

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

JÉSSICA AKEMI CIMADA DA SILVA

**Potenciais aplicações de tecnologias solares em processos industriais como fonte de
energia: uma revisão bibliográfica**

Lorena

2014

JÉSSICA AKEMI CIMADA DA SILVA

Potenciais aplicações de tecnologias solares em processos industriais como fonte de energia: uma revisão bibliográfica

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para conclusão de Graduação do curso de Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia Ambiental e Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. M.Sc. Antonio Carlos da Silva

Lorena

2014

Dedico este trabalho à minha amada família, com muita gratidão, pelo amor, pelo apoio e pelos conselhos e incentivos. Dedico a vocês este trabalho, por serem minha fonte de inspiração e de força, por se fazerem presente mesmo com a distância, e por fazerem parte da minha história.

Dedico também este trabalho a todos os professores que passaram pela minha vida, por terem dedicado o seu precioso tempo aos seus alunos, por dividir os seus conhecimentos técnicos e experiências profissionais, por terem contribuído de maneira significativa para a minha formação, e por terem possibilitado a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida, pelo discernimento, pela esperança, e pela oportunidade de transformar sonhos em realidade. Obrigada Senhor, por ter mudado a minha vida. Que seus princípios me guiem para sempre, amém!

Aos professores da Escola e Engenharia de Lorena, que contribuíram de forma relevante à minha formação. Agradeço especialmente ao Prof. Antonio Carlos da Silva, meu orientador, pelas sugestões e contribuições na elaboração deste trabalho.

À minha família, por me inspirar todos os dias, por ser um exemplo de respeito e honestidade, pela compreensão, paciência, fidelidade e pelo amor que nos une acima de tudo. Sou eternamente grata pelos valores transmitidos, por acreditarem na minha capacidade e por sempre me apoiarem nas decisões mais difíceis.

Aos meus amigos, pela amizade sincera, pela paciência e pelo suporte durante a elaboração deste trabalho. Obrigada por proporcionarem momentos de alegria diante das limitações, por fazerem meus anos de faculdade mais prazerosos e por contribuírem tanto à minha formação pessoal e profissional.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

*“We cannot solve our problems with the same
thinking we used when we created them”.*

Albert Einstein

RESUMO

DA SILVA, J. A. C. **Potenciais aplicações de tecnologias solares em processos industriais como fonte de energia: uma revisão bibliográfica.** 2014. 79 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

Atualmente, a busca por eficiência energética e por fontes de energia alternativas e renováveis têm sido o foco de muitas pesquisas em todo o mundo. Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias solares têm demonstrado grandes avanços e com o aumento da competitividade, os custos dessas tecnologias têm caído de forma significativa. Apesar das atuais limitações de viabilidade técnica, política e econômica presentes no Brasil, a utilização de energia solar é uma possível alternativa para redução da emissão de gases poluentes e busca de desenvolvimento sustentável industrial. Este trabalho tem caráter exploratório, com o objetivo de apresentar as fontes de energia que compõem a matriz energética da indústria brasileira, descrever as tecnologias solares existentes no mercado, pesquisar a forma em que essas tecnologias têm sido aplicadas em indústrias, analisar oportunidades de aplicação de energia elétrica e térmica em processos industriais, principalmente processos que ocorrem em temperaturas baixas e médias (até 400 °C), estudar os possíveis impactos ambientais, benefícios e limitações da geração de energia a partir do Sol. Uma análise de um estudo de caso complementar à revisão bibliográfica sobre a empresa americana Frito-Lay (uma divisão da Pepsico), cuja estratégia de desenvolvimento sustentável busca máxima eficiência energética e eliminação total de emissões e resíduos, foi realizado com o objetivo exemplificar a utilização das tecnologias de aproveitamento de energia solar em uma indústria e analisar os resultados obtidos.

Palavras-chave: energia solar, processos industriais, desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

DA SILVA, J. A. C. Potential applications of solar technologies in industrial processes as energy source: a review. 2014. 79 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

Nowadays, research worldwide is focusing on energy efficiency and on alternative sources of energy. In the last few years, the development of solar technologies has consistently advanced. In addition, because of competitiveness, solar technologies costs have fallen steadily. Even though there are technical, political, and economical limitations in Brazil, the use of solar technologies is still an alternative for industries to reduce gas emissions, and to contribute to sustainable development. The present work aimed to: review the Brazilian industrial energy matrix by sources; describe solar technologies; to understand how solar technologies have been used in industry; to study industrial applications which are more compatible to be integrated with solar energy systems, mainly in low and medium temperature processes (up to 400°C); to study possible environmental impacts, benefits, and limitations of solar energy systems. A case study about the American company Frito-Lay (a division of Pepsico Company) is used in order to better understand the use of solar technologies in industrial processes, and the results obtained. Frito-Lays` sustainable development strategy includes zero emissions projects and off-the-grid manufacturing plants.

Key words: solar energy, industrial processes, sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta interna de energia no Brasil – 2012.....	18
Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica – 2012	19
Figura 3 – Estrutura do consumo no setor industrial.....	20
Figura 4 – Irradiação solar global média anual (kWh/m ²).....	22
Figura 5 – Fornalha solar em Odeillo Font-Romeu, Pyrénées-Orientales, França.....	24
Figura 6 – Esquema de um sistema de geração de energia heliotérmica.....	25
Figura 7 – Ilustração da configuração de um coletor de placa plana.....	31
Figura 8 – Transferência de calor na placa absorvedora.	32
Figura 9 – Sistema de aquecimento de água por um coletor de placa plana.	32
Figura 10 – Coletor de tubos a vácuo. (a) Princípio de funcionamento; (b) Modelo de um coletor comercial.....	33
Figura 11 – Eficiência de absorção da radiação solar: Coletor de tubo a vácuo vs. coletor de placa plana.	34
Figura 12 – Esquema de um coletor parabólico composto com receptor tubular.....	35
Figura 13 – Esquema de concentração em um refletor linear de fresnel.....	36
Figura 14 – Refletor Linear de Fresnel AREVA Solar.....	36
Figura 15 – Ilustração de concentradores de calha (a) Parabólica (b) Cilíndrica.	37
Figura 16 – Simulação do movimento de rastreamento solar de um concentrador de calha parabólica.....	38
Figura 17 – Fotografia da usina solar Solnova 1 em Sevilha, Espanha.....	38
Figura 18 – Diagrama esquemático de um coletor de disco parabólico.	39
Figura 19 – Fotos de concentradores de discos parabólicos.....	40
Figura 20 – Princípio de funcionamento de geração de energia por torre central.	41
Figura 21 – Fotografia da usina solar PS10 e PS20 com geração de energia por torre central.	41
Figura 22 – Visualização de uma configuração MTSA.....	42
Figura 23 – Composição de painéis fotovoltaicos.....	43
Figura 24 – Influência da radiação e da temperatura em células fotovoltaicas.....	44
Figura 25 – Células fotovoltaicas de silício policristalino e monocristalino.....	44
Figura 26 – Célula de silício amorfo.	45

Figura 27 – Terceira geração de tecnologias fotovoltaicas. (a) Célula orgânica. (b) Placa composta por células com concentração de raios incidentes. (c) Esquema de uma célula de multijunção de alta eficiência.	46
Figura 28 – Tecnologias para aproveitamento de energia térmica.	48
Figura 29 – Demanda industrial de energia térmica na Europa (2003).	49
Figura 30 – Sistema de coletores de energia solar integrados a um sistema de geração de energia já existente.	53
Figura 31 – Geração de vapor em um vaso separador flash.	53
Figura 32 – Geração de vapor no coletor de calhas parabólica.	54
Figura 33 – Geração de vapor em um trocador de calor.	54
Figura 34 – Painéis fotovoltaicos instalados no telhado do Centro de Inovação da J&J's em San Diego.	55
Figura 35 – Evolução do preço de sistemas fotovoltaicos completos de 2001 à 2013.	57
Figura 36 – Gráfico da estimativa de geração de energia térmica a partir de tecnologias solares até 2050.	60
Figura 37 – Planta de produção de Gatorade em Phoenix, Arizona.	62
Figura 38 – Sistema de energia solar na Frito-Lay em Modesto, Califórnia.	63
Figura 39 – Planta da Frito-Lay em Modesto, Califórnia.	63
Figura 40 – Processo básico de produção da planta Frito-Lay em Casa Grande, Arizona.	64
Figura 41 – Fotografia do sistema de aproveitamento de energia solar passiva na planta Frito-Lay, Casa Grande.	65
Figura 42 – Foto dos painéis fotovoltaicos da planta Frito-Lay, Casa Grande.	65
Figura 43 – Fotografia dos sistemas fotovoltaicos instalados no estacionamento da Frito-Lay, Casa Grande.	66
Figura 44 – Concentradores de disco parabólico situados na planta Frito-Lay, Casa Grande.	66
Figura 45 – Sistema de recuperação de água na planta Frito-Lay, Casa Grande.	67
Figura 46 – Caldeira de biomassa na planta Frito-Lay, Casa Grande.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia do setor industrial no Brasil – 2012	20
Tabela 2 – Consumo energético por setor industrial e por fonte de energia - 2012	20
Tabela 3 – Tipos de tecnologias solares classificadas de acordo com o tipo de mecanismo de funcionamento/rastreamento.....	30
Tabela 4 – Características de diferentes tecnologias para geração heliotérmica.....	31
Tabela 5 – Eficiência e características de células fotovoltaicas definidas em condições de referência (ASTM G-173-03), espectro AM 1.5, 25°C.....	46
Tabela 6 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria de alimentos e bebidas (°C).....	50
Tabela 7 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria de papel e celulose (°C).....	50
Tabela 8 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria química (°C).....	51
Tabela 9 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria têxtil (°C).....	51
Tabela 10 – Peso de CO ₂ emitido por milhão de BTUs (lb).....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	graus Celsius
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de Cobre Índio Gálio
CO₂	Dióxido de Carbono
CPC	<i>Compound parabolic collector</i>
CSP	<i>Concentrated solar power</i>
CTC	<i>Cylindrical trough collector</i>
ddp	diferença de potencial
EJ	exajoule
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETC	<i>Evacuated tube collector</i>
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
FPC	<i>Flat plate collector</i>
GWh	gigawatt hora
HFC	<i>Heliostat field collector</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
Kg	kilograma
kW	kilowatt
kWh	kilowatt hora
kWh/m²	kilowatt hora por metro quadrado
LEED-EB	<i>Leadership in Energy and Environmental Design for Existing Buildings</i>
LRF	<i>Linear Fresnel collector</i>

m²	metro quadrado
m³	metro cúbico
MME	Ministério de Minas e Energia
MTSA	<i>Multi-tower solar array</i>
MW	megawatt
NO_x	Óxido de Nitrogênio
OIE	Oferta Interna de Energia
PDR	<i>Parabolic dish reflector</i>
PTC	<i>Parabolic trough collector</i>
SEIA	<i>Solar Energy Industries Association</i>
SHC	<i>Solar heating and cooling</i>
tep	toneladas equivalentes de petróleo
TiO₂	Dióxido de Titânio
TWh	terawatt hora
US\$	Dólar (moeda americana)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivo geral	16
1.3	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Balanco energético brasileiro	18
2.1.1	<i>Balanco energético na indústria</i>	19
2.2	Energia Solar	21
2.2.1	<i>Panorama nacional</i>	21
2.3	Formas de aproveitamento de energia solar	23
2.3.1	<i>Energia térmica</i>	23
2.3.2	<i>Energia elétrica</i>	24
3	METODOLOGIA	27
4	TECNOLOGIAS PARA O APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR	29
4.1	Tipos de tecnologias	29
4.1.1	<i>Coletores solares</i>	29
4.1.2	<i>Painéis fotovoltaicos</i>	42
4.1.3	<i>Sistemas integrados termo-fotovoltaicos</i>	47
4.2	Utilização das tecnologias solares no setor industrial	47
4.2.1	<i>Demanda de energia térmica</i>	48
4.2.2	<i>Integração de coletores de energia solar em processos industriais</i>	52
4.2.3	<i>Demanda de energia elétrica</i>	54
4.3	Impactos ambientais	55
4.4	Custo	57
4.5	Benefícios e limitações	58
4.5.1	<i>Benefícios</i>	58
4.5.2	<i>Limitações</i>	58
4.6	Considerações finais	59
5	ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO: FRITO-LAY	61
5.1	Energia solar na PepsiCo	61
5.2	Frito-Lay: Projeto emissões zero	64
5.2.1	<i>Tecnologias implementadas</i>	65
5.2.2	<i>Resultados</i>	68
5.3	Sustentabilidade ambiental: Estratégia de Mercado	68

6 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o crescimento populacional e a melhora na qualidade de vida têm aumentado drasticamente a demanda por energia. Além disso, o crescimento econômico, apesar de ainda ser fundamental para o desenvolvimento de um país, frequentemente resulta no uso abusivo de recursos naturais e elevado consumo de energia (REIS et al., 2005). Reis et al. (2005) afirmam que o modelo de desenvolvimento sustentável global dependerá [no futuro] da composição das fontes de energia, da eficiência das tecnologias de suprimento e da forma que a energia será utilizada.

De acordo com Sachs¹ (1997 apud VAN BELLEN, 2002, p. 21), o desenvolvimento sustentável pode ser analisado por cinco perspectivas diferentes: social, econômica, ambiental, cultural e geográfica.

Para o desenvolvimento ambiental sustentável, é necessário que haja redução da utilização de combustíveis fósseis e a substituição destes por recursos renováveis visando a redução na emissão de substâncias poluentes. Além disso, faz-se necessário a adoção de políticas de conservação de energia e o aumento da eficiência energética em relação aos recursos utilizados (SACHS, 1997 apud VAN BELLEN, 2002, p. 26).

A necessidade de adaptação industrial às tecnologias mais limpas tem aumentado mundialmente, seja por ações voluntárias ou por determinações de metas estabelecidas pelo governo.

A utilização de indicadores ambientais é uma forma eficiente de acompanhar e controlar a qualidade de processos, alcançar metas e estabelecer planos de ação para a busca de melhoria contínua.

Quantidade de emissão de CO₂, consumo de água, disposição de resíduos sólidos, volume de águas residuais não tratadas, consumo de óleos combustíveis, gás natural e energia elétrica são exemplos de indicadores ambientais utilizados no setor industrial (FIRJAN, 2008).

¹ SACHS, I. Desenvolvimento sustentável, bio-industrialização descentralizada e novas configurações rural-urbanas. Os casos da Índia e do Brasil. In Vieira, P. F. e Weber, J. (orgs.) **Gestão de recursos naturais renováveis e desenvolvimento: novos desafios para a pesquisa ambiental**. São Paulo: Cortez, 1997.

A partir desses indicadores, é possível notar a importância da eficiência energética e da utilização de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável industrial.

A energia solar é uma fonte alternativa de energia limpa e inesgotável, que combinada com outras fontes de energia, atende às necessidades sociais, ambientais e econômicas de um país.

Além da conversão de energia solar em calor e eletricidade, pesquisadores têm desenvolvido tecnologias para a utilização de energia solar em sistemas de dessalinização da água, sistemas de crescimento de algas para produção de biocombustíveis, células fotoeletroquímicas, entre outros. Essas tecnologias, ainda em desenvolvimento, apresentam elevados potenciais de aplicação e podem desempenhar um papel importante no desenvolvimento de um sistema de energia sustentável.

Neste trabalho são apresentadas as tecnologias solares existentes no mercado. Foram identificadas e analisadas possíveis oportunidades de aplicações dessas tecnologias em processos industriais como fonte de energia térmica e elétrica. Além disso, a revisão bibliográfica é complementada pela análise de um estudo de caso sobre a aplicação de tecnologias solares na empresa Frito-Lay.

1.1 Justificativa

Expectativas de Mercado do IBGE e do Banco Central do Brasil apontam uma tendência de crescimento econômico positivo para os próximos anos. Portanto, faz-se necessária a diversificação e utilização de tecnologias de menor impacto ambiental para complementar as tecnologias já existentes na matriz energética brasileira (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2013).

De acordo com o Balanço Energético Brasileiro de 2012 (EPE, 2013), grande parte da energia utilizada em indústrias é proveniente de fontes não-renováveis, como o gás natural. Além disso, os processos térmicos, que são os maiores consumidores de energia na indústria, e o elevado consumo de energia elétrica apontam uma oportunidade de utilização de energia solar como fonte de energia complementar, com o objetivo de contribuir para um desenvolvimento industrial mais sustentável.

Apesar do Brasil ser considerado um líder mundial em energias renováveis, a dependência nacional por usinas hidroelétricas pode impactar a distribuição de energia em épocas de baixos índices pluviométricos, o que pode causar um aumento em custos para a indústria.

A necessidade ambiental, exigências governamentais de redução de emissão de gases e geração de resíduos, o aumento do custo de combustíveis fósseis e o desenvolvimento de tecnologias solares de baixo custo estão tornando a energia solar uma alternativa limpa e de elevado potencial.

José Aníbal, Secretário do Estado de Energia, afirma:

A transformação dessa energia para utilização térmica ou na geração de eletricidade se apresenta como uma oportunidade incontornável para o Brasil. Com extensão territorial e localização geográfica privilegiada, sob essa e outras perspectivas, o país pode transformar essa fonte inesgotável em um importante recurso de sua matriz energética (SECRETARIA DE ENERGIA, 2013, p.8).

Do ponto de vista estratégico, o Brasil possui grande potencial para a utilização de sistemas de geração de energia a partir do Sol devido ao elevado índice de radiação solar em todo o território nacional (SCHEIDT; MULLER, 2011). A irradiação solar global incidente na Alemanha, França e Espanha (900-1250; 900-1650; 1200-1850kWh/m² respectivamente), onde há ampla disseminação de tecnologias de aproveitamento de energia solar, são muito inferiores a irradiação solar global incidente no Brasil (4200-6700kWh/m²) (PEREIRA et al., 2006, p. 31).

1.2 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo a identificação e análise de possíveis aplicações de tecnologias solares em processos industriais como fonte de energia, levando em consideração aspectos ambientais e econômicos.

1.3 Objetivos específicos

- Identificar e descrever as tecnologias solares existentes no mercado;
- Analisar o balanço energético brasileiro por setor industrial;

- Analisar oportunidades para o emprego de energia solar em processos específicos industriais de baixa e média temperatura (indústria de bebidas e alimentos, e têxtil, por exemplo);
- Descrever a aplicação de energia térmica e elétrica proveniente de tecnologias solares em processos e operações unitárias;
- Estudar a eficiência energética e impactos ambientais proveniente da utilização de energia solar;
- Analisar limitações relacionadas a implementação de tecnologias solares;
- Analisar um estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Balanço energético brasileiro

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2013), 42,4% da Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil é proveniente de fontes renováveis, contra apenas 13,2% na média mundial, conforme apresentado na Figura 1. As hidroelétricas e os produtos provenientes da cana-de-açúcar são as maiores fontes de energia renovável.

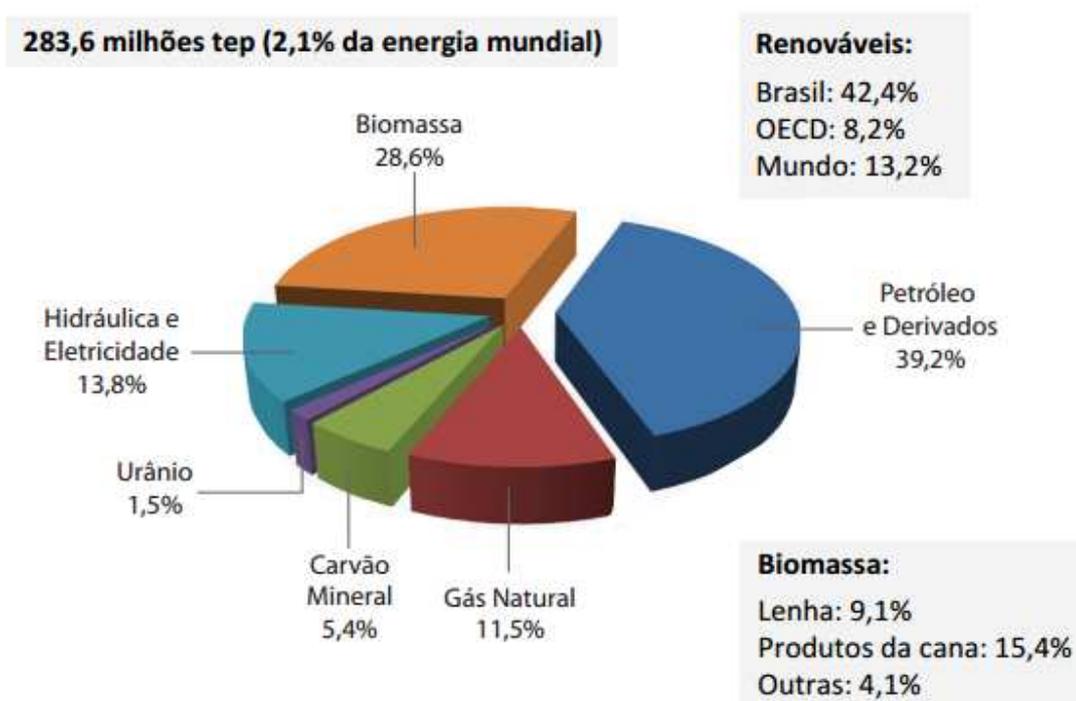


Figura 1 – Oferta interna de energia no Brasil – 2012
Fonte: MME, 2013.

A matriz de energia elétrica brasileira é baseada principalmente em hidroelétricas. Estas são responsáveis pela geração de cerca de 70% de toda a energia elétrica brasileira, como mostra a Figura 2 (MME, 2013).

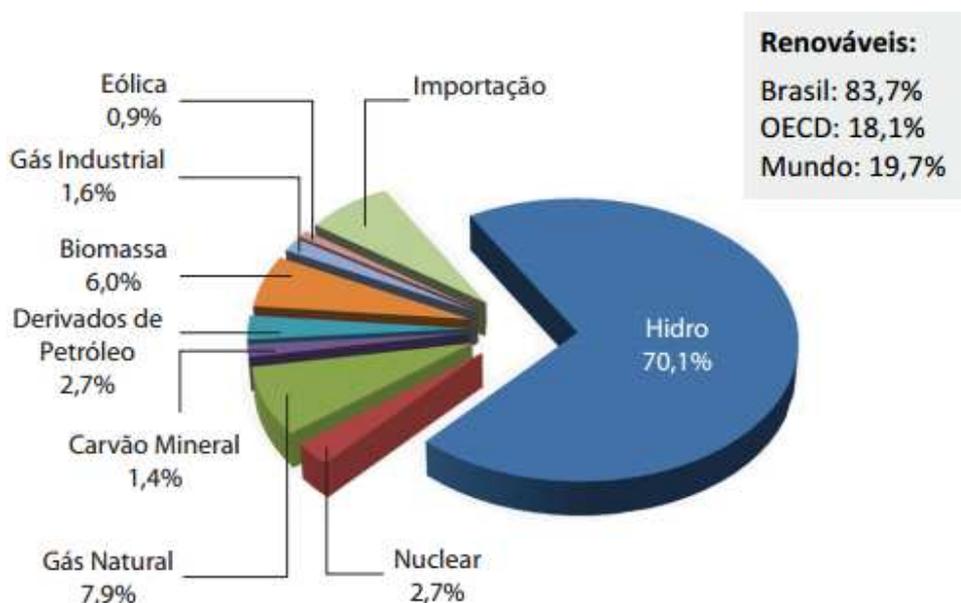


Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica² – 2012
Fonte: MME, 2013.

Amorim e Bahemann (2014) explicam que em períodos de seca, termoeletricas são acionadas a fim de compensar os baixos níveis dos reservatórios. O aumento do uso de produção das termoeletricas cresceu 286% (de 8,4% a 19,8%) de 2011 a 2013 (ANEEL, 2013). Esse aumento está causando volatilidade no custo de energia elétrica e refletindo em um aumento de custos para o consumidor final e para as indústrias (AMORIM; BAHEMANN, 2014).

2.1.1 Balanço energético na indústria

Em 2012, a indústria brasileira foi responsável pelo consumo de 35,4% (209,6TWh) de energia elétrica e 31,4% (89×10^6 tep) de toda energia consumida no país.

A Figura 3 ilustra o consumo de energia por setor industrial brasileiro de 1973 a 2012 (EPE, 2013, p. 85). A denominação “outros” faz referência às fontes: gás de coqueria, coque de carvão mineral, carvão mineral e vegetal, outras fontes primárias renováveis, entre outros não especificados, como mostra a Tabela 1. A Tabela 2 apresenta dados de alguns setores da indústria brasileira e seus respectivos consumos energéticos por fonte.

² Inclui Autoprodutor Cativo (47,4TWh): Geração consumida no local, sem uso de rede pública (MME, 2013, p. 9)

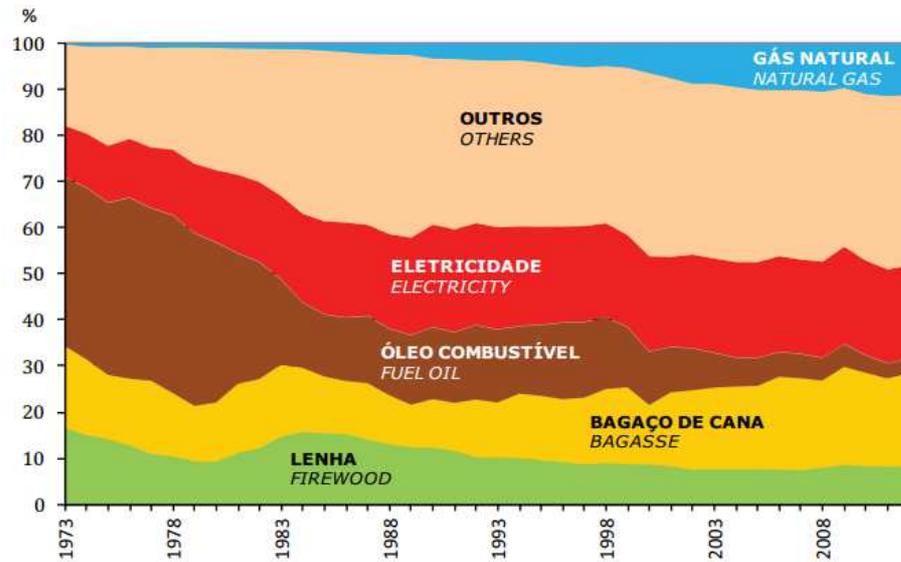


Figura 3 – Estrutura do consumo no setor industrial.

Fonte: EPE, 2013.

Tabela 1 – Consumo de energia do setor industrial no Brasil – 2012

Fontes	2012 (%)
Eletricidade	20,3
Bagaço de cana	20,1
Gás natural	11,1
Coque de carvão mineral	9,0
Lenha	8,4
Carvão vegetal	4,6
Carvão mineral	4,0
Óleo combustível	3,0
Gás de coqueria	1,4
Outras fontes primárias renováveis	6,7
Outros	11,4

Fonte: EPE, 2013.

Tabela 2 – Consumo energético por setor industrial e por fonte de energia - 2012

Fontes	Química	Têxtil	Alimentos e Bebidas	Papel e Celulose
Gás natural	32.2	27.6	2.7	7.1
Carvão vapor	2.2	-	0.3	1.2
Lenha	0.6	6.3	9.6	15.2
Óleo combustível	4.4	3.9	1.1	3.3
Eletricidade	27.7	59.0	10.1	16.7
Bagaço de cana	-	-	74.2	-
Lixívia	-	-	-	46.1
Outras	32.8	3.1	2	10.3

Fonte: EPE, 2013.

2.2 Energia Solar

O Sol é uma fonte inesgotável de energia, que é naturalmente aproveitada na forma de luz e calor em diversos processos fundamentais a existência humana, como o aquecimento, evaporação, fotossíntese e transpiração, por exemplo (KALOGIROU, 2009).

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol na forma de ondas eletromagnéticas. Em média, aproximadamente 43% dessa radiação é refletida ou absorvida pela atmosfera e 57% é absorvida pela Terra na forma de radiação solar direta e difusa (IPCC³, 2001 apud IEA, 2011, p. 31).

A radiação solar direta incide diretamente sobre a superfície terrestre, propagando-se sob a forma de raios paralelos. A radiação solar difusa é aquela que sofre algum tipo de desvio por moléculas em suspensão na atmosfera antes de atingir à superfície terrestre (IEA, 2011).

A radiação solar que atinge a superfície da Terra é tão intensa que em apenas 84 minutos, equivalentes a 1.4×10^{14} kW de radiação recebida, seria capaz de suprir a demanda energética mundial por um ano - aproximadamente 900 EJ (KALOGIROU, 2009, p. 49).

2.2.1 *Panorama nacional*

No Brasil, apesar das grandes disparidades climáticas, a radiação solar média é bastante uniforme, com médias anuais relativamente altas em todo o território brasileiro (PEREIRA et al., 2006, p.31). A Figura 4 apresenta a irradiação solar média no Brasil por região e compara a radiação solar média incidente no Brasil e em alguns países, como Estados Unidos e Alemanha. Nota-se que o potencial de utilização da energia solar no Brasil é maior que na Alemanha, um dos países com maior produção de energia solar.

Atualmente, o governo brasileiro está investindo em programas de caráter social para o aproveitamento de energia solar em áreas rurais ou de difícil acesso, onde não há sistemas de rede elétrica, e também em regiões frias, onde há maior demanda residencial por energia térmica (ANEEL, 2013).

³ IPCC. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2011.

ANNUAL MEAN DAILY SOLAR IRRADIATION

kWh/m²

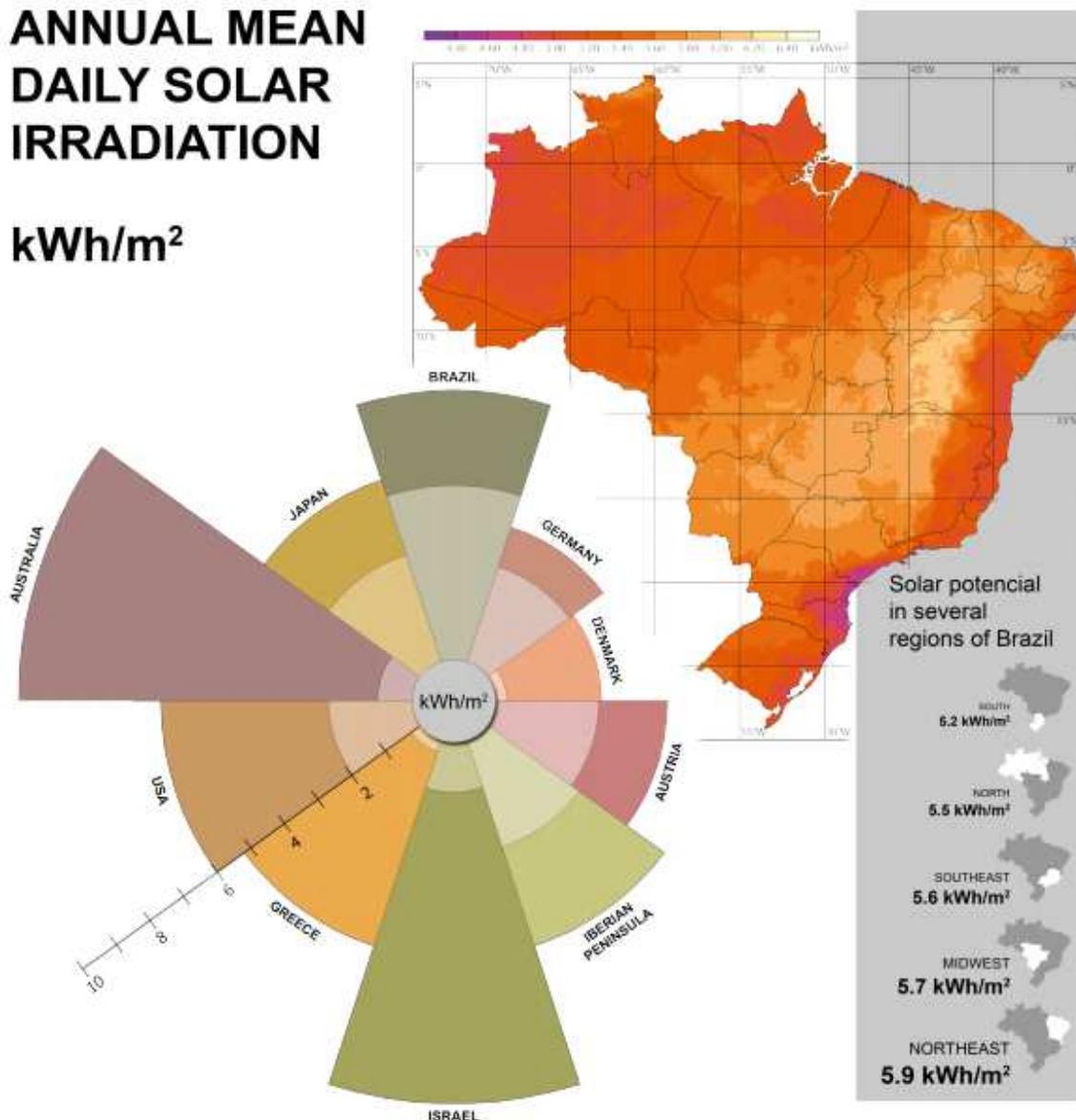


Figura 4 – Irradiação solar global média anual⁴ (kWh/m²).
Fonte: PEREIRA, 2009.

Além disso, em abril de 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa 482/2012 que regulariza: a conexão de microgeradores e minigeradores⁵ de energia à rede elétrica pública e o sistema de compensação de energia (*net metering*). Dessa forma, qualquer energia

⁴ Mapa solarimétrico baseado nos valores médios das estimativas do total diário de radiação solar para o período de julho de 1995 a dezembro de 2005 (PEREIRA et al., 2006, p. 34).

⁵ Microgeradores e minigeradores solares fotovoltaicos são sistemas de geração de energia elétrica de pequena potência (até 100kW e de 100kW à 1 MW, respectivamente) capazes de produzir energia suficiente para alimentar uma casa/edifício, uma empresa de pequeno porte, e até um galpão industrial (ANEEL, 2013).

gerada e não consumida pode ser trocada por créditos em kWh na conta de luz através do auxílio de um medidor bidirecional.

O aproveitamento da energia solar ainda é pouco significativo no Brasil, sendo responsável por apenas 0,01% de toda a geração de energia no país (MME, 2013).

2.3 Formas de aproveitamento de energia solar

Com o desenvolvimento tecnológico de sistemas de captação e conversão de energia, a energia solar tem sido aproveitada para diversas finalidades. Alguns exemplos de aplicação são: dessalinização de água, fogão solar, chaminé solar, aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, geração de hidrogênio através de células fotoeletroquímicas, geração de vapor para processos industriais e geração de energia elétrica de baixa potência (micro e minigeração) e de alta potência (usinas solares) (KALOGIROU, 2009; MILLS, 2004).

Para as indústrias, a melhor forma de aproveitamento da energia solar é a geração de outros tipos de energia. A energia térmica e elétrica são as de maior demanda industrial e, portanto, dar-se-á maior foco ao estudo das mesmas.

2.3.1 Energia térmica

O aproveitamento térmico por tecnologias solares pode ser dividido em três categorias: de baixa (até 100°C), média (até 400°C) e elevada temperatura (até 2000°C) (KALOGIROU, 2009).

O aproveitamento térmico de baixa temperatura é baseado na conversão da irradiação solar direta e difusa em calor através do aquecimento de um fluido de trabalho. Este fluido é geralmente ar ou água e pode ser utilizado tanto para o uso doméstico (calefação e aquecimento de água) quanto para o uso industrial (secagem de grãos e pré-aquecimento de água para processo) (ANEEL, 2005; KALOGIROU, 2009).

O aproveitamento térmico de média temperatura e elevada temperatura é obtido através de tecnologias baseadas em superfícies espelhadas que refletem e concentram os raios solares em uma área reduzida (KALOGIROU, 2009). Essa área, na qual o fluido de trabalho passa, pode ser tubular ou pontual. O fluido de trabalho é geralmente água ou sais fundidos,

ambos visando a geração de vapor seja de forma direta (água – vapor d`agua), seja de forma indireta (sais fundidos – trocador de calor – vapor d`agua).

É possível atingir temperaturas de até 3500°C através de fornalhas solares. As fornalhas existentes são utilizadas apenas como fonte de pesquisa por exigirem elevado investimento. No entanto, esforços tem sido feitos para torná-las economicamente viável (CHONG; LIM; HIEW, 2011). A figura 5 mostra a maior fornalha do mundo, ativa desde 1970.



Figura 5 – Fornalha solar em Odeillo Font-Romeu, Pyrénées-Orientales, França.
Fonte: HÉLIODYSSÉE®.

2.3.2 Energia elétrica

Basicamente, existem duas formas de converter energia solar em energia elétrica: através da geração de energia heliotérmica e fotovoltaica (KALOGIROU, 2009).

2.3.2.1 *Heliotérmica*

A geração de energia heliotérmica, também conhecida por *Concentrated Solar Power (CSP)*, é baseada na conversão da energia térmica de alta temperatura em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica (KALOGIROU, 2009).

Sistemas de geração de energia heliotérmica são geralmente utilizados em usinas heliotérmicas, também conhecidas por usinas termossolares, mas podem também ser utilizados em plantas industriais (EPE, 2012; KALOGIROU, 2009).

O conceito de usinas heliotérmicas é similar ao de usinas termoelétricas convencionais. No entanto, ao invés de combustíveis fósseis e energia nuclear como fonte primária de calor, centrais heliotérmicas fazem uso da radiação solar (BURATTINI, 2008).

O princípio básico de funcionamento de um sistema de geração de energia heliotérmica está esquematizado na Figura 6. Nesse sistema, a tecnologia solar utilizada é o concentrador linear de Fresnel e o fluido de trabalho é a água. Primeiramente, a radiação solar direta é refletida e concentrada em um receptor. A água contida no receptor é superaquecida, expandindo-se na forma de vapor. O vapor gerado escoa através de uma turbina, é condensado e retorna ao receptor. A medida que o vapor realiza trabalho nas pás da turbina, o eixo gira e produz trabalho (ÇENGEL; BOLES, 2006). Em seguida, a energia mecânica contida no eixo de rotação da turbina é convertida em energia elétrica com o auxílio de um gerador.

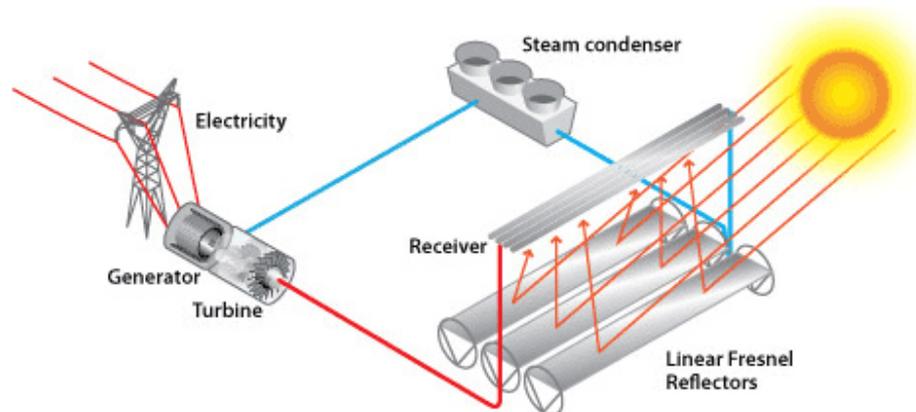


Figura 6 – Esquema de um sistema de geração de energia heliotérmica.
Fonte: US DEPARTMENT OF ENERGY.

2.3.2.2 *Fotovoltaica*

A energia fotovoltaica pode ser definida como a energia elétrica gerada a partir da conversão direta de radiação solar em materiais semicondutores fotossensíveis. Essa conversão ocorre devido a um fenômeno conhecido por efeito fotoelétrico, que consiste no deslocamento de elétrons a partir da incidência de radiação eletromagnética (KALOGIROU, 2009; PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011).

Leva et al. (2004) classificam os sistemas fotovoltaicos em três categorias principais: isolados, híbridos e conectados as redes.

Os componentes de sistemas de geração fotovoltaica variam de acordo com a aplicação considerada, exceto os painéis fotovoltaicos que são comuns em todas as categorias. Outros possíveis componentes de sistemas fotovoltaicos são: inversores, controladores de carga, baterias e componentes para suporte (fios, conectores, entre outros) (ABINEE, 2012).

O sistema de geração fotovoltaica pode ser constituído por apenas um painel fotovoltaico ou por centenas de painéis conectados, o que possibilita a geração de energia em centrais de geração e em sistemas de microgeração, tanto em áreas urbanas (em sistemas integrados com a rede elétrica) quanto em áreas rurais e/ou áreas afastadas de centros ou redes elétricas (KALAGIROU, 2009).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada constituiu em uma revisão bibliográfica complementada pela análise de um estudo de caso. O estudo de caso é de literatura e não foi vivenciado pela autora, portanto trata-se de uma pesquisa baseada em revisão bibliográfica.

Para Lakatos e Marconi (2003, p. 183):

“A pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange toda a bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudos, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico etc., até meios de comunicação orais [...] e propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras”.

O estudo qualitativo do tema abordado foi realizado através de livros-texto, principalmente de processos industriais, transferência de calor, sistemas de energia sustentáveis e energia solar, relatórios de instituições governamentais e de pesquisa no setor de energia, artigos científicos, e pesquisas realizadas por empresas que desenvolvem tecnologias solares.

No desenvolvimento deste trabalho, foi realizado o levantamento das tecnologias solares mais utilizadas mundialmente e das tecnologias em desenvolvimento com elevado potencial de aplicação. Descreveu-se o princípio de funcionamento de cada uma das tecnologias estudadas para facilitar o entendimento de como essas tecnologias poderiam ser utilizadas na indústria. A demanda industrial por energia térmica e energia elétrica foi analisada, juntamente com a análise de processos unitários específicos de cada indústria estudada, com o objetivo de buscar os setores industriais com maior potencial de aplicação de tecnologias solares. Em seguida, foram apresentadas algumas formas de integração das tecnologias solares em processos industriais e o custo associados às mesmas. De forma sucinta, foram apontados os benefícios e limitações da utilização de tecnologias solares analisando-se aspectos tecnológicos, políticos e econômicos. A análise de um estudo de caso sobre a empresa Frito-Lay foi realizado para retratar a experiência de uma indústria ao utilizar a energia solar como fonte de energia térmica e elétrica em suas plantas industriais, centros de distribuição, escritórios, e laboratórios. O acesso às informações sobre a empresa foram

limitados à um estudo realizado pela autora Larson (2011), além de informações obtidas em relatórios de sustentabilidade disponíveis no site da empresa.

Nota-se que tecnologias solares têm expandido rapidamente em todo o mundo. Dessa forma, a quantidade elevada de inovações que surgem diariamente dificulta o levantamento de todas as tecnologias desenvolvidas. Além disso, por se tratar de uma tecnologia com elevado interesse estratégico, muitas informações têm acesso restrito ou são protegidas por patentes.

4 TECNOLOGIAS PARA O APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR

4.1 Tipos de tecnologias

Empresas do setor de energia e institutos de pesquisa espalhados pelo mundo inteiro têm desenvolvido novas tecnologias com objetivo de melhorar o processo de captação, conversão e armazenamento de energia. Por conta disso, é praticamente impossível listar todos os tipos existentes de tecnologias e configurações de sistemas de geração de energia a partir do Sol. É possível, no entanto, dividir os tipos de tecnologias por princípio de funcionamento em duas categorias: coletores solares e células fotovoltaicas.

4.1.1 *Coletores solares*

Os coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar direta e difusa em calor. Estes podem ser classificados em concentradores e não-concentradores, rastreadores e estacionários (KALOGIROU, 2009).

Os coletores não-concentradores, destinados a aplicações que demandem baixas temperaturas, são planos e possuem área de absorção de radiação equivalente ao tamanho do coletor (KALOGIROU, 2009).

Em aplicações que exigem altas temperaturas, como a geração de vapor e a geração de energia heliotérmica, os concentradores solares são mais adequados. Esses concentradores são geralmente côncavos e espelhados para a conversão da radiação solar em uma área menor de absorção.

O receptor, ou absorvedor, é instalado no ponto, na linha ou no plano focal do concentrador. O fluido de trabalho escoa no interior desse receptor, sendo este revestido por uma cobertura “[...] com alta absorbância a irradiação solar e baixa emitância para irradiação térmica [...]” (KALOGIROU, 2009 apud MALAGUETA, 2012, p.18).

Mecanismos de rastreamento solar, compostos por unidades mecânicas, sensores e controladores, podem ser utilizados a fim de otimizar a eficiência de absorção de radiação. A utilização de mecanismos de rastreamento pode ser opcional para algumas tecnologias, como em coletores parabólicos compostos e painéis fotovoltaicos, e fundamental para outras, como

concentradores de calhas parabólicas e torre central. Através dos mecanismos de rastreamento, os coletores solares podem se mover em uma ou duas direções (KALOGIROU, 2009).

A escolha de determinada tecnologia depende da necessidade de aplicação, além da disponibilidade de recursos naturais, econômicos e tecnológicos (KALOGIROU, 2009).

A Tabela 3 apresenta tecnologias solares para aproveitamento térmico, suas principais características e faixas de temperaturas mínima e máxima alcançadas.

Tabela 3 – Tipos de tecnologias solares classificadas de acordo com o tipo de mecanismo de funcionamento/rastreamento.

Tipo de deslocamento	Tipo de coletor ⁽¹⁾	Tipo de receptor	Fator de concentração ⁽²⁾	Faixa de temperatura (°C)
Estacionário	Coletor de placa plana (FPC)	Plano	1	30-80
	Coletor de tubo a vácuo (ETC)	Plano	1	50-200
Rastreador (1 eixo)	Coletor parabólico composto (CPC)	Tubular	1-5	60-240
			5-15	60-300
	Refletor Linear de Fresnel (LRF)	Tubular	10-40	60-250
	Concentradores de calha cilíndrica (CTC)	Tubular	15-50	60-300
Rastreador (2 eixos)	Concentradores de calha parabólica (PTC)	Tubular	10-85	60-400
Rastreador (2 eixos)	Disco parabólico (PDR)	Pontual	600-2000	100-1500
	Torre central (HFC)	Pontual	300-1500	150-2000

Fonte: KALOGIROU, 2009, p. 122, tradução nossa.

(1) Nota: As siglas correspondentes aos nomes das tecnologias são mantidas em inglês, pois há divergências de nomes em português na literatura.

(2) Nota: O fator de concentração dos raios solares é definida como a razão entre a área de abertura do coletor (área do plano perpendicular ao raio incidente) sobre a área de absorção do receptor.

Os tipos de tecnologias mais utilizadas para geração de energia heliotérmica são: concentrador de calha parabólica, refletor linear de Fresnel, torre central e disco parabólico. As principais características desses sistemas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Características de diferentes tecnologias para geração heliotérmica.

Tecnologia	Capacidade (MW)	Concentração	Eficiência solar máxima (%)	Eficiência solar elétrica (%)	Área requerida m ² /MWh-a
Concentrador de calha parabólica	10-200	70-80	21	10-15	6-8
Refletor linear de Fresnel	10-200	25-100	20	9-11	4-6
Torre central	10-150	300-1000	20	8-10	8-12
Disco parabólico	0,01-0,4	1000-3000	29	16-18	8-12

Fonte: KALOGIROU, 2009, p.524, tradução nossa.

4.1.1.1 Coletor de placa plana

O coletor de placa plana (*FPC – flat-plate collector*) é basicamente composto por uma placa absorvedora (também conhecido por receptor), tubos de circulação do fluido e isolante térmico. O coletor é geralmente coberto por uma chapa de vidro que protege o sistema de possíveis danos.

A Figura 7 ilustra a configuração de um coletor de placa plana com tubos paralelos⁶.

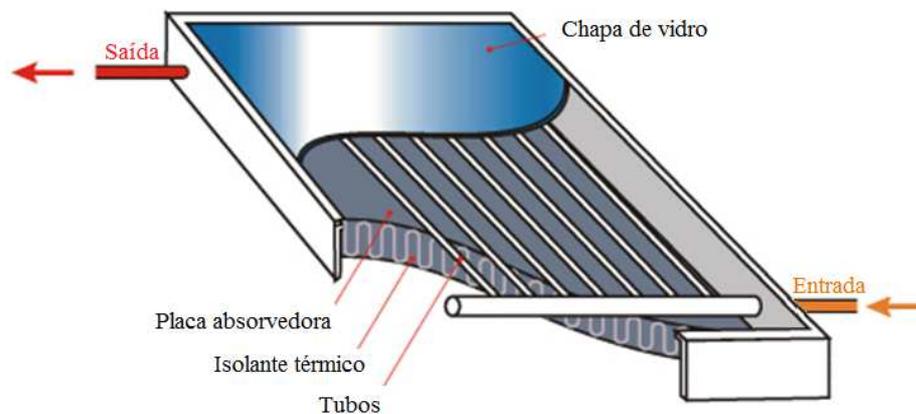


Figura 7 – Ilustração da configuração de um coletor de placa plana.

Fonte: SOLAR WATER HEATING (adaptado).

Nesse tipo de coletor, a radiação solar é convertida em calor através da placa absorvedora. A Figura 8 exibe detalhes da transferência de calor na placa absorvedora. O calor é transferido para os tubos de circulação (por condução) e em seguida para o fluido (por condução seguido de convecção).

⁶ Os tubos presentes no interior do coletor também podem ter o formato de serpentina. No entanto, esse tipo de configuração exige o auxílio de bombas para a movimentação do fluido.

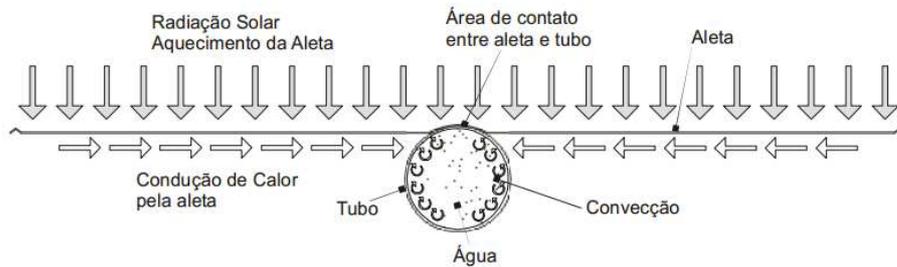


Figura 8 – Transferência de calor na placa absorvedora.
Fonte: SOLARES.

A Figura 9 esquematiza o funcionamento de um coletor de placa plana acoplado a um sistema de aquecimento de água. Como o coletor tem capacidade de aquecer um volume limitado de água, o mesmo pode ser ligado a um tanque termicamente isolado, posicionado acima do coletor solar, com o objetivo de armazenar a água aquecida.

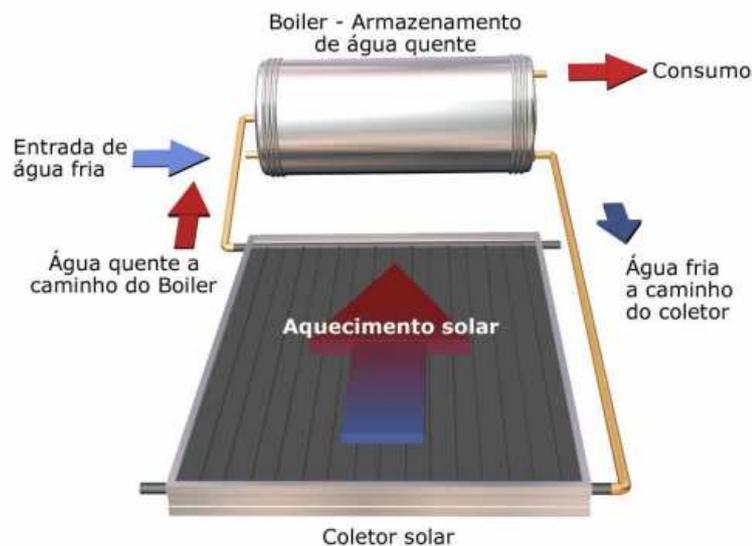


Figura 9 – Sistema de aquecimento de água por um coletor de placa plana.
Fonte: RODRIGUES, 2007.

O princípio de funcionamento do sistema de aquecimento apresentado na figura 9 é também conhecido por termosifão. Inicialmente, o calor coletado pela placa absorvedora é transferido para a água contida nos tubos, gerando gradientes de temperatura. Ao serem aquecidas, as moléculas da água tornam-se menos densas e tendem a subir na massa líquida. Já as moléculas mais densas tendem a descer na massa de água, tomando o lugar das moléculas mais aquecidas. Por fim, a água suficientemente quente é conduzida ao tanque térmico por convecção. A medida em que a água contida no tanque resfria, a água menos

quente é introduzida à parte inferior do coletor para que seja novamente aquecida. Esse movimento convectivo ocorre até que haja um equilíbrio térmico no sistema.

Os coletores de placas planas são os mais utilizados para aproveitamento de energia solar térmica de baixa temperatura (até 100⁰C). Eles são geralmente empregados para o pré-aquecimento de água de uso doméstico e industrial, aquecimento de piscinas, aquecimento de ar para aplicação em sistemas de calefação, na indústria e na agricultura (KALOGIROU, 2009).

4.1.1.2 Coletor de tubo a vácuo

Os coletores de tubo a vácuo (*ETC - evacuated tube collector*) são caracterizados por um isolamento térmico a vácuo que minimiza possíveis perdas de calor.

Na parte interna ao isolamento a vácuo há uma aleta e um tubo, ambos fabricados com material supercondutor. A aleta aumenta a transferência de calor por condução para o tubo, que contém um gás de fácil evaporação. Esse gás sofre um ciclo de evaporação ao longo do tubo e condensação na parte superior do tubo, onde ocorre a transferência de calor para o fluido de aquecimento.

A Figura 10.a é uma representação esquemática do princípio de funcionamento de um coletor de tubo a vácuo e a Figura 10.b é um modelo de aquecedor por tubos a vácuo.

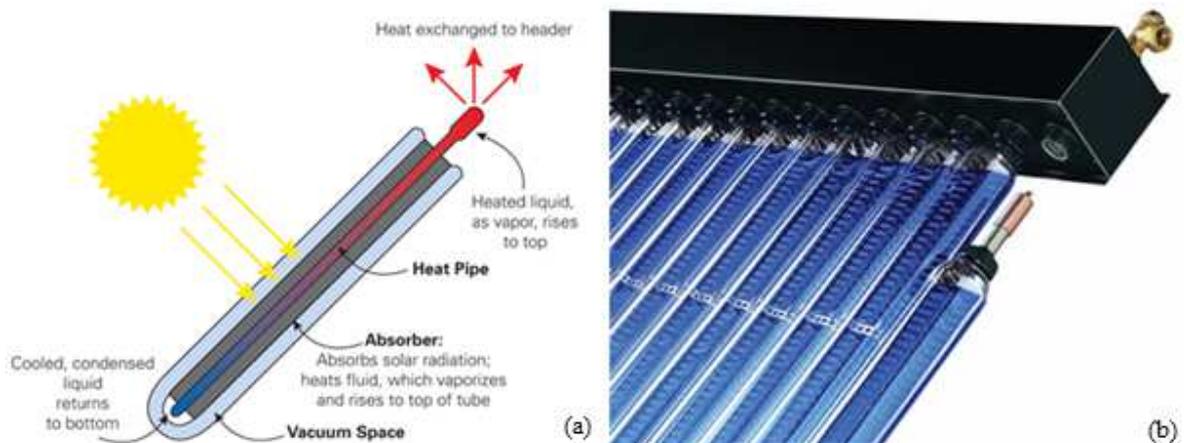


Figura 10 – Coletor de tubos a vácuo. (a) Princípio de funcionamento; (b) Modelo de um coletor comercial.
Fonte: HOME POWER, INC.

A absorção da radiação solar é mais eficiente quando comparada à coletores de placas planas devido ao formato dos tubos que formam o coletor. A Figura 11 mostra que este formato faz com que a incidência de raios solares seja sempre perpendicular à superfície do coletor, o que reduz perdas por reflexão e maximiza a quantidade total de radiação solar absorvida.

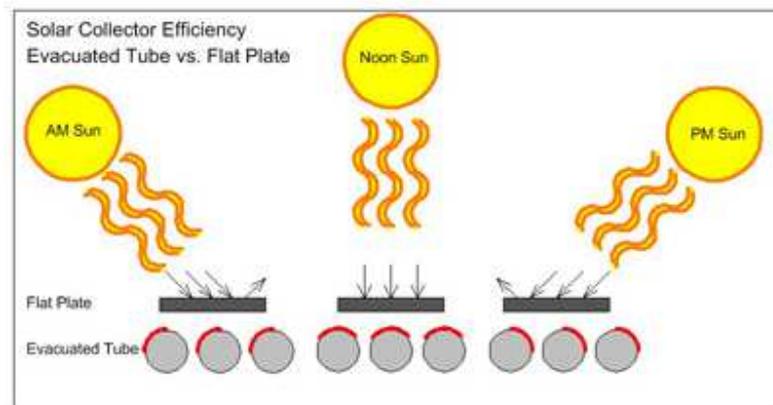


Figura 11 – Eficiência de absorção da radiação solar: Coletor de tubo a vácuo vs. coletor de placa plana.
Fonte: HOME ENERGY METERING.

Pode-se alcançar temperaturas de até 200⁰C com esse tipo de tecnologia, possibilitando a sua aplicação em processos industriais para aquecimento de água e geração de vapor.

4.1.1.3 Coletor parabólico composto

Em coletores parabólicos compostos (*CPC – compound parabolic collector*), todos os raios solares incidentes na superfície dos refletores são refletidos em uma pequena área, por onde passa o fluido de trabalho. O receptor é posicionado de forma que haja o maior aproveitamento energético (KALOGIROU, 2009).

Os coletores parabólicos podem ser fabricados de duas formas: com um único refletor e receptor, ou na forma de uma placa composta por vários refletores e receptores (Figura 12).

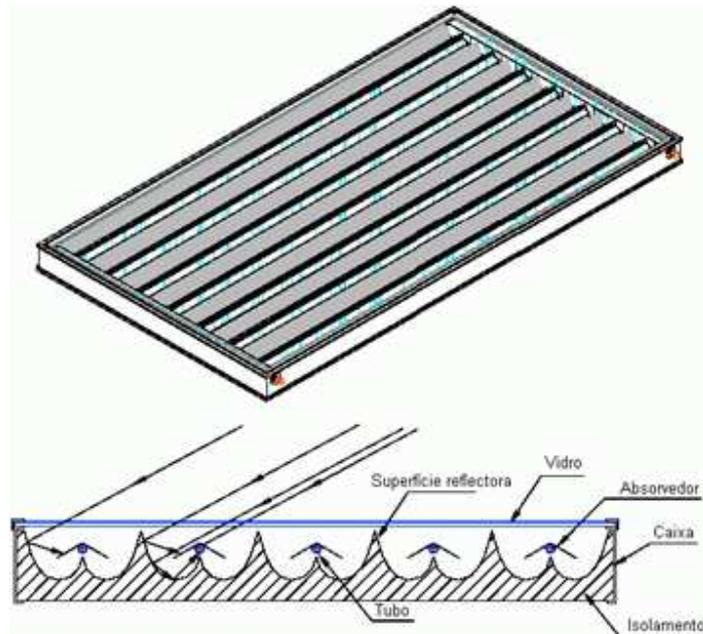


Figura 12 – Esquema de um coletor parabólico composto com receptor tubular.
Fonte: LUSOSOL.

A faixa de temperatura de funcionamento de coletores parabólicos compostos é de 60°C à 240°C. No entanto, é possível obter maior eficiência energética com a utilização de mecanismos de rastreamento solar nas placas coletoras, atingindo-se temperaturas de até 300°C (KALOGIROU, 2009).

4.1.1.4 *Refletor Linear de Fresnel*

O refletor linear de Fresnel (*LFR – linear Fresnel reflector*) possui uma configuração simples, na qual espelhos são posicionados de forma que os raios incidentes sejam refletidos para um tubo que contém um fluido de aquecimento. Nesse tipo de sistema, os espelhos são equipados com mecanismos individuais de rastreamento solar e movimentam-se em apenas um eixo. O receptor, composto por um ou mais tubos, é mantido fixo e pode ter um espelho côncavo na parte superior para a concentração de raios possivelmente dissipados (Figura 13).

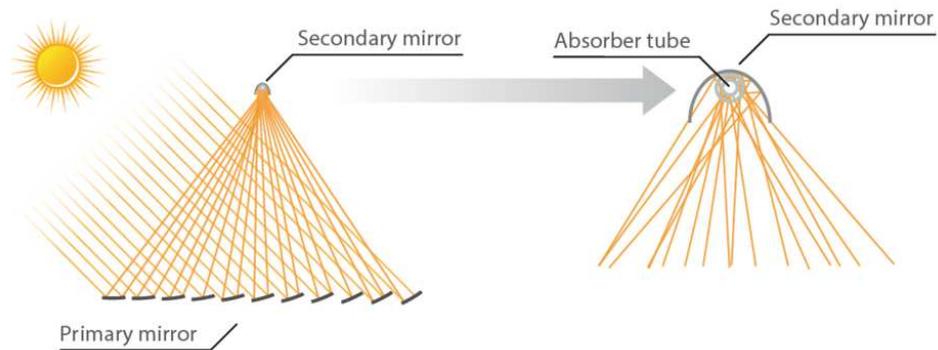


Figura 13 – Esquema de concentração em um refletor linear de fresnel.
Fonte: INDUSTRIAL SOLAR THERMAL SOLUTIONS.

Geralmente, o fluido de trabalho é a água e o sistema funciona como um gerador de vapor. No entanto, algumas plantas utilizam outros fluidos de aquecimento como óleo e sais fundidos que posteriormente passam por um trocador de calor para a geração de vapor (KALOGIROU, 2009).

A Figura 14 apresenta um refletor linear de Fresnel situado na usina termossolar Kimberlina em Bakersfield, Califórnia. De acordo com o Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos, essa usina tem capacidade de produzir vapor com uma temperatura média de 300°C e até 5MW de potência elétrica⁷.



Figura 14 – Refletor Linear de Fresnel AREVA Solar.
Fonte: AREVA.

⁷ Mais detalhes sobre o projeto Kimberlina pode ser encontrado em:
<http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=37>

4.1.1.5 Concentradores de calhas cilíndricas e parabólicas

Os concentradores de calhas cilíndricas (*CTC – cylindrical trough collector*) e parabólicas (*PTC – parabolic trough collector*) possuem características bastante semelhantes, sendo o formato do coletor a única diferença física existente entre elas (Figura 15). Nota-se que uma linha focal é formada em calhas parabólicas e um plano focal é formado em calhas cilíndricas (STINE; GEYER, 2001).

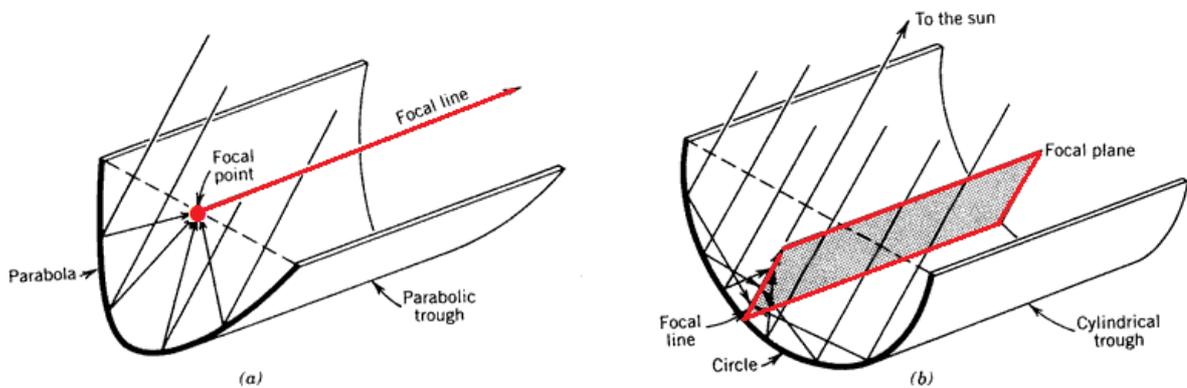


Figura 15 – Ilustração de concentradores de calha (a) Parabólica (b) Cilíndrica.
Fonte: STINE; GEYER, 2001 (adaptado).

Para um melhor aproveitamento de calhas cilíndricas, faz-se necessário a utilização de um segundo coletor térmico ou fotovoltaico bifacial no plano focal, o que torna a tecnologia mais cara e menos eficiente. Em calhas parabólicas, a concentração solar é mais eficiente do que em calhas cilíndricas devido a maior concentração de raios solares em uma área reduzida (STINE; GEYER, 2001).

Stine e Geyer (2001) enfatizam que ambas tecnologias necessitam de um mecanismo de rastreamento solar para que sejam eficientes.

A Figura 16 é uma simulação do movimento de rastreamento solar do concentrador de calha parabólica. Observa-se que a calha se movimenta em um eixo.

A Figura 17 é uma foto tirada em uma usina solar na Espanha. A usina, que utiliza concentradores de calha parabólica, tem capacidade de geração de 50MW de potência e reduz a emissão de cerca de 31.400 toneladas de CO₂ por ano ⁸.

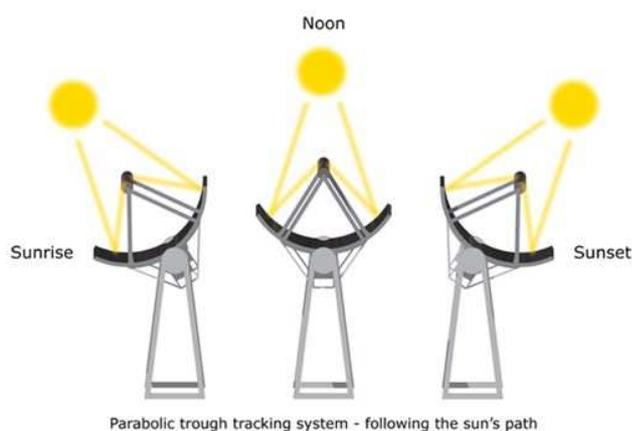


Figura 16 – Simulação do movimento de rastreamento solar de um concentrador de calha parabólica.
Fonte: AALBORG CSP A/S.



Figura 17 – Fotografia da usina solar Solnova 1 em Sevilha, Espanha.
Fonte: MARINO, 2010.

O concentrador de calhas parabólicas é o coletor mais utilizado para geração de vapor em indústrias (KALOGIROU, 2009). Além disso, Kalogirou (2009) afirma que é uma tecnologia com eficiência comprovada em plantas de geração heliotérmica por mais de 20

⁸ Mais detalhes sobre a usina Solnova 1 disponível em:
<http://www.abengoasolar.com/web/en/nuestras_plantas/plantas_en_operacion/espana/Solnova_1_3_y_4_plantas_cilindroparabolicas_de_50_megavatios_cada_una>

anos. Plantas em operação na Califórnia, por exemplo, são capazes de produzir eletricidade a baixo custo (US\$0.10/kWh), através de um sistema robusto e de alta durabilidade.

4.1.1.6 Disco parabólico

O disco parabólico, também conhecido por refletor de pratos parabólicos (*PDR – parabolic dish reflector*), é o coletor existente mais eficiente, capaz de atingir temperaturas de mais de 1500°C. O receptor, que contém o fluido de trabalho, é posicionado no ponto focal do disco parabólico. Esse tipo de coletor é modular, portanto pode ser utilizado de forma independente ou como parte de um sistema composto por vários discos parabólicos (KALOGIROU, 2009).

O sistema de rastreamento em dois eixos e a alta capacidade de absorção e conversão tornam os discos parabólicos altamente eficientes, possibilitando a absorção dos raios solares do nascer ao pôr do sol (DE LAQUIL⁹, 1993 apud KALOGIROU, 2009, p.147).

A Figura 18 mostra um diagrama esquemático das partes componentes de um disco parabólico.

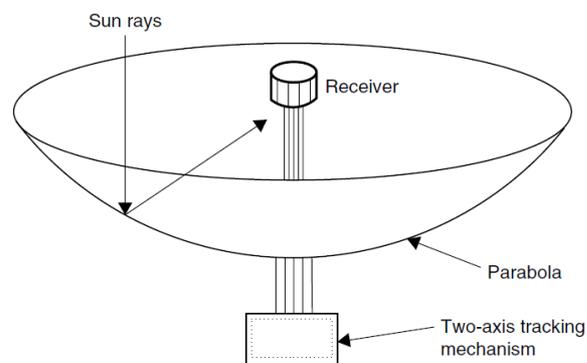


Figura 18 – Diagrama esquemático de um coletor de disco parabólico.
Fonte: KALOGIROU, 2009.

Concentradores de disco parabólico são geralmente utilizados em sistemas com um gerador acoplado ao receptor para conversão direta em eletricidade (*dish engine system*). Kalogirou (2009) explica que a utilização desse tipo de tecnologia em centrais solares pode não ser conveniente devido a necessidade de transporte da energia térmica de vários receptores

⁹ DE LAQUIL, P. et al. Solar-Thermal Electric Technology. 1993. In: Johanson, T. B. et al. Renewable Energy: Sources for fuels and electricity. Earthscan, Island Press, Washington DC, 213-296.

por tubulações até centrais, onde a energia térmica do fluido é convertida em vapor e energia elétrica.

A Figura 19 apresenta algumas configurações para concentradores de discos parabólicos.



Figura 19 – Fotos de concentradores de discos parabólicos.

Fonte: mtholyoke.edu; mcensustainableenergy.pbworks.com; solar-thermal.com.

4.1.1.7 Torre central

O sistema de geração de energia por torre central (*HFC – heliostat field collector*) é basicamente composto por um campo de heliostatos, por uma torre receptora, trocadores de calor e tanques térmicos para armazenamento (KALOGIROU, 2009).

O campo de heliostatos é formado por milhares de espelhos equipados com rastreadores solar individuais. Os rastreadores operam em dois eixos e concentram os raios solares em um ponto focal: no receptor posicionado na parte superior de uma torre central (KALOGIROU, 2009).

Ao invés de água, o fluido de trabalho utilizado em torres centrais é sal fundido. O calor absorvido pode ser armazenado em tanques térmicos ou utilizado para geração de vapor em trocadores de calor (KALOGIROU, 2009).

De Laquil et al¹⁰. (1993 apud KALOGIROU, 2009, p.149) aponta que uma das vantagens do sistema de torre central é a utilização de um único receptor, o que diminui a necessidade de transporte da energia térmica e portanto a possibilidade de perdas energéticas por transporte. Outra vantagem é a utilização de rastreamento em dois eixos, que aumenta a taxa de concentração de 300 a 1500 vezes. Além disso, a utilização de sais fundidos possibilita

¹⁰ DE LAQUIL, P. et al. Solar-Thermal Electric Technology. 1993. In: Johanson, T. B. et al. Renewable Energy: Sources for fuels and electricity. Earthscan, Island Press, Washington DC, 213-296.

o armazenamento de energia térmica, o que torna possível a geração de vapor e energia elétrica em dias nublados e à noite.

A Figura 20 apresenta o princípio de funcionamento de um sistema de geração elétrica sem armazenamento por torre central.

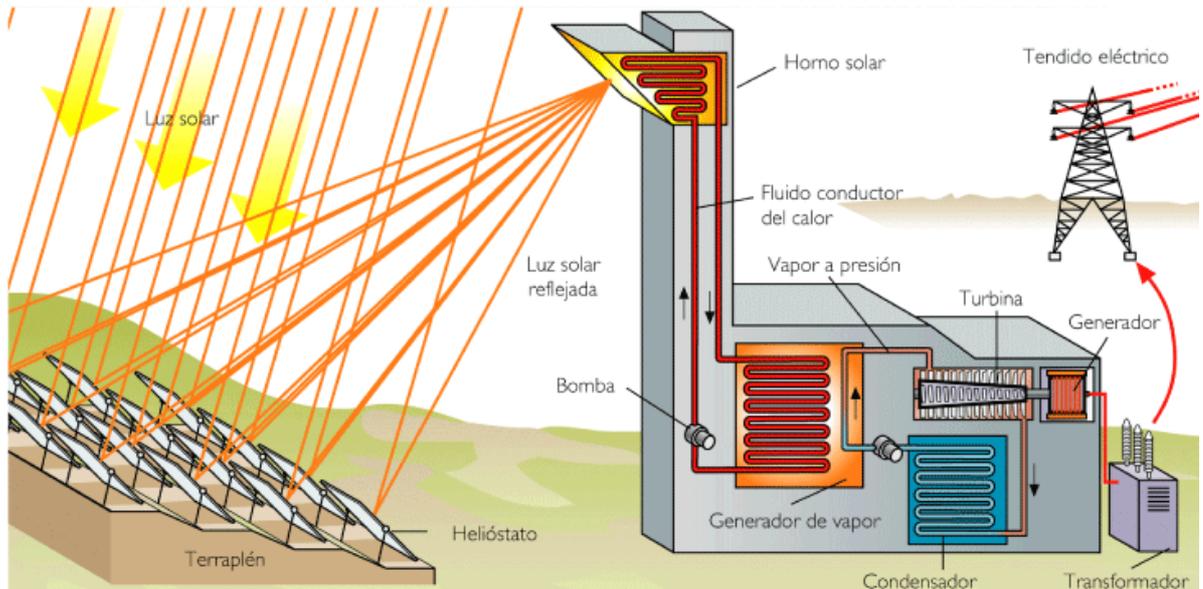


Figura 20 – Princípio de funcionamento de geração de energia por torre central.

Fonte: recursostic.educacion.es.

A Figura 21 é uma foto aérea de duas plantas solares localizadas na Espanha: PS 10¹¹ (à direita) e PS 20¹² (à esquerda), com capacidade de 11MW e 20MW de potência respectivamente.

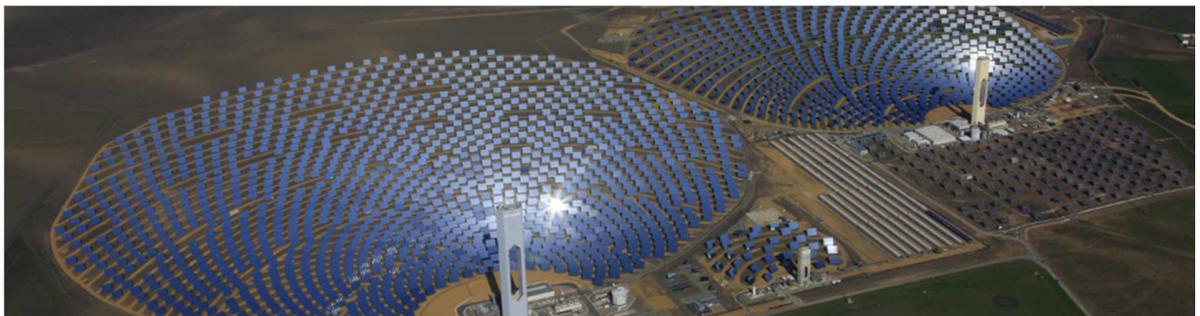


Figura 21 – Fotografia da usina solar PS10 e PS20 com geração de energia por torre central.

Fonte: ABENGOA SOLAR.

¹¹ Mais detalhes sobre a planta solar PS 10 disponível em:

<http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38>

¹² Mais detalhes sobre a planta solar PS 20 disponível em:

<http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=39>

A necessidade de uma ampla área limita a instalação de torres centrais em áreas urbanas. No entanto, outras configurações têm sido desenvolvidas a fim de adaptar a tecnologia a telhados de construções (MTSA - *Multi-Tower Solar Array*), possibilitando sua utilização em menor escala e em áreas urbanas (KALOGIROU, 2009; MILLS, 2004). Mills (2004) cita que os receptores poderiam ser compostos por absorvedores térmicos e fotovoltaicos, e explica de que forma essa configuração poderia aumentar a eficiência da tecnologia. A Figura 22 apresenta a visualização de uma nova configuração de torres centrais MTSA.

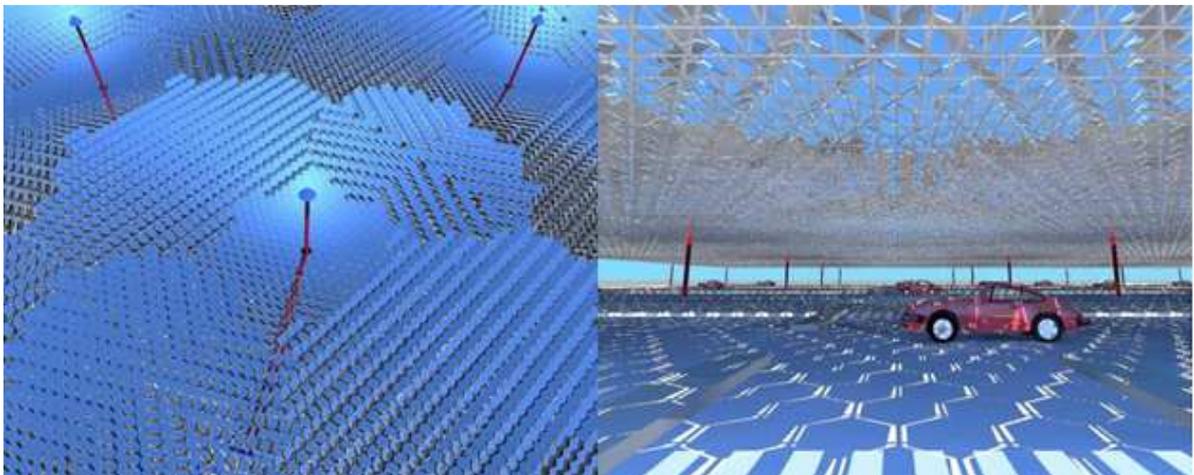


Figura 22 – Visualização de uma configuração MTSA.
Fonte: UNIVERSITY OF SYDNEY.

4.1.2 Painéis fotovoltaica

As células fotovoltaicas, também conhecidas por células solares, são elementos básicos de sistemas fotovoltaicos. Essas células são arranjadas em paralelo, para aumentar a geração de corrente elétrica, ou em série, para aumentar a potência elétrica, constituindo um módulo fotovoltaico, como mostra a Figura 23. Um conjunto destes, por sua vez, compõe o painel fotovoltaico (KALOGIROU, 2009).

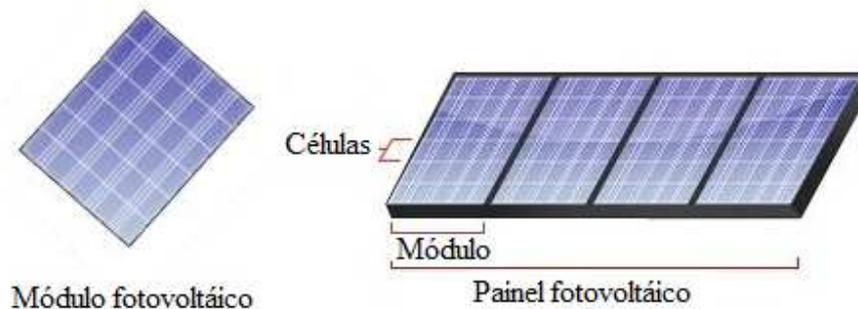


Figura 23 – Composição de painéis fotovoltaicos.
 Fonte: electronica-pt.com (adaptado).

O princípio de funcionamento básico de uma célula fotovoltaica de silício, o material mais utilizado para produção de células fotovoltaicas, pode ser descrito da seguinte forma: A energia fotovoltaica é gerada pela diferença de potencial (ddp) na célula fotovoltaica, causada pela radiação solar. O silício, que possui 4 elétrons na camada de valência, passa por um processo de dopagem. No processo de dopagem adicionam-se à rede cristalina do semicondutor compostos trivalentes (Boro, por exemplo), com o objetivo de aumentar o número de lacunas no material, formando semicondutores do tipo-P; ou compostos pentavalentes (Fósforo, por exemplo), com o objetivo de aumentar o número de elétrons livres, formando semicondutores do tipo-N. Quando os semicondutores do tipo-P e tipo-N são sobrepostos, há a formação de um campo elétrico interno na área de junção P-N, bloqueando a transferência do excesso de elétrons do semicondutor tipo-N para as lacunas presentes no semicondutor do tipo-P. O efeito fotoelétrico ocorre quando a radiação solar atinge a célula fotovoltaica, criando pares de buracos e elétrons e resultam na circulação de corrente contínua por meio de um condutor externo que liga os terminais tipo-P e tipo-N (TIWARI & MISHRA, 2012).

A temperatura da célula e incidência de raios solares são os fatores que mais afetam a eficiência das células fotovoltaicas. A Figura 24 mostra o comportamento de um célula fotovoltaica em diferentes condições de intensidade de radiação solar e de temperatura. Nota-se que o aumento da incidência de raios solares resulta em um aumento tanto de corrente quanto de potência elétrica (Figura 24.a). No entanto, o aumento de temperatura leva a um pequeno aumento de corrente elétrica e a uma queda significativa de potência, o que resulta em uma eficiência reduzida (Figura 24.b).

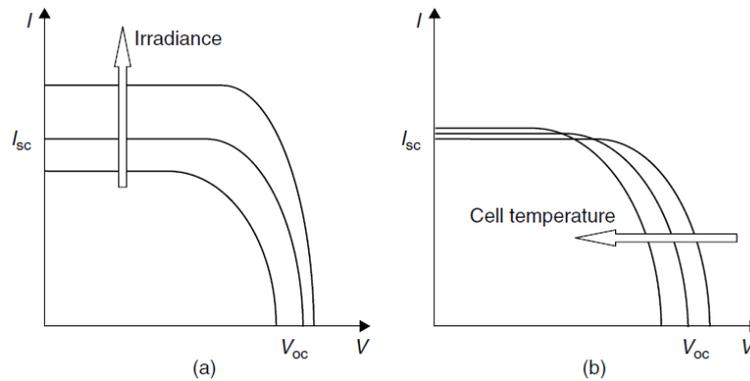


Figura 24 – Influência da radiação e da temperatura em células fotovoltaicas.
 (a) Influência do aumento de radiação. (b) Influência do aumento de temperatura na célula.
 Fonte: Kalogirou, 2009.

As células fotovoltaicas são geralmente classificadas em primeira, segunda e terceira geração (TIWARI; MISHRA, 2012).

4.1.2.1 Primeira geração

A primeira geração consiste em células produzidas a partir de silício mono-cristalino e poli-cristalino (Figura 25), relativamente grande em área, com junção singular, alta qualidade e eficiência e elevados custos de produção devido à elevada pureza requerida. Apesar do custo elevado, esse tipo de célula ainda é a tecnologia mais utilizada para produção de painéis fotovoltaicos comerciais (TIWARI; MISHRA, 2012).

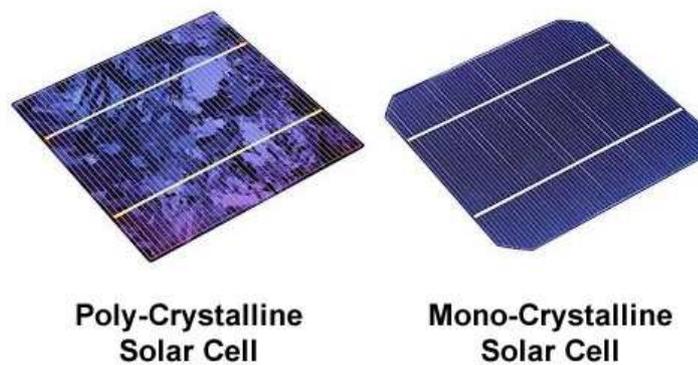


Figura 25 – Células fotovoltaicas de silício policristalino e monocristalino.
 Fonte: SILICONSOLAR.

4.1.2.2 Segunda geração

As células fotovoltaicas de segunda geração têm sido desenvolvidas com o objetivo de reduzir custos de produção através do aprimoramento de processos. Essas células são baseadas na deposição de filmes finos de materiais semicondutores, como o telureto de cádmio (CdTe), silício amorfo (Figura 26) e microcristalino, disseleneto de cobre índio gálio (CIGS) e dióxido de titânio (TiO₂) em substratos como o plástico, vidros e metais (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011; TIWARI; MISHRA, 2012). A eficiência na conversão de energia nessas células é geralmente menor quando comparada às tecnologias de primeira geração; no entanto, o custo de fabricação é reduzido, tanto pela utilização de menos material quanto pela deposição em substratos de baixo custo, tornando-as economicamente atraentes (KALOGIROU, 2009).

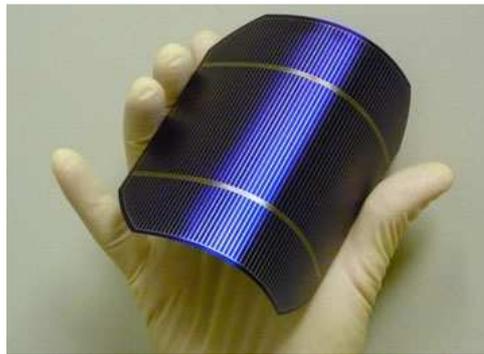
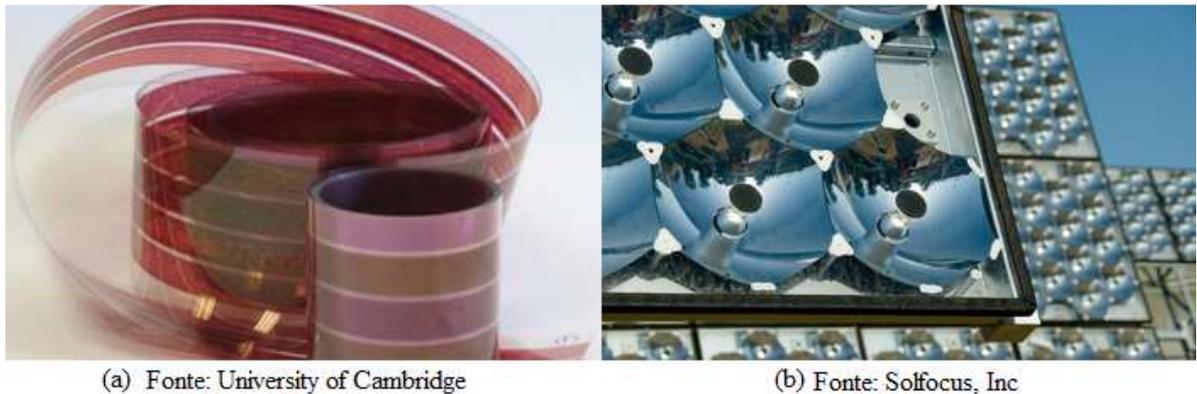


Figura 26 – Célula de silício amorfo.
Fonte: EENERGYS.

4.1.2.3 Terceira geração

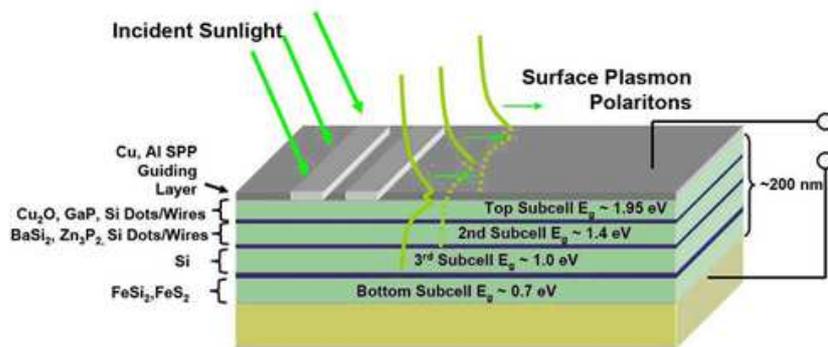
A terceira geração de células fotovoltaicas (Figura 27) é composta pelo desenvolvimento de: células fotovoltaicas de multijunção, células orgânicas e poliméricas e células com concentração de raios incidentes (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011; TIWARI; MISHRA, 2012).

Green et al. (2012) listaram a eficiência e características definidas em condições de referência das melhores células fotovoltaicas desenvolvidas. A Tabela 5 apresenta dados da eficiência de algumas células fotovoltaicas.



(a) Fonte: University of Cambridge

(b) Fonte: Solfocus, Inc



(c) Fonte: Stanford University

Figura 27 – Terceira geração de tecnologias fotovoltaicas. (a) Célula orgânica. (b) Placa composta por células com concentração de raios incidentes. (c) Esquema de uma célula de multijunção de alta eficiência.

Tabela 5 – Eficiência e características de células fotovoltaicas definidas em condições de referência (ASTM G-173-03), espectro AM 1.5, 25°C.

	Classificação	Eficiência (%)
Primeira geração	Silício monocristalino	25.0 ± 0.5
	Silício policristalino	20.4 ± 0.5
Segunda geração	Silício micro-cristalino	10.1 ± 0.2
	Silício amorfo	10.1 ± 0.3
	Filme fino - GaAs	28.3 ± 0.8
	Filme fino - CIGS	19.6 ± 0.6
	Filme fino - CdTe	16.7 ± 0.5
Terceira geração	Filme fino - Orgânico	10 ± 0.3
	Multijunção (GaInP/GaInAs/Ge)	34.1 ± 1.2
	Filme fino de multijunção (a-Si/m-Si)	12.3 ± 0.3
	Concentrador com célula de GaAs	29.1 ± 1.3
	Concentrador com célula de Silício	27.6 ± 1.0
	Concentrador com célula de multijunção	41.6 ~ 43.5 ± 2.6

Fonte: GREEN et al., 2012.

4.1.3 *Sistemas integrados termo-fotovoltaicos*

Em sistemas termo-fotovoltaicos, coletores de calor são acoplados a painéis solares de forma que a energia absorvida pelas células fotovoltaicas convertida em calor é aproveitada através do aquecimento de ar ou água. Nesses sistemas, a conversão da radiação solar em energia térmica e energia elétrica é maior do que a soma da energia gerada em coletores e painéis fotovoltaicos (FOURTIN et al., 2014).

Sistemas termo-fotovoltaicos são híbridos, pois a energia necessária para bombeamento de fluido de resfriamento dos painéis solares é obtida a partir das próprias células fotovoltaicas.

Estudos avançados apontam eficiência de até 86% em sistemas termo-fotovoltaicos em horário de pico, tornando essa tecnologia bastante promissora (KROH, 2013).

4.2 **Utilização das tecnologias solares no setor industrial**

Iniciativas da Agência Internacional de Energia, como o SHC task 49, SHC task 33 e SolarPACES task IV¹³, visam o estudo e o desenvolvimento procedimentos e políticas públicas de incentivo à utilização de sistemas de energia solar para atender a demanda de energia térmica e elétrica nas indústrias (VANONNI; BATTISTI; DRIGO, 2008).

Existem inúmeras formas de aproveitar a energia solar em processos industriais. A energia térmica proveniente de tecnologias solares pode ser utilizada para o aquecimento de água, aquecimento de ar, geração de vapor e em processos de refrigeração (KALOGIROU, 2009)

A Figura 28 apresenta algumas tecnologias solares para aproveitamento de energia térmica de baixa e média temperaturas na indústria (IEA, 2012).

¹³ Mais informações sobre projetos desenvolvidos pela Agência Internacional de Energia disponível em: <<http://www.iea-shc.org/tasks-current>>

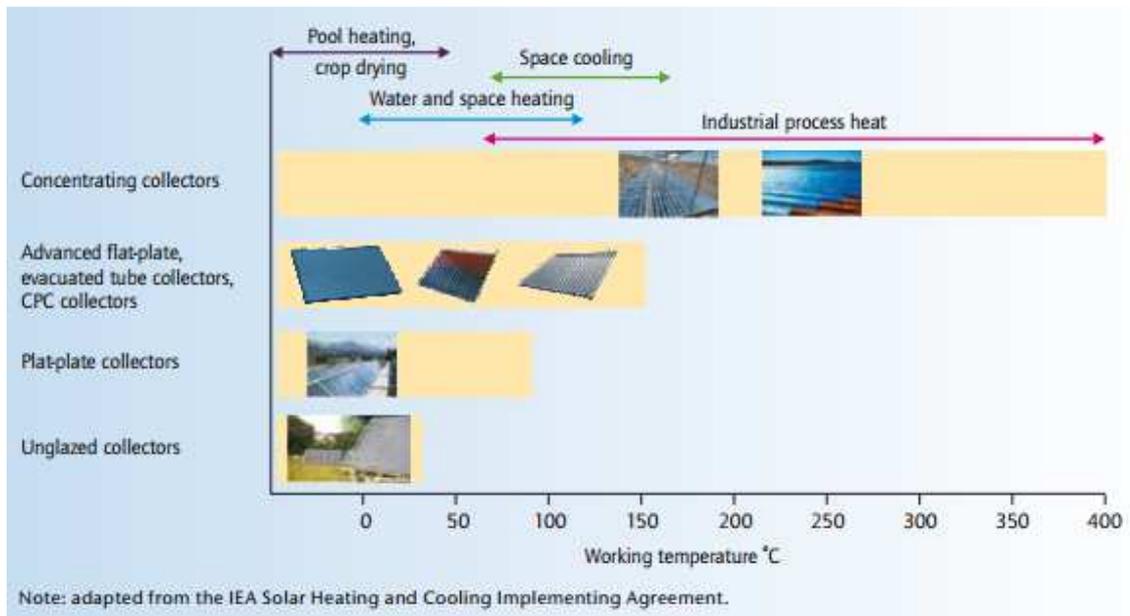


Figura 28 – Tecnologias para aproveitamento de energia térmica.
Fonte: IEA, 2012.

A energia elétrica gerada a partir de tecnologias fotovoltaicas e heliotérmicas podem ser utilizadas para refrigeração, motores, compressores, iluminação e ar condicionado (KALOGIROU, 2009).

4.2.1 Demanda de energia térmica

Quase todos os processos industriais demandam energia térmica em alguma parte do processo (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011).

A utilização de sistemas solares de aquecimento é eficaz para processos térmicos de baixas e médias temperaturas (BRUNNER et al., 2008; IEA, 2011; KALOGIROU, 2009).

Tratando-se de calor de processo, estudos da Agência Internacional de Energia (IEA, 2011) mostram que cerca de 30% dos processos industriais ocorrem a baixas temperaturas (até 100 °C), 43% a altas temperaturas (acima de 400 °C) e 27% a temperaturas médias (100 – 400 °C). Além disso, dois terços dos processos industriais de temperaturas médias ocorrem abaixo de 200°C, o que corresponde a 57% (30+27) dos processos industriais, os quais são passíveis de aplicações de tecnologias de conversão de energia solar.

