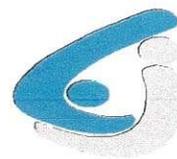




UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA



O Estado da Arte de Coletores Solares Térmicos para Geração de Eletricidade.

Flávio Augusto Gomes

Campina Grande, abril de 2006.



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA



O Estado da arte de coletores solares térmicos para geração de eletricidade.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do título de engenheiro eletricista.

Flávio Augusto Gomes

**Leimar de Oliveira, Prof. M.Sc.
Orientador**

Campina Grande, abril de 2006

**“Feliz o homem que acha sabedoria
e o homem que acha conhecimento.”**

Salomão

**Aos meus queridos pais:
Antônio e Rildes**

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Importância da energia solar	2
1.2 - Energia Solar	3
1.2.1 - Bases astronômicas e meteorológicas	3
1.3 - Componentes de Um Sistema Solar Térmico	5
1.3.1 – Coletores	5
1.3.2 - Placa Absorvedora	5
1.3.3 - Coletores Parabólicos Compostos (CPCs)	6
1.3.4 - Vantagens e desvantagens de um CPC	7
CAPÍTULO 2- GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	8
2.1- VISÃO GERAL DA GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	9
2.2- ENERGIA SOLAR TERMELÉTRICA NO BRASIL	11
2.2.1 - Opções de Fontes de Energia Renováveis para a Irrigação.....	13
2.3- TECNOLOGIA SOLAR NO BRASIL NOS PRÓXIMOS 20 ANOS	15
2.4- CONVERSÃO HELIOTÉRMICA	16
2.4.1 - Coletores solares térmicos	16
2.4.2 - Conversão heliotermoeleétrica	18
2.4.3 - Conversão fotovoltaica	20
2.5- USINA HELIOTÉRMICA	22
2.5.1 - Concentração de radiação solar	23
2.5.2 - Sistemas de concentração para processos térmicos.....	24
CAPÍTULO 3 – TECNOLOGIAS SOLARES TÉRMICAS	29
3.1 - SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DE CONCENTRAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ELECTRICIDADE	30
3.1.1 - Energia Solar Concentrada	30
3.1.2 - Produção de Eletricidade	30
3.2- CALHA PARABÓLICA (Parabolic Trough)	32
3.2.1 – Histórico	33
3.2.2 – Funcionamento	34
3.2.3 - Tecnologias empregadas no Brasil	38
3.3 - O DISCO SOLAR PARABÓLICO (Parabolic Dish)	39

3.3.1 - Concentrador Solar	40
3.3.2 - Receptor	41
3.3.3 - Motor Stirling	41
3.3.4 - Sistema de Rastreamento	42
3.3.5 - Sistemas Dish/Stirling	43
3.3.6 - Aspectos econômicos	46
3.3.7 - Tecnologia	47
3.4- TORRE SOLAR (Solar Tower)	48
3.4.1 - Centrais solares em torre	49
3.4.2 - Torre de energia Solar em construção	52
3.5- VANTAGENS	52
3.6- ENERGIA TÉRMICA DO PROCESSO INDUSTRIAL	53
3.6.1 - Potencial e exigências de mercado	53
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Variação diária e valor global diário de irradiação	4
Figura 1.2 - Radiação solar global e suas componentes	5
Figura 1.3 - Absorção (α) e emissão através de superfícies diferentes	6
Figura 1.4 - Colectores Parabólicos Compostos	7
Figura 2.1 - Irradiação e variabilidade da irradiação no Brasil	14
Figura 2.2 - Superfície equivalente de coletores solares planos e projeção temporal da superfície de coletores a serem instalados. Regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil.....	17
Figura 2.3 - Campos de coletores concentradores de 8MW cada um, localizados no Deserto de Mojave, Califórnia, operacionais desde 1989	19
Figura 2.4 - Varias opções de concentração de radiação solar (em cima: refletores com um eixo de acompanhamento, em baixo: refletores com dois eixos de acompanhamento)	23
Figura 2.5 - Estrutura esquemática de um coletor CPC	25
Figura 3.1-Trajeto da conversação da radiação solar à eletricidade solar.....	31
Figura 3.2 - Calha parabólica solar	32
Figura 3.3 -Princípio dos sistemas parabólicas de calha e Usina Elétrica Térmica Solar de Calha Parabólica, Califórnia, EUA	34
Figura 3.4 - Central com Concentradores "Trough" na Califórnia	34
Figura 3.5 - Sistema calha parabólica Solar/ Rankine	35
Figura 3.6 - Colectores parabólicos "trough".....	35
Figura 3.7 - Tecnologia calha parabólica	37
Figura 3.8 - sistema em Ciclo Solar Integrado.....	38
Figura 3.9 - sistema solar disco parabólico	40
Figura 3.10 - sistemas de prato/Stirling. Produção de energia descentralizadas para áreas remotas	40
Figura 3.11 - esquema de um motor stirling	41
Figura 3.12 - esquema do princípio de operação do motor stirling	42
Figura 3.13 - esquema do sistema prato/motor. Combinação de 4 unidades de 25 kW em aplicação	43
Figura 3.14 - esquema alternativo do prato/solar.	44
Figura 3.15 - sistemas de demonstração Dish/Stirling em Almería (Sul de Espanha)	44
Figura 3.16 - sistema dish-stirling de 25 kW em operação no projeto Salt Project no Phoenix, AZ.	45
Figura 3.17 - sistema prato solar de 10 kW desenvolvido pela "WG associates" para uso de americanos no sudoeste dos Estados Unidos	45

Figura 3.18 - sistema prato solar desenvolvido pelo Laboratório Nacional Sandia, Estados Unidos	48
Figura 3.19 - Princípio dos sistemas Torre Solar, Plataforma Solar de Almeria, Espanha	48
Figura 3.20 - Configuração básica do sistema Torre Solar	49
Figura 3.21 - Helióstatos	49
Figura 3.22 - Instalações de torre solar testadas em Almería (Sul de Espanha)	50
Figura 3.23 - Central solar em torre com sistema alternativo	51
Figura 3.24 - A combustão fóssil de reserva e/ou o armazenamento da energia térmica transforma a capacidade solar em capacidade presente	52
Figura 3.25 - Rendimento anual potencial da energia do coletor de placa, coletor de vácuo e do coletor parabólico de pequeno porte da calha em função da temperatura do fluido do coletor médio em posições de baixa e elevada incidência da insolação.	54
Figura 3.26 - Custos de geração de energia térmica do coletor plano de placa, do coletor de vácuo CPC e do coletor parabólico de pequeno porte da calha em função da temperatura do fluido do coletor médio em posições de baixa e elevada incidência da insolação	54
Figura 4.1 - Projeção do custo de energia para a geração heliotérmica.	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Redução de custos Verificados e esperados para algumas fontes Alternativas ..	10
Tabela 2.2 – Vendas de coletores solares planos, em m ² , no ano de 1999, e vendas acumuladas no Brasil, Alemanha e Europa	17
Tabela 2.3 - Propriedades, população e eletrificação rural no Brasil (1991)	21
Tabela 2.4 – Concentradores Térmicos, concentração, temperatura de operação e teórica ...	24
Tabela 2.5 - Custos de investimento para vários tipos de coletores	27
Tabela 3.1 - Dados técnicos para os concentradores das centrais SEGS da Califórnia	36
Tabela 3.2 - Características de diferentes coletores de calha parabólica	36
Tabela 3.3 - Características técnicas do Sistema Dish/Stirling "EuroDish"	46
Tabela 3.4 - Valores da irradiação normal direta e irradiação global horizontal para vários capitais Européias	46
Tabela 3.5 -Valores da irradiação normal direta e irradiação global horizontal para várias regiões que interessam para a instalação de centrais solares	46
Tabela 4.1 – Comparação das Principais Tecnologias Heliotérmicas	58

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AC	Corrente Alternada
CEPEL	Centro De Pesquisa De Energia Elétrica
CHESF	Compainha Hidrelétrica do São Francisco
COELBA	Compainha de eletricidade da estado da Bahia
CODEVASF	A Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba
CPC	Coletores Parabólicos Compostos
CEMIG	Compainha Energética de Minas Gerais
CSP	Energia Solar concentrada
DLR-PSA	Centro Aeroespacial Alemão - Plataforma Solar de Almeria
DLR-PSA	Centro Aeroespacial Alemão - Plataforma Solar de Almeria
DOE	Departamento de Enegia dos Estados Unidos
ELETOBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras SA
FBDS	Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável
GEF	Fundo Mundial para o Meio Ambiente
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
KJCOC	Sistema de geração de energia solar Califórnia
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar- EMC/UFSC
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
MA	massa de ar
P & D	Pesquisa e desenvolvimento
PROINFA	Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas
PRODEM	Programa de Desenvolvimento de Estados e Municípios
PETROBRÁS	Petróleo brasileiro SA
OECD/IEA	Agência Internacional de Energia
SEGS	Sistema de geração de energia solar
ΔS	ângulo entre a luz solar e a superfície da Terra
kWh	Quilowatt-hora
kW	Quilowatt
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
°C	graus Celsius
€	Euro
US\$	Dólar americano
μm	micrometro
ha	hectare
P	Potência
Q	Quantidade de calor

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

O estudo de coletores solares na área de energia solar térmica tem sido pouco explorado e apresentado no nosso setor de engenharia elétrica.

Uma visão mais ampla sobre este assunto estará sendo mostrada neste trabalho onde constam informações técnicas, pesquisadas e analisadas sobre o que há de mais importante e avançado tecnologicamente na atualidade.

São apresentados estudos e pesquisas na área de energia solar sobre as mais recentes tecnologias e aplicações no mundo sobre coletores solares térmicos para geração de eletricidade, ou seja, a energia elétrica gerada através da captação de energia solar, buscando ampliar e familiarizar o conhecimento nesta área.

Num coletor solar térmico, não se utiliza o efeito fotovoltaico para converter a radiação emanada do Sol em eletricidade. Neste caso, o fator central é o calor, e um sistema heliotérmico opera coletando, transportando, armazenando e convertendo calor em eletricidade.

No capítulo 1 estará sendo apresentada uma introdução sobre conceitos de energia solar mostrando sua importância bem como os componentes básicos que fazem parte de um coletor solar.

O capítulo 2 mostra como é feita a geração Heliotérmica, a conversão de energia térmica em energia elétrica, mostra também a situação em que se encontra o Brasil com relação à energia solar e suas perspectivas com relação à produção para o futuro.

No capítulo 3, apresentam-se as principais tecnologias existentes no mundo em energia térmica solar, que são: Calha parabólica (*parabolