BID. Paris. 2017.

REN21. **Renewables 2018 Global Status Report**. United Nations and BID. Paris. 2018.

RENEW ECONOMY. **Solar Storage Plant Gemasolar Sets 36-Day Record for 24/7 Output**. [S.l.]. 2013.

REVE. **Environmental Impacts of Concentrating Solar Power: Water, Land, Materials, Emissions, Flora and Fauna**. [S.l.]. 2012.

- ROBLER, J. **Bundled System Solution for Decentralized Large-scale PV Power Plants**. [S.l.]. 2013.
- SANDIA. **ARRA ES Projects Lessons Learned**. Sandia National Laboratories. [S.l.]. 2015. (SANDIA 2015-5242).
- SANDIA. **Concentrating Solar Power and Thermal Energy Storage**. Sandia National Laboratories Concentrating Solar Technologies Dept. Albuquerque, p. 26. 2016. (SAND2016-8168 PE).
- SANDIA. **Dish Systems**. Sandia National Laboratories. Albuquerque, p. 54. 2017. (SAND2017-3433J).
- SANDIA. **Sandia National Laboratories**, 2018. Disponível em: <<https://energy.sandia.gov/energy/renewable-energy/solar-energy/csp-2/nsttf/>>. Acesso em: 1 dez. 2018.
- SANTANA, L. **Energia Solar e Eólica: Preço, Diferenças e Melhores Locais**. Blue Sol Energia Sola. [S.l.]. 2017.
- SANTOS, S. G. M. **Ligações Perigosas: As Relações Entre Estado e Ciência no Brasil Do Pós-Guerra**. [S.l.]. 2001.
- SARI, A. **Contribution of Renewable Energy Potential to Sustainable Employment**. 5th International Conference on Leadership, Technology, Innovation and Business Management. Istanbul: [s.n.]. 2016.
- SAYMA, A. **OPTIMISED MICROTURBINE SOLAR POWER SYSTEM**. City University London. London, p. 29. 2013. (308952).
- SBP. Shalich Bergman Partner. **Solar Energy**, 2018. Disponível em: <<https://www.sbp.de/en/solar-energy/?viewType=grid>>. Acesso em: 12 jan. 2018.
- SBP. Shalich Bergman Partner. **HelioFocus Dish Demonstration Plant China**, 2018a. Disponível em: <<https://www.sbp.de/en/project/heliofocus-dish-demonstration-plant-china/?viewType=grid>>. Acesso em: 1 dez. 2018.
- SBP. Shalich Bergman Partner. **HelioFocus 500 m² Big Dish - Prototype**, 2018c. Disponível em: <<https://www.sbp.de/en/project/heliofocus-500-m2-big-dish-prototype/?viewType=grid>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

- SBP. Shalich Bergman Partner. **10 kW Dishstirling Eurodish Country Reference Unit**, 2018c. Disponível em: <<https://www.sbp.de/en/project/10-kw-dishstirling-85-m-eurodish-country-reference-unit/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.
- SCHINKE, B. Development and Cooperation. **The social dimension of “desert power”**, 2015. Disponível em: <<https://www.dandc.eu/en/article/research-project-social-impacts-concentrated-solar-power-station-morocco>>. Acesso em: 02 dez. 2018.
- SENER. RENEWABLES, POWER, OIL & GAS. **Parabolic Trough Plant Aste 1A & 1B**, 2018. Disponível em: <<http://www.poweroilandgas.sener/project/parabolic-trough-plants-aste1a-and-1b>>. Acesso em: 04 jan. 2019.
- SHARMA. Shading and Available Energy in A Parabolic Trough Concentrator Field. **Solar Energy Journal**, mar. 2013. 212.
- SHARMA, P. A review on electrochemical double-layer capacitors. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2901-2912, dez. 2010. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.031>.
- SHEMER. **As Concentrated Solar Power Bids Fall to Record Lows, Prices Seen Diverging Between Different Regions**. HeliosCSP. [S.l.]. 2018.
- SILVA, S. S. D. **AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE AEROGERAADORES, TCC**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.
- SILVESTRE. **Desenvolvimento de Heliostatos para Geração Heliotermica em Torres Solares, Dissertação**. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2016.
- SILVESTRE. **Desenvolvimento de Heliostatos para Geração Heliotermica em Torres Solares, Tese de Mestrado Integrado**. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2016.
- SMIL, V. World History and Energy. In: SMIL, V. **Energy Transitions: History, Requirements, Prospects**. Manitoba: [s.n.], 2004.
- SMIL, V. **Energy Transitions: History, Requirements, Prospects**. [S.l.]: [s.n.], 2014.
- SOLAR CHOICE. **SOLAR TRACKES**, 2010. Disponível em: <<https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

SOLARPACES. **CSP Projects Around the World**, 2018. Disponível em: <<http://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

SOLARRESERVE. **Molten salt thermal energy storage technology is the most efficient, reliable and cost-effective way to store solar power at large scale**, 2018. Disponível em: <<https://www.solarreserve.com/en/technology/molten-salt-energy-storage/gallery/hot-salt-tank.jpg/view>>. Acesso em: 31 dez. 2018.

SOUZA. **Acordo Nuclear Brasil-Alemanha Federal de 1975: O Desafio Brasileiro na Busca de Soberania Internacional**. UFRS. [S.l.]. 2009.

SPELLNING, J. **Concentrated Solar Power. Renewable Energy Technology**. KTH Institutionen för Energiteknik. Stockholm. 2012.

STINE, W. **Power From The Sun**. [S.l.]: Power from the sun.net, 2001.

SUBERU, M. Y. **Energy Storage Systems for Renewable Energy Power Sector Integration And Mitigation Of Intermittency**. Universiti Teknologi Malaysia. [S.l.]. 2014.

TÉLLEZ. **State of the Art in Heliostats and Definition of Specifications**. erra. [S.l.]. 2014.

TESSERA SOLAR. **Stirling Energy Systems & Tessera Sola**, 2010. Disponível em: <http://www.csptoday.com/usa2010/assets/pdf/slides/day_2_track_1/Dish%20Stirling.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2018.

THE WALL STREET JOURNAL. **Could California's massive Ivanpah solar power plant be forced to go dark?**, 16 mar. 2016. Disponível em: <<https://www.marketwatch.com/story/could-californias-massive-ivanpah-solar-power-plant-be-forced-to-go-dark-2016-03-16>>. Acesso em: 03 jan. 2019.

TORRESOL. **Gemasolar, A Thermal Solar Power Plant With 15 Hours Of Thermal Storage System**. Torresol Energy. Madrid, p. 32. 2013.

UDOP. União dos Produtores de Bioenergia. **MAPAS de Usinas e Destilarias**, 2018. Disponível em: <http://www.udop.com.br/index.php?item=associadas_mapa>. Acesso em: 1 dez. 2018.

UNICA. **BOLETIM/UNICA, A Bioeletricidade da Cana em Números – Dezembro de 2017**. Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKewjWtqGA_53fAhXFgpAKHTSvDq4QFjABegQICBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.unica.com.br%2Fdownload.php%3FidSecao%3D17%26id%3D44644951&usg=AOvVaw1ncoGXg9vzt2smMbtC33OK>. Acesso em: 12 jan. 2018.

UNITED STATES OF AMERICA. Office Of Energy Efficiency & Renewable Energy.

Dish/Engine System Concentrating Solar Power Basics, 2013. Disponível em:

<<https://www.energy.gov/eere/solar/articles/dishengine-system-concentrating-solar-power-basics>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

URBANETZ, J. **Introdução a Energia Solar Fotovoltaica e o SFVCR do Escritório Verde da UTFPR**. Apresentação da semana de engenharia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2014.

VALIN, A. **Energia Termonuclear**. Colégio Dom Bosco. São Paulo. 2016.

VANT-HUL., L. Central Tower Concentrating Solar Power (CSP) Systems. In: VANT-HUL., L. **Concentrating Solar Power, Principles, developments and application**. [S.l.]: [s.n.], 2012.

VASQUEZ-ARANGO. **“Dynamic Properties of a Heliostat Structure Determined by Numerical and Experimental Modal Analysis**. Institute of Solar Research German Aerospace Center (DLR). Germany. 2015.

VEIGA. **Energia Nuclear: do Anátoma ao Diálogo**. [S.l.]: [s.n.], 2018.

VEJA. **Uma Usina De R\$ 25 Bilhões: Angra 3 é o Nosso Desastre Nuclear**, 2018. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/uma-usina-de-r-17-bilhoes-angra-3-e-o-nosso-desastre-nuclear/>>. Acesso em: 1 dez. 2018.

VILLAMARIM, J. A. J. **Análise da viabilidade técnica-econômica de um sistema eólico-fotovoltaico com conexão à rede elétrica suprimindo uma estação rádio base de telefonia celular no estado de São Paulo**, **Dissertação**. USP. [S.l.]. 2016.

W.D., J. **How Much Water does It Take to Make Electricity?** IEEE Spectrum. [S.l.]. 2014.

WEC. **World Energy Council, Resources Summary**. World Energy Council. London. 2016.

WEF. **Energy transitions: Past and Future**. WORLD ECONOMIC FORUM - IHS Cambridge Energy Research Associates. [S.l.]. 2013.

WINTER, M. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? **Chemical Reviews**, 28 out. 2004. 4245–4270.

WMO. **WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin)**. World Meteorological Organization (WMO). [S.l.]. 2017.

WU, Z. The impacts of large Concentrated Solar Power on the local environment. **Science for Environment Policy**, Bristol, p. 1, jan. 2015.

XING, L. Overview of current development in Electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 531-536, January 2015. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.

XU, C. **Energy and Exergy Analysis of Solar Power Tower Plant**. Chinese Academy of Sciences. Beijing. 2011.

XU, X. Prospects and Problems of Concentrating Solar Power Technologies for Power Generation In The Desert Regions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Mesa, 2016.

YAN, J. Design and implementation of a 38 kW dish-Stirling concentrated solar power system. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, Hunan, 2017. 15.

YANG, S. Cost-Benefit Analysis for the Concentrated Solar Power in China. **Journal of Electrical and Computer Engineering** , 14 abr. 2018. 12.

ZHANG, H. L. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 1, n. 1, p. 466-481, nov. 2013.

ZUBIETA, L. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. **IEEE Trans. Ind. Appl**, v. 36, p. 199-205, 2000.

3M. **Solar Mirror Film 1100 Application Guide**. [S.l.]. 2012.

Autorizo a cópia total ou parcial desta obra apenas para fins acadêmicos e pesquisa com a devida citação, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem a devida autorização do autor,

Helio Marques de Oliveira

Taubaté, Outubro de 2018.