A Figura 29 apresenta a demanda de energia térmica na Europa por setores industriais e por temperaturas de processo. Nota-se que a necessidade por energia térmica de baixa e média temperatura é bastante significativa em indústrias de alimentos e de papel e celulose, além das indústrias têxteis e de plásticos não apresentadas na figura (FREIN; CALDERONI; MOTTA, 2014; BRUNNER et al., 2008). Além disso, todas as outras indústrias apresentadas na Figura 29 também utilizam energia térmica de baixa e média temperatura, mesmo que em menor proporção, e que portanto poderiam utilizar tecnologias solares.

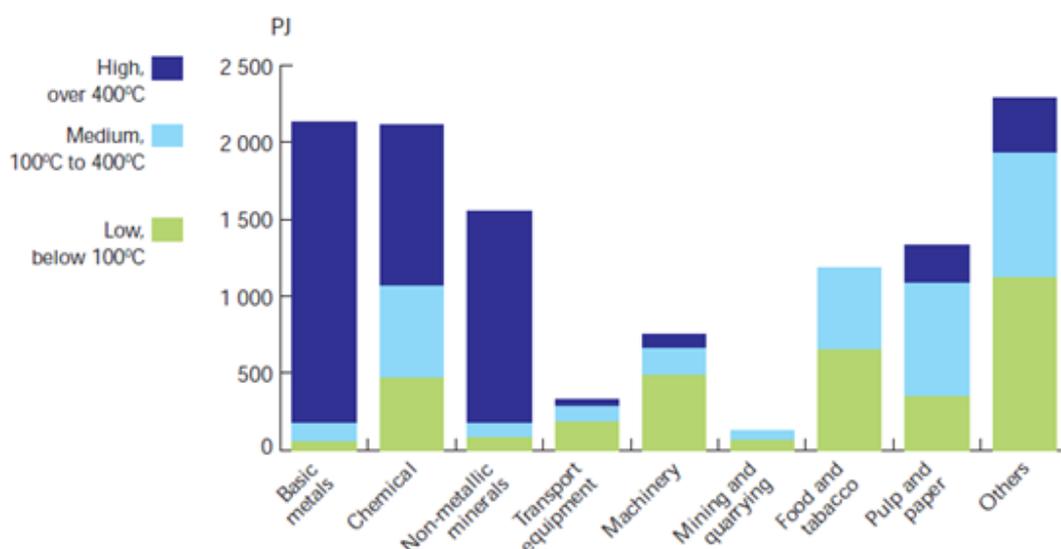


Figura 29 – Demanda industrial de energia térmica na Europa (2003).
Fonte: IAE, 2011.

4.2.1.1 *Indústria de alimentos e bebidas*

Na indústria de alimentos, particularmente em indústrias de laticínios, embutidos e cervejarias, os processos industriais são geralmente longos e grandes consumidores de energia térmica de baixa e média temperatura – características que favorecem a aplicação de energia solar (KALOGIROU, 2009).

Uma lista de processos industriais com elevado potencial de aplicação de energia térmica solar em indústrias de alimentos e bebidas é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria de alimentos e bebidas (°C).

	Carnes	Laticínios	Enlatados	Grãos e subprodutos	Bebidas
Pressurização	-	60-80	-	-	-
Esterilização	60-90	100-120	110-120	60-80	60-80
Secagem	-	120-180	-	-	-
Concentração	-	60-80	-	-	-
Cozimento	90-100	-	60-90	-	-
Lavagem	60-90	-	-	-	60-80
Branqueamento	-	-	60-90	-	-
Pasteurização	-	-	60-80	-	60-70
Alimentação de água da caldeira	-	60-90	-	-	-

Fonte: KALOGIROU, 2009.

4.2.1.2 *Indústria de Papel e Celulose*

A Tabela 7 apresenta a demanda de energia térmica em alguns processos da indústria de papel e celulose com elevado potencial de aplicação de tecnologias solares.

Tabela 7 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria de papel e celulose (°C).

	Papel e celulose
Cozimento	60-80
Secagem	60-80
Branqueamento	130-150
Alimentação de água da caldeira	60-90

Fonte: KALOGIROU, 2009.

4.2.1.3 *Indústria Química*

Na indústria química, aproximadamente metade dos processos utilizam temperaturas baixas ou médias (até 400 C°). Kalogirou (2009) aponta alguns processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria química. Estes encontram-se listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria química (°C).

	Química
Saponificação	200-260
Borracha sintética	150-200
Calor de processo	120-180
Pré-aquecimento de água	60-90

Fonte: KALOGIROU, 2009.

4.2.1.4 *Indústria Têxtil*

Em indústrias têxteis, processos de tingimento consomem grandes quantidades de água e energia térmica de baixa temperatura (FREIN; CALDERONI; MOTTA, 2014).

Alguns processos da indústria têxtil com elevado potencial de aplicação de energia solar são listados na tabela 9.

Tabela 9 – Temperaturas de processos térmicos de baixa e média temperaturas na indústria têxtil (°C).

	Têxtil
Branqueamento	60-90
Tingimento	70-90
Secagem e desengorduramento	100-130
Pressionamento	80-100
Fixação	160-180

Fonte: KALOGIROU, 2009.

O maior sistema de aquecimento solar industrial instalado no mundo possui 13000m² de coletores de energia solar e está situado em uma indústria têxtil em Hangzhou, na China (WEISS, 2014).

4.2.2 Integração de coletores de energia solar em processos industriais

4.2.2.1 Aspectos gerais

A integração de coletores de energia solar em processos industriais pode ser realizada de várias formas, pois a configuração do sistema de energia solar depende da necessidade específica de cada processo e da disponibilidade de recursos (FREIN; CALDERONI; MOTTA, 2014; BRUNNER et al., 2008).

Para escolher um sistema de geração de energia térmica adequado, deve-se levar em consideração dois aspectos fundamentais: a análise do tipo de energia necessária e a avaliação da temperatura de aplicação requerida no processo industrial (KALOGIROU, 2009).

Para exemplificar a análise do tipo de energia necessária, Kalogirou (2009) apresenta os seguintes exemplos: se a necessidade do processo é água aquecida para limpeza, utiliza-se tecnologias solares com água como fluido de trabalho; se a necessidade de um processo é ar quente, como em processos de secagem, um sistema de aquecimento de ar seria o mais indicado; se há a necessidade de geração de vapor para um esterilizador, o sistema de geração de energia solar deve ser configurado de forma que haja produção de vapor, provavelmente através de coletores concentradores.

A avaliação da temperatura de aplicação requerida no processo industrial é importante, pois a energia necessária pelo processo pode ser maior ou menor do que a energia gerada a partir das tecnologias solares. Como a energia solar, além de intermitente, é instável, podendo ser maior em dias ensolarados e menor em dias nublados, faz-se necessário a integração das tecnologias solares com um sistema armazenamento de energia ou com um sistema de geração de energia auxiliar (KALOGIROU, 2009).

A Figura 30 apresenta três possibilidades para integração de coletores de energia solar em um processo industrial em que já existe um sistema de geração de energia: o coletor pode ser utilizado para o pré-aquecimento de água de processo; para geração de vapor de processo; e também em um processo específico que demanda temperaturas menores do que a temperatura da central de alimentação de vapor (KALOGIROU, 2009).

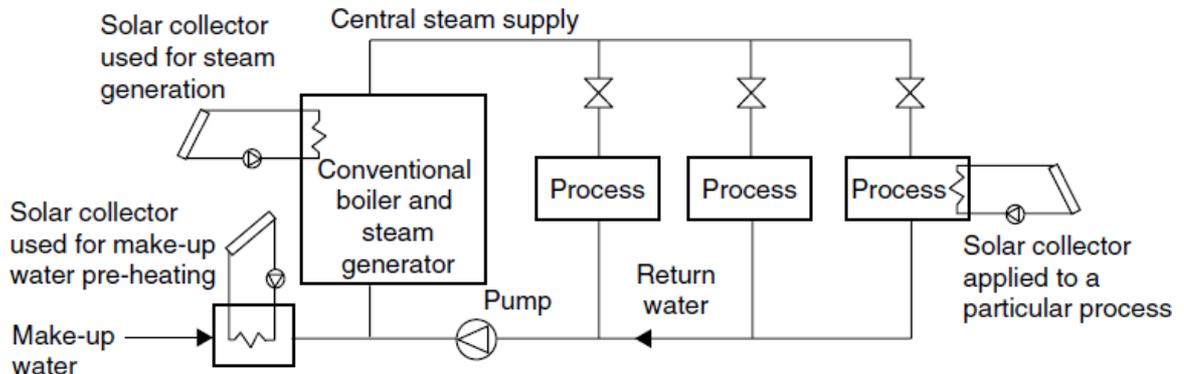


Figura 30 – Sistema de coletores de energia solar integrados a um sistema de geração de energia já existente.
Fonte: KALOGIROU, 2009.

Kalogirou et al. (1997 apud KALOGIROU, 2009, p.397) apresentam três configurações diferentes para sistemas de geração de vapor: água em alta pressão é aquecida nos coletores e posteriormente gera vapor quando expandida em um vaso separador flash (Figura 31); água é aquecida nos coletores, gerando uma mistura de vapor e água dentro do coletor (Figura 32); um fluido de trabalho (como óleo ou sais fundidos) é aquecido nos coletores e posteriormente passa por um trocador de calor, gerando vapor (Figura 33).

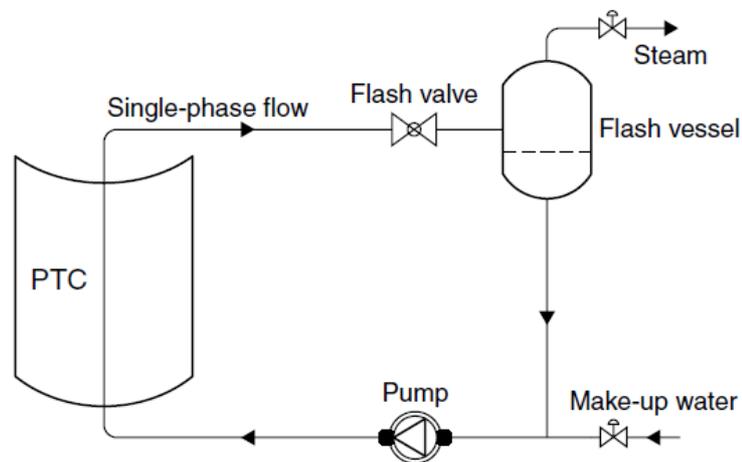


Figura 31 – Geração de vapor em um vaso separador flash.
Fonte: KALOGIROU, 2009.

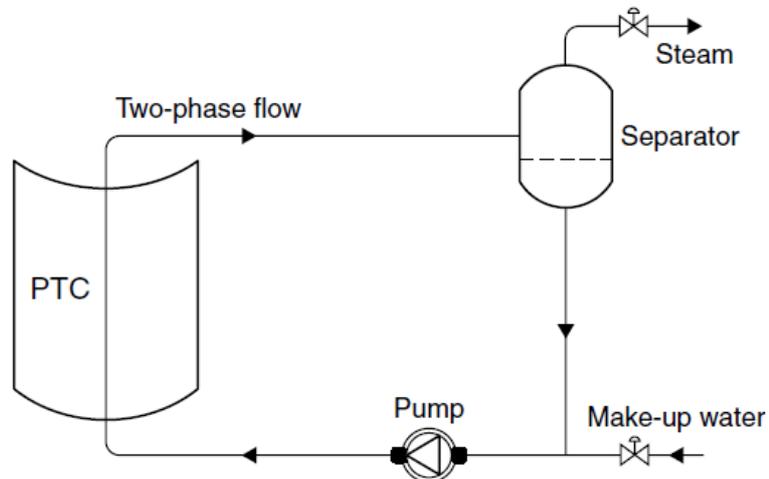


Figura 32 – Geração de vapor no coletor de calhas parabólica.
Fonte: KALOGIROU, 2009.

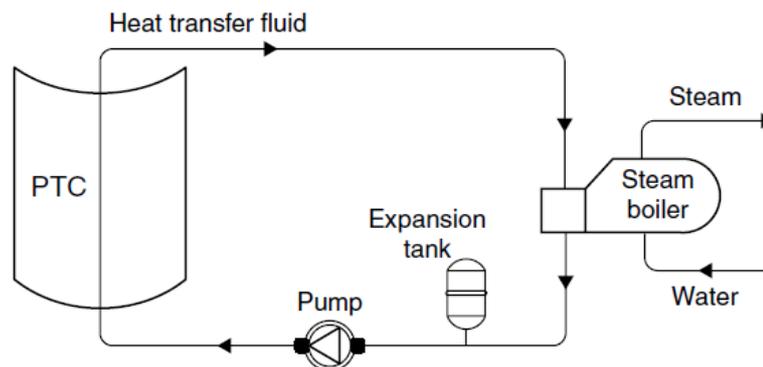


Figura 33 – Geração de vapor em um trocador de calor.
Fonte: KALOGIROU, 2009.

A instalação dos coletores de energia solar pode ser realizada no telhado da planta industrial ou em construções adjacentes. No entanto, Kalogirou (2009) ressalta que quanto maior a distância entre a instalação dos coletores e o local em que a energia será utilizada, maiores são as possibilidades de perdas por tubulação.

4.2.3 Demanda de energia elétrica

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2013), aproximadamente 20% da energia consumida em indústrias é energia elétrica, geralmente utilizada para acionamento de motores, compressores, refrigeradores, ar condicionado, iluminação, entre outros.

A energia heliotérmica e fotovoltaica pode ser utilizada para atender a demanda por energia elétrica, tanto na planta industrial quanto em escritórios e laboratórios de pesquisa e desenvolvimento adjacentes à planta (KALOGIROU, 2009).

O Centro de Inovações da Johnson & Johnson, situado em San Diego (Califórnia), por exemplo, possui um sistema de geração fotovoltaica com capacidade instalada de 243kW (Figura 34). A emissão de CO₂ foi reduzida em 248 toneladas por ano. Além disso, a empresa economiza aproximadamente 50 mil dólares anualmente através do sistema de geração fotovoltaica (SPG Solar).



Figura 34 – Painéis fotovoltaicos instalados no telhado do Centro de Inovação da J&J's em San Diego.
Fonte: SPG Solar.

4.3 Impactos ambientais

As vantagens ambientais da utilização da energia solar como fonte de geração de energia térmica e elétrica são evidenciadas com os custos ambientais provenientes da extração, geração, transmissão, distribuição e consumo de recursos não-renováveis (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

De acordo com a Secretaria de Energia de São Paulo (2013), 1m² de coletor solar de aquecimento de água em funcionamento por um ano equivale a 56m² de áreas inundadas por hidrelétricas, 215 quilos de lenha, 66 litros de diesel ou 55 quilos de gás. Ou seja, como resultado da utilização de energia solar para geração de energia térmica em processos industriais, pode-se haver significativa redução da dependência de combustíveis fósseis, além

da redução na emissão de gases do efeito estufa, como o CO₂, SO₂ e NO_x (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011).

A quantidade de CO₂ emitida por diferentes fontes de energia é apresentada na Tabela 10. Nota-se que as emissões de gases provenientes de tecnologias solares são desprezíveis.

Tabela 10 – Peso de CO₂ emitido por milhão de BTUs (lb)

Fonte de energia	Peso de CO ₂ (lb)
Carvão	214
Gasolina	157
Propano	139
Gás natural	117
Energia solar	0

Fonte: SEIA, 2013a.

Apesar de todos os benefícios da energia solar, existem alguns problemas associados a utilização de tecnologias solares que, quando possível, devem ser evitados.

Dependendo do tamanho e da localização das instalações de geração de energia, pode-se haver a necessidade preparar a área a ser utilizada, gerando desmatamento e alterando a capacidade de drenagem de água. Além disso, a localização dos coletores de energia solar pode afetar o habitat de animais nativos, principalmente de pássaros, pois estes podem ser atingidos pela concentração de raios solares (PATTON et al., 2013).

Em sistemas de coletores de energia solar, alguns impactos ambientais relacionados à qualidade do ar podem estar associados às emissões causadas por atividades de inspeção e manutenção dos coletores, ou então à utilização de outros recursos de energia em sistemas de geração auxiliar (PATTON et al., 2013).

O descarte inadequado de baterias, painéis fotovoltaicos e coletores de energia solar podem ser fonte riscos ao meio ambiente devido a possível contaminação do solo e da água.

Outro aspecto relevante é a necessidade de combustíveis fósseis para produção de coletores e painéis fotovoltaicos e a eficiência do processo de fabricação dos sistemas solares, para que a utilização de matérias-primas e a geração de resíduos sejam mínimas e com o menor impacto ambiental possível (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

4.4 Custo

Os custos (por kWh) associados aos sistemas com coletores solares variam muito de acordo com o tamanho do sistema e com a tecnologia utilizada (KALOGIROU, 2009). Esses custos incluem o coletor em si, sistemas de rastreamento solar e de automação (necessários para algumas tecnologias), tubulações, tanque térmico (opcional), turbina e gerador para os casos de geração de energia heliotérmica e custos instalação e de manutenção do sistema (limpeza das superfícies espelhadas, do sistema de rastreamento, entre outros).

O custo de sistemas fotovoltaicos está associado aos painéis fotovoltaicos, mecanismos de rastreamento (opcional), controladores de carga, inversores, baterias e fios (ABINEE, 2012).

O módulo fotovoltaico é responsável por aproximadamente 40% do custo total de um sistema fotovoltaico (ABINEE, 2012). No entanto, novas tecnologias de elevado potencial têm sido desenvolvidas para a redução de custos e aumento de eficiência (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011, TIWARI; MISHRA, 2012). Além disso, o aumento da competitividade tem levado a uma queda estável do custo de sistemas fotovoltaicos, como mostra a Figura 35 (SEIA, 2013b). Nota-se que de 2001 à 2013 o custo de sistemas fotovoltaicos caiu de 10 dólares a aproximadamente 4 dólares por watt produzido.

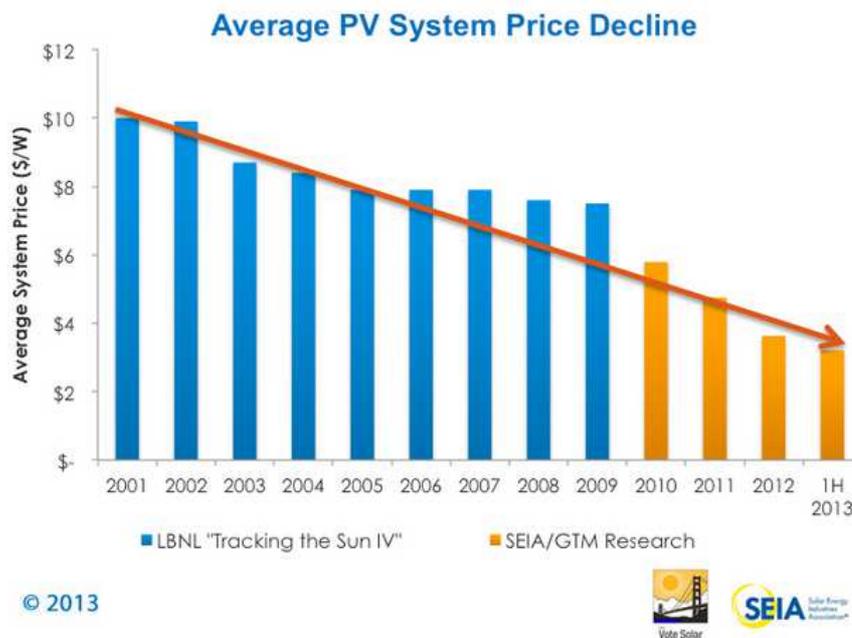


Figura 35 – Evolução do preço de sistemas fotovoltaicos completos de 2001 à 2013.
Fonte: SEIA, 2013b.

Kalogirou (2009) afirma que a aplicação de energia solar para geração de calor e de energia elétrica em indústrias pode ser economicamente viável, mesmo com um elevado investimento em coletores, devido ao efeito de escala.

4.5 Benefícios e limitações

4.5.1 Benefícios

Kalogirou (2009) afirma que a utilização de tecnologias de aproveitamento de energia solar é vantajosa quando comparada a outras fontes de energia por eliminar a emissão de gases estufa e outros gases contribuintes para a poluição do ar atmosférico; não produzir ruídos; e reduzir a necessidade de utilização de outros tipos de energia provenientes de fontes não renováveis.

Em sistemas descentralizados de geração de energia elétrica, possíveis perdas de energia são reduzidas, custos provenientes de transmissão e distribuição de energia elétrica também são menores e há um aumento da confiabilidade do suprimento de eletricidade (SECRETARIA DE ENERGIA, 2013, p.10).

A utilização de energia solar e de outras fontes renováveis aumenta a credibilidade de produtos e da indústria em geral, além de contribuir com o meio ambiente e com a comunidade em que a indústria está inserida (LARSON, 2011).

4.5.2 Limitações

A necessidade de água para limpeza de espelhos e resfriamento de trocadores de calor pode ser um fator limitante para a implementação de tecnologias solares em determinadas regiões (KALOGIROU, 2009).

A área disponível para instalação de coletores de energia solar em indústrias pode ser o fator limitante para a geração de energia suficiente para atender toda demanda térmica e elétrica industrial (MÜLLER; BRANDMAYR; ZÖRNER, 2014).

Outro aspecto limitante é o fato de a energia solar ser uma fonte intermitente de energia, cujo armazenamento depende do uso de baterias e tanques térmicos. Em sistemas

integrados à rede, um sistema de compensação de energia reduziria a necessidade de armazenamento (EPE, 2012).

Como a geração de energia térmica e elétrica por tecnologias solares depende do índice de radiação, da temperatura no local, da presença de nuvens, entre outros, torna-se inviável a substituição total de outras formas de geração de energia. Em muitos casos, é necessário um sistema de geração de energia complementar, como por exemplo gás natural, biocombustíveis e biomassa para geração de energia térmica ou hidroelétricas e termelétricas para a geração de energia elétrica (KALOGIROU, 2009).

A maior limitação do uso de tecnologias fotovoltaicas é o alto custo de manufatura. No Brasil, a grande maioria dos módulos fotovoltaicos existentes é fabricada fora do país, fazendo com que sua implementação seja, até o momento, menos viável economicamente, quando comparado a países que já possuem a tecnologia (KROH, 2013).

Ressalta-se também a necessidade de desenvolvimento de toda a cadeia industrial, da extração e processamento da matéria-prima à purificação, produção de silício de grau solar, células fotovoltaicas e montagem do módulo (ABINEE, 2012).

4.6 Considerações finais

Apesar da intermitência da energia solar, o horário de maior demanda energética pelos setores comerciais e industriais é justamente o horário diurno, o que torna a utilização de tecnologias solares para a produção de energia elétrica e térmica uma alternativa para aliviar a sobrecarga nas redes elétricas. Além disso, a inserção da energia solar na matriz energética brasileira reduziria a dependência da energia elétrica proveniente de hidroelétricas e termelétricas, principalmente em períodos de seca.

O Brasil, apesar de não fabricar painéis solares de forma significativa, é o segundo maior exportador de silício grau metalúrgico e possui grandes reservas de quartzo de qualidade, matérias-primas mais utilizadas para fabricação de painéis solares (KROH, 2013). Torna-se possível desenvolver uma vantagem competitiva em relação a outros países produtores e obter a viabilização econômica da tecnologia, desde que haja incentivos para inserção da geração fotovoltaica no Brasil (ABINEE, 2012).

A Figura 36 mostra a projeção de crescimento de energia solar para aquecimento e resfriamento até 2050 realizado pela Agência Internacional de Energia. Nota-se que as perspectivas para aplicação de energia solar na indústria é bastante positiva.

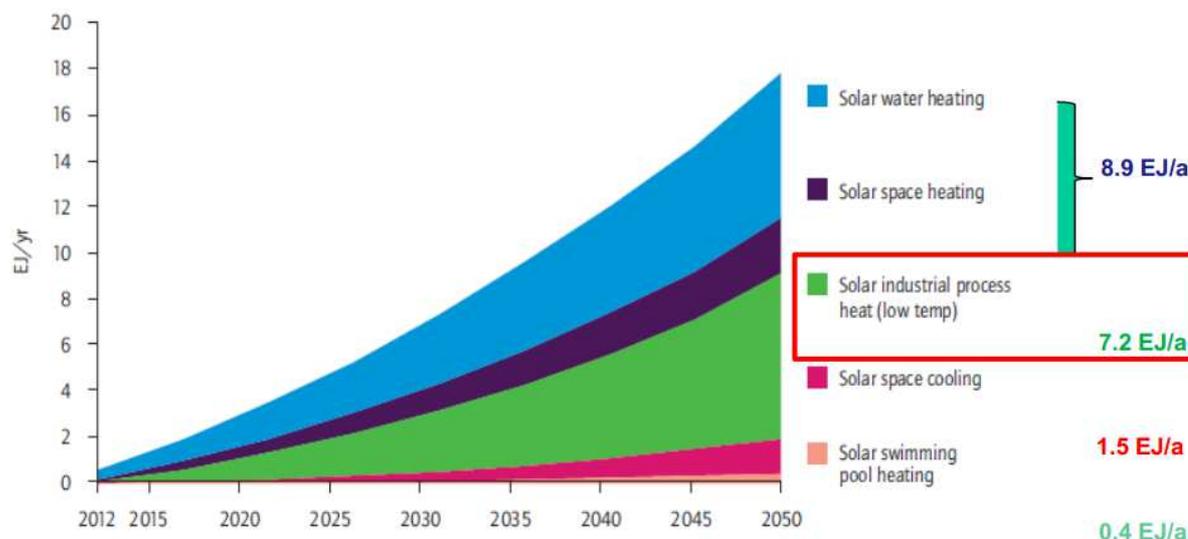


Figura 36 – Gráfico da estimativa de geração de energia térmica a partir de tecnologias solares até 2050.
Fonte: IEA, 2012.

Kalogirou (2009) acredita que será tecnicamente possível desenvolver um sistema de energia totalmente proveniente de fontes renováveis em alguns anos, pois os rápidos avanços tecnológicos tornarão esse sistema economicamente competitivo com o sistema tradicional de geração de energia. No entanto, para alcançar um alto nível de penetração de energias renováveis como a solar, algumas condições atuais do Mercado precisam ser alteradas: o estímulo a inovação tecnológica através de programas de incentivo, redução da carga tributária, investimento em pesquisa e desenvolvimento e, principalmente, o desenvolvimento de políticas ambientais mais exigentes que promova o desenvolvimento sustentável (KALOGIROU, 2009, p.5)

5 ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO: FRITO-LAY

A Frito-Lay é uma unidade de negócio da PepsiCo, uma das maiores indústrias de alimentos e bebidas do mundo.

Para a PepsiCo, sustentabilidade ambiental significa “encontrar soluções inovadoras para minimizar o impacto ambiental e reduzir custos através de eficiência energética, conservação de água e redução de materiais para produção de embalagens” (PEPSICO, tradução nossa).

Na década de 90, o aumento no custo de recursos, como água e energia elétrica, a volatilidade do preço de combustíveis e a preocupação com os limites impostos sobre as emissões de gases do efeito estufa pelo governo, levaram a criação de uma equipe para coordenar iniciativas de eficiência energética na sede da empresa (*Energy and environment teams*) e nas plantas industriais (*facility green teams*).

Em 1999, um conjunto de metas audaciosas, conhecido por *Big Hairy Audacious Goals*, foi definido e incluía a redução de 30% do consumo de combustíveis, 50% do consumo de água e 25% do consumo de energia elétrica. Desde então, a empresa manteve-se engajada em implementar projetos de eficiência energética através de processos industriais mais eficientes e utilização de energias renováveis em todas as instalações da Frito-Lay.

As medidas tomadas de 1999 à 2007 incluíram a implementação de painéis fotovoltaicos, concentradores de energia solar, tecnologias de captação de gases, reaproveitamento de vapor de processo, entre outras medidas visando o desenvolvimento de práticas operacionais sustentáveis. Em 2007, a empresa estimou uma economia de aproximadamente 55 milhões de dólares por ano através da redução no consumo de água, eletricidade e gás natural (LARSON, 2011).

5.1 Energia solar na PepsiCo

Para contribuir com a redução de emissão de gases, parte da energia utilizada em algumas plantas industriais da PepsiCo é proveniente de tecnologias solares.

A planta de produção da Gatorade em Tolleson (Arizona) foi equipada com um sistema de geração de energia térmica a partir de tecnologias solares. Reduziu-se o consumo de gás natural em 7500 milhões de BTUs (aproximadamente a 209250m³) na primeira fase do

projeto. Na segunda fase do projeto, coletores de placa plana e concentradores de calha parabólica foram implementados (PEPSICO).

A planta da Gatorade, situada em Phoenix (Arizona), possui um sistema de aquecimento de água composto por 892m² de coletores de energia solar e um tanque térmico (Figura 37). O sistema foi instalado no telhado da planta e é utilizado para o pré-aquecimento de água para fabricação de Gatorade (WEISS, 2014).



Figura 37 – Planta de produção de Gatorade em Phoenix, Arizona.
Fonte: WEISS, 2014.

Na planta da Frito-Lay de Modesto (Califórnia), foi instalado um sistema de geração de vapor por concentradores de calha parabólica que atingem temperaturas de até 230^oC para a produção de *Sun Chips* (Figura 38). O sistema tem capacidade de gerar 2,4MW de potência através de 384 coletores equivalentes 5000m², reduzindo-se a emissão de 771 toneladas de gases do efeito estufa por ano. Além disso, um sistema com 5600 painéis fotovoltaicos com 1MW de potência foi instalado nos telhados da mesma planta (Figura 39), atendendo-se 25% do consumo de energia elétrica em horário de pico e reduzindo-se a emissão de 1000 toneladas de gases do efeito estufa (PEPSICO).

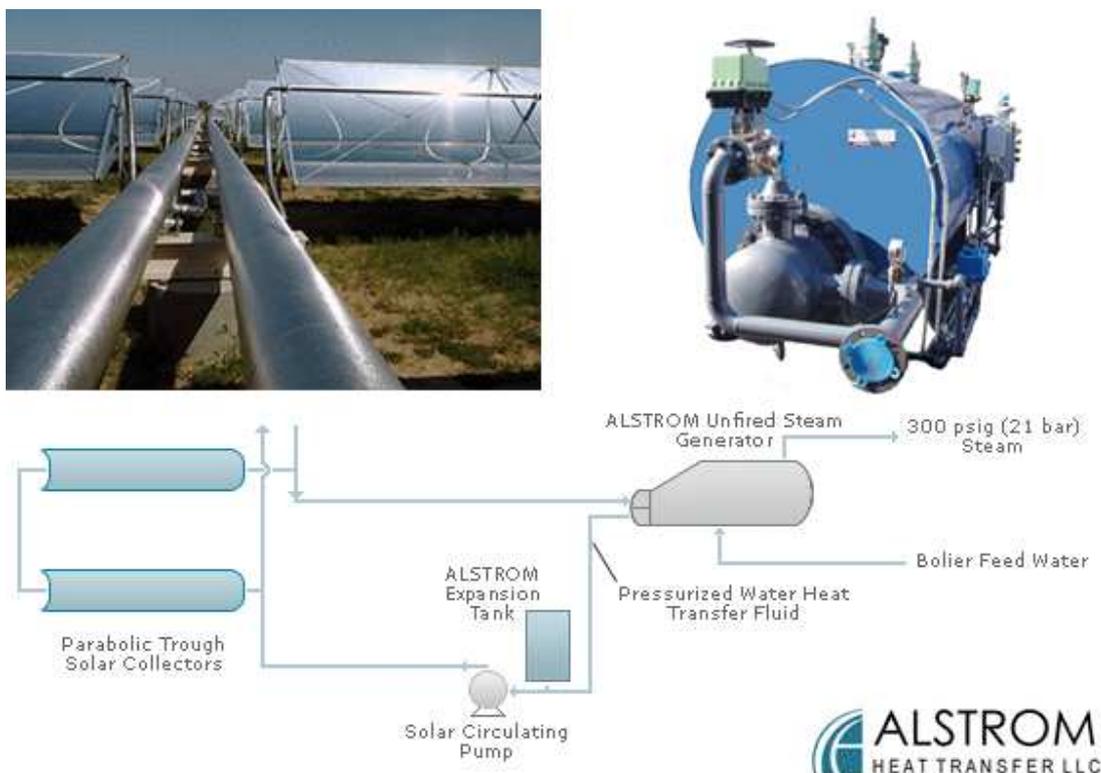


Figura 38 – Sistema de energia solar na Frito-Lay em Modesto, Califórnia.
Fonte: ALSTROM, 2014.



Figura 39 – Planta da Frito-Lay em Modesto, Califórnia.
Fonte: SOLYNDRA.

O comprometimento da PepsiCo com a redução do uso de recursos não-renováveis levou a empresa a implementar tecnologias solares para produção de eletricidade e aquecimento não apenas na planta de produção, mas também em centros de distribuição no Arizona, na Califórnia, em Nova Iorque e no Texas e na sede da empresa em Plano, no Texas (PEPSICO).

5.2 Frito-Lay: Projeto emissões zero

Um projeto visando o desenvolvimento de uma planta com zero de emissões líquidas foi criado. Esse novo projeto seria baseado na integração de tecnologias previamente testadas e sistemas otimizados em diferentes instalações para a criação de uma planta modelo que serviria como laboratório de aprendizagem para a Frito-Lay e outras divisões da Pepsico.

A planta da Frito-Lay de Casa Grande (Arizona) foi escolhida entre outras 40 plantas pra ser a primeira a sediar o novo projeto visando emissões zero. Essa planta foi escolhida devido a sua localização geográfica, área disponível, processos industriais, entre outros fatores que favoreciam a adaptação de um sistema de energias renováveis (LARSON, 2011).

A planta de Casa Grande é responsável pela produção de 4500 toneladas de salgadinho, cujo processo básico de produção encontra-se descrito na Figura 40. Utilizava-se energia elétrica e gás natural em equipamentos de produção (aquecimento de fornos e de óleo utilizado para fritura) e água no preparo e processamento dos ingredientes.

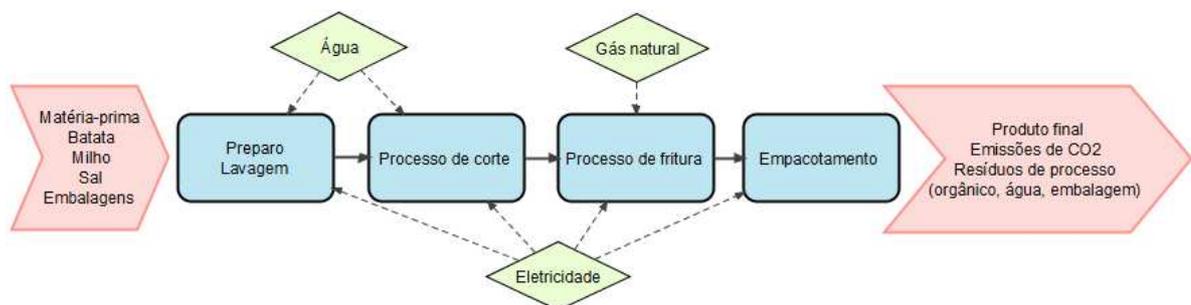


Figura 40 – Processo básico de produção da planta Frito-Lay em Casa Grande, Arizona.
Fonte: LARSON, 2009 (adaptado).

A proposta inicial de adaptação da planta à um sistema de produção com emissões zero incluiu (LARSON, 2011):

- Geração de eletricidade à partir de energia solar;
- Queima de biomassa proveniente de resíduos para a geração de vapor/eletricidade;
- Recuperação de água utilizada no processo.

5.2.1 Tecnologias implementadas

Os prédios administrativos e produtivos de Casa Grande foram adaptados para aproveitar a luminosidade natural do sol de forma passiva e integrada a construção, contribuindo para a redução do consumo de eletricidade (Figura 41).



Figura 41 – Fotografia do sistema de aproveitamento de energia solar passiva na planta Frito-Lay, Casa Grande.
Fonte: PEPSICO¹⁴.

Para o aproveitamento de energia solar ativa, foram instalados cinco sistemas de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica. No total, foram 18 mil painéis capazes de gerar 10GWh (PEPSICO). Dois sistemas fotovoltaicos foram instalados em áreas próximas à planta industrial (Figura 42), outros três sistemas foram instalados no estacionamento (figura 43) (DAVIES, 2011).



Figura 42 – Foto dos painéis fotovoltaicos da planta Frito-Lay, Casa Grande.
Fonte: DAVIES, 2011.

¹⁴ A figura é um *printscreen* da cena de um vídeo da Pepsico disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=kATJkt3bCfQ>



Figura 43 – Fotografia dos sistemas fotovoltaicos instalados no estacionamento da Frito-Lay, Casa Grande.
Fonte: DAVIES, 2011.

Além da geração de energia elétrica para atender a demanda industrial, foram instalados dez concentradores de disco parabólico capazes de abastecer dois caminhões elétricos utilizados para entrega, contribuindo para a redução de emissões totais da Frito-Lay (Figura 44). Além disso, em 2010, a empresa (Frito-Lay) adquiriu a maior frota de caminhões elétricos possibilitando a redução da emissão de 5000m^3 de gases de efeito estufa.



Figura 44 – Concentradores de disco parabólico situados na planta Frito-Lay, Casa Grande.
Fonte: DAVIES, 2011.

A recuperação da água utilizada no processo industrial da planta Frito-Lay de Casa Grande é realizada em um biorreator de membrana seguido por nanofiltração (Figura 45).



Figura 45 – Sistema de recuperação de água na planta Frito-Lay, Casa Grande.
Fonte: DAVIES, 2011.

A queima de biomassa é realizada em uma caldeira de biomassa capaz de queimar 60000 pounds (equivalentes a 27215 kg) de biomassa por hora (DREVENSEK, 2011). A Figura 46 apresenta a caldeira de biomassa utilizada na planta Frito-Lay situada em Casa Grande.

A biomassa utilizada é proveniente de agricultores e fornecedores (resíduos de colheita, por exemplo), resíduos gerados no processo de produção, e sedimentos provenientes do biorreator utilizado no sistema de recuperação de água (LARSON, 2011).



Figura 46 – Caldeira de biomassa na planta Frito-Lay, Casa Grande.
Fonte: PEPSICO.

5.2.2 Resultados

Em 2009 a planta industrial da Frito-Lay em Casa Grande foi a primeira indústria de alimentos a receber a certificação *LEED*¹⁵- *EB Gold* pelo Conselho Americano de Construções Sustentáveis.

Em 2011 a planta da Frito-Lay celebrou o sucesso do projeto desenvolvido. Hoje em dia, a instalação utiliza basicamente água reciclada e energia solar, biomassa e biocombustíveis para geração de energia elétrica e térmica. Dessa forma, 2/3 da energia utilizada na planta é proveniente de fontes de energia renováveis.

Até 2011, a combinação de tecnologias limpas na planta de Casa Grande proporcionou a redução de (DREVENSEK, 2011):

- 50% no consumo e aumento de 75% de água reciclada;
- 90% no consumo de energia elétrica;
- 80% do consumo de gás natural.
- 50% na emissão de gases do efeito estufa;
- 99% na geração de resíduos sólidos não aproveitáveis;
- Redução na dependência de recursos e da volatilidade de preços de gás natural e eletricidade.

5.3 Sustentabilidade ambiental: Estratégia de Mercado

De acordo com Larson (2009), o desenvolvimento de estratégias que garantem práticas sustentáveis em indústrias traz inúmeros benefícios, entre eles:

- Maior controle sobre todos os processos industriais e administrativos que levam a busca de otimização constante da eficiência energética;
- Desenvolvimento de uma cultura com maior conscientização ambiental em toda a cadeia produtiva (da colheita ao consumidor final) e em todos os níveis da empresa;

¹⁵ LEED é uma certificação de construções sustentáveis que atribui pontos em diversas categorias como a localização, uso eficiente de água, geração e consumo de energia, entre outros (ABINEE, 2012).

- Redução de custos a curto e/ou longo prazo;
- Proteção do meio ambiente;
- Possível fonte de rendimento com a venda de créditos de carbono;
- Impacto sobre a opinião pública;

Além disso, o conhecimento e os dados provenientes da implementação de projetos ambientais, como o projeto emissões zero realizado em Casa Grande, são fundamentais para o desenvolvimento de novos projetos em todas as outras plantas da empresa.

6 CONCLUSÃO

As tecnologias solares são capazes de converter radiação solar em energia térmica e/ou energia elétrica (heliotérmica e fotovoltaica). Podem ser classificadas de acordo com o princípio de funcionamento em duas categorias: coletores solares e painéis fotovoltaicos.

O crescimento acelerado de tecnologias solares para geração de energia térmica e elétrica tem resultado em tecnologias cada vez mais eficientes e com preços mais competitivos globalmente, sendo então uma possível fonte de energia alternativa para a indústria.

O elevado consumo de energia elétrica em indústrias (20,3%) apresenta uma oportunidade de utilização de energia solar como fonte de energia complementar.

Os setores da indústria com elevado potencial de utilização de energia térmica solar são: Indústria de alimentos e bebidas, de papel e celulose, química e têxtil, entre outras indústrias não descritas no presente trabalho.

Processos industriais com elevado potencial de aplicação de energia térmica são: esterilização, secagem, concentração, cozimento, lavagem, branqueamento, pasteurização, pressurização, saponificação, tingimento e fixação, pré-aquecimento de água de caldeira, entre outros processos térmicos de baixa e média temperatura.

Sistemas de geração de energia térmica, heliotérmica e fotovoltaica podem ser instalados nos telhados da indústria e/ou em áreas adjacentes à planta. O tamanho do sistema depende do tipo de tecnologia utilizada e da demanda energética.

A importância da energia solar tem caráter social, ambiental e econômica. As principais vantagens da energia solar são a redução da emissão de gases do efeito estufa, do consumo de recursos não-renováveis e da dependência da oferta interna de energia.

O elevado custo das tecnologias solares, o armazenamento limitado e as atuais condições de Mercado, como a falta de programas de incentivo e políticas públicas que promovam a inserção da energia solar, são as maiores limitações da utilização desse tipo de energia na indústria.

A análise do estudo de caso da empresa Frito-Lay, uma divisão da Pepsico, mostra como a energia solar pode ser aproveitada de diversas formas em processos industriais, reduzir custos e contribuir para a sustentabilidade ambiental e para o desenvolvimento de um sistema de energia sustentável.

Na indústria química, alguns processos requerem grande volume de água quente para trocadores de calor e grandes quantidades de vapor para destilações, trocas de calor, secagem, entre outras operações, que representam elevado consumo de combustíveis fósseis, como o gás natural e derivados do petróleo. A utilização de energia solar na indústria química pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis, reduzir a volatilidade de custos com combustíveis, além de melhorar o desempenho ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENGOA SOLAR. Fotografia da usina solar PS10 e PS11 com geração de energia por torre central. Disponível em: <<http://www.abengoasolar.com/web/en/galeria/>>. Acesso em 6 Jun. 2014.

ABINEE. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** ABINEE, 2012, 174 p. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 21 Mar. 2014.

AALBORG CSP A/S. Simulação do movimento de rastreamento solar de um concentrador de calha parabólica. Disponível em: <<http://www.aalborgcsp.com/products-and-services/concentrated-solar-power/csp-industrial-system/parabolic-trough.aspx>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

ALSTROM. Sistema de energia solar da planta Frito-Lay (Modesto). Disponível em: <http://www.alstromcorp.com/e_mail_templates/e_mail/Alstrom%20Solar%20Energy.htm>. Acesso em: 17 Maio 2014.

AMORIM, D.; BAHNEMANN, W. Peso de termoeletricas cresceu 286% em 2 anos. **O Estado de S. Paulo**, São Paulo, 4 Mar. 2014. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,peso-de-termoeletricas-cresceu-286-em-2-anos,1137072,0.htm>> Acesso em: 4 Abr. 2014.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2ª ed. Brasília (DF): ANEEL, 2005. 243 p. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 5 Jun. 2014.

_____. **Informações gerenciais:** Dezembro/2013. Brasília (DF): ANEEL, 2013. 73p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_dez13.pdf> Acesso em: 7 Maio 2014.

AREVA. Refletor Linear de Fresnel AREVA Solar. Disponível em: <<http://www.areva.com/EN/solar-232/arevasolarapplications.html>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

BURATTINI, M. P. T. C. **Energia:** uma abordagem multidisciplinar. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

BRUNNER, C., SLAWITSCH, B., GIANNAKOPOULO, K., SCHITZER, H. **Industrial process indicators and heat integration in industries**. JOANNEUM RESEARCH, Graz, Áustria, 2008. Disponível em: <http://task33.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Process_Integration_Booklet.pdf>. Acesso em: 16 Maio 2014.

ÇENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A. **Termodinâmica**. 5ª ed. São Paulo (SP): McGraw-Hill, 2006.

CHONG, K. K.; LIM, C. Y.; HIEW, C. W. Cost effective solar furnace system using fixed geometry Non-Imaging Focusing Heliostat and secondary parabolic concentrator. *Renewable Energy Journal*. v. 36, p. 1595-1602, 2011. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0960148110005124/1-s2.0-S0960148110005124-main.pdf?_tid=92c513a4-d6ca-11e3-8642-00000aab0f6c&acdnat=1399565308_3eaf742f178a757c8fe7426df63725b1> Acesso em: 5 Abr. 2014.

DAVIES, J. A report from PepsiCo's road to zero. *Energy Deals*, página da web, 2011. Disponível em: <<http://energydeals.wordpress.com/2011/10/08/a-report-from-pepsicos-road-to-zero/>>. Acesso em: 22 Maio 2014.

DREVENSEK, S. **“Near Net Zero” at Frito-Lay's Casa Grande facility in Arizona**. *Green Tech Media*, página da web, 2011. Disponível em: <<http://www.greentechmedia.com/articles/read/near-net-zero-at-frito-lays-casa-grande-facility-in-arizona>>. Acesso em: 22 Maio 2014.

EENERGYYS. Célula de silício amorfo. Disponível em: <<http://eenergys.com/>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

EPE (BRASIL). **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**: Nota técnica EPE. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 58p.

_____. **Balanco Energético Nacional 2013**: Ano base 2012. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 288p.

FIRJAN. **Manual de Indicadores Ambientais**. Rio de Janeiro (RJ): Sistemas FIRJAN, 2008. 20p. Disponível em: <<http://www.firjan.org.br/data/pages/2C908CE92826B8DA01283FB149342002.htm>> Acesso em 15 Abr. 2014.

FOURTIN, S., HERMANN, M., STRYI-HIPP, G., NITZ, P., PLATZER, W. **Hybrid PV_Thermal collector development:** concepts, experiences, results and research needs. Energy Procedia. v.48, p. 37-47, 2014.

FREIN, A., CALDERONI, M., MOTTA, M. **Solar thermal plant integration into an industrial process.** Energy Procedia, v.48, p. 1152-1163, 2014.

GREEN, M. A., EMERY, K., HISHIKAWA, Y., WARTA, W., DUNLOP, E. D. Solar cell efficiency tables (version 39). **Progress in photovoltaics:** Research and Applications, p. 12-20, 2012. Disponível em: <<http://my.ally.net.cn/uploadfile/2013/0411/20130411044357285.pdf>> Acesso em: 10 Maio 2014.

HÉLIODYSSÉE®. Fornalha solar em Odeillo Font-Romeu, Pyrénées-Orientales, França. Disponível em: <<http://www.foursolaire-fontromeu.fr/>>. Acesso em: 5 Maio 2014.

HOME ENERGY METERING. Eficiência de absorção da radiação solar: Coletor de tubo a vácuo vs. coletor de placa plana. Disponível em: <<http://www.home-energy-metering.com/solar-thermal-energy.html>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

HOME POWER, INC. Modelo de um coletor de tubo à vácuo comercial. Disponível em: <<http://www.homepower.com/articles/solar-water-heating/domestic-hot-water/solar-hot-water-system-types-applications>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

IEA. **Renewable Energy Technologies:** Solar Energy Perspectives 2011. Paris (França): 2011.

_____. **Technology Roadmap:** Solar heating and cooling. Paris (França): 2012. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_SolarHeatingCooling_Roadmap_FINAL_WEB.pdf>. Acesso em: 16 Maio 2014.

INDUSTRIAL SOLAR THERMAL SOLUTIONS. Esquema de concentração em um refletor linear de fresnel. Disponível em: <<http://www.industrial-solar.de/CMS/en/angebot/fresnel-kollektor/>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering:** processes and systems. 1ª ed. San Diego (EUA): Elsevier, 2009.

KROH, KILEY. **Germany Breaks Its Own Record For Solar Power Generation.** Think Progress, página da web, 2013. Disponível em: <<http://thinkprogress.org/climate/2013/08/22/2508191/germany-solar-generation-record/>> Acesso em: 20 Set. 2013.

LAKATOS, E. M., MARCONI, M. A. **Fundamentos da metodologia científica.** 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LARSON, A. **Frito-Lay North America: The Making of a Net Zero Snack Chip,** UVA-ENT-0112. Charlottesville (EUA): University of Virginia, 2009.

_____. **Sustainability, Innovation, and Entrepreneurship.** Flat work knowledge, Inc., 2011, 312p. Disponível em <<http://catalog.flatworldknowledge.com/>>. Acesso em: 22 Maio 2014.

LEVA, F. F., SALERNO, C. H., CAMACHO, J. R., GUIMARÃES, S. C. Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5, 2004, Campinas. **Proceedings online.** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200020&lng=en&nrm=abn>. Acesso: 12 Maio 2014.

LUSOSOL. Esquema de um coletor parabólico composto com receptor tubular. Disponível em: <<http://www.lusosol.com/colectores.htm>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

MALAGUETA, D. C. **Geração heliotérmica: Princípios e tecnologias.** Rio de Janeiro (RJ): CEPTEL, 2012, 43p.

MARINO, A. Fotografia da usina solar Solnova 1 em Sevilha, Espanha. 2010. Disponível em: <http://www.energydigital.com/news_archive/news/solar-energy/abengoa-solar-introduces-new-parabolic-trough-plant>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

MEKHILEF, S., SAIDUR, R., SAFARI, A. **A review on solar energy use in industries.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 1777-1790, 2011.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. **Economia Brasileira em Perspectiva.** 18ª ed. Brasil: Ministério da Fazenda, março de 2013. Disponível em: <<http://www.fazenda.gov.br/portugues/docs/perspectiva-economia->

brasileira/edicoes/Economia-Brasileira-EmPerspectiva-Jan-Mar-19-04-13.pdf>. Acessado em: setembro de 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2012**. Brasília (DF): MME, 2013. 26p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3_-_Resenha_Energetica/1_-_Resenha_Energetica.pdf> Acesso em: 20 Mar. 2014

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>> Acesso em: 16 Maio 2014.

MILLS, D. **Advances in solar thermal electricity technology**. Solar Energy, v. 76, p. 19-31, 2004.

MÜLLER, H; BRANDMAYR, S.; ZÖRNER, W. **Development of an evaluation methodology for the potential of solar-thermal energy use in the food industry**. Energy Procedia, v.48, p. 1194-1201, 2014.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Kimberlina Solar Thermal Power Plant. Disponível em: <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=37> Acesso: 7 Jul. 2014.

PARIDA, B., INIYAN, S., GOIC, R. **A review of solar photovoltaic technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 1625-1636, 2011.

PATTON, T., ALMER, L., HARTMANN, H., SMITH K. P. **An overview of potential environmental, cultural, and socioeconomic impacts and mitigation measures for utility-scale solar energy development**. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory. Chicago: 2013, 106p. Disponível em: <http://www.evs.anl.gov/downloads/Solar_Environmental_Impact_Summary.pdf>. Acesso em: 16 Maio 2014.

PEPSICO. Sustainability report 2011/2012. Disponível em: <<http://pepsico.com/Purpose/Performance-with-Purpose/Sustainability-Reporting>>. Acesso em: 15 Set. 2013.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RÜTHER, R. V. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos (SP): INPE, 2006. 60p. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf> Acesso em 15 Maio 2014.

PEREIRA, E. B. Assessment of solar and wind energy resources in Brazil. In: FAPESP, IOP, and RSC workshop: Physics and Chemistry of Climate Change and Entrepreneurship. INPE, 2009. Não paginado. Disponível em: <http://www.fapesp.br/pdf/5023/PFFPMCG_2702_bueno.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2014.

REIS, L. B DOS; ELIANE A. A. FADIGAS; CLÁUDIO E. CARVALHO. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 1ª ed. Barueri (SP): Manole, 2005.

RODRIGUES, G. **Aquecimento solar de piscinas**. Página da web, 2007. Disponível em: <<http://blogandoasenergias.blogspot.com.br/2007/11/aquecimento-solar-de-piscinas.html>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

SCHEIDT, P.; MULLER, F. B. **Energias/solar**. Instituto Carbono Brasil, Página da web, 2011. Disponível em: <<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/energias/solar>>. Acesso em: 20 Set. 2013.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Energia Solar Paulista: Levantamento do potencial**. São Paulo (SP): Secretaria de Energia, 2013. 27p. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/455.pdf>> Acesso em: 15 Abr. 2014.

SEIA. **Solar Heating and Cooling: Energy for a Secure Future**. SEIA, página da web, 2013a. Disponível em: <<http://www.seia.org/research-resources/solar-heating-cooling-energy-secure-future>>. Acesso em: 04 Abr. 2014.

_____. **Solar means business 2013: Top U.S. commercial solar users**. SEIA, página da web, 2013b. Disponível em: <<http://www.seia.org/research-resources/solar-means-business-2013-top-us-commercial-solar-users>>. Acesso em: 22 Maio 2014.

SILICONSOLAR. Células fotovoltaicas de silício policristalino e monocristalino. Disponível em: <<http://www.siliconsolar.com/commercial-solar-cells.html>>. Acesso em 6 Jun. 2014.

SOLAR WATER HEATING. Ilustração da configuração de um coletor de placa plana. Disponível em: <<http://www.energygroove.net/technologies/solar-water-heating/>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

SOLARES. Transferência de calor na placa absorvedora. Disponível em: <<http://www.solares-online.com.br/index.php?codpagina=00019169>>. Acesso em: 5 Jun. 2014.

SOLFOCUS, INC. Placa composta por células com concentração de raios incidentes. Disponível em: <<http://realitypod.com/2011/12/top-10-solar-energy-companies/solfocus/>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

SPG Solar. Projeto Johnson & Johnson. Disponível em: <<http://www.spgsolar.com/project/johnson-and-johnson/>>. Acesso em: 16 Maio 2014.

STANFORD UNIVERSITY. Esquema de uma célula de multijunção de alta eficiência. Disponível em: <<http://web.stanford.edu/group/gcep/cgi-bin/gcep-research/all/plasmonic-photovoltaics/>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

STINE, W.B.; GEYER, M. **Power from the Sun**. 2001. Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net/book.html>> Acesso em: 8 Maio 2014.

SOLYNDRA. Planta da Frito-Lay em Modesto, Califórnia. Disponível em: <<http://guntherportfolio.com/2011/01/benchmarking-solyndra-photovoltaic-installations/>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

TIWARI, G.N., R. K. MISHRA. **Advanced Renewable Energy Sources**. Photovoltaic and Photovoltaic Thermal Systems. Royal Society of Chemistry, 2012.

UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. Célula orgânica. Disponível em <<http://www.cam.ac.uk/research/news/organic-solar-cells>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

UNIVERSITY OF SYDNEY. Visualização de uma configuração MTSA. Disponível em: <<http://www.physics.usyd.edu.au/app/research/solar/mtsa.html>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

US DEPARTMENT OF ENERGY. Esquema de um sistema de geração de energia heliotérmica. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/energybasics/articles/linear-concentrator-system-basics-concentrating-solar-power>>. Acesso em: 5 Jun. 2014.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de sustentabilidade:** uma análise comparativa. 2002. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Curso de pós graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84033/189898.pdf?sequence=1>> Acesso em: 1 Abr. 2014.

VANONNI, C., BATTISTI, R., DRIGO, S. **Potential for solar heat in industrial processes.** Madrid (ESPAÑA): CIEMAT, 2008. Disponível em: <http://task33.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task33-Potential_for_Solar_Heat_in_Industrial_Processes.pdf>. Acesso em: 16 Maio 2014.

WEISS, W. **Solar heat for industrial processes:** Worldwide potencial, sectors, processes and overview on installed systems. Áustria: AEE INTEC, 2014 Disponível em: <http://www.crses.sun.ac.za/files/services/events/workshops/01_Solar%20Heat%20for%20Industrial%20Processes%20_Overview_Weiss.pdf>. Acesso em: 17 Maio 2014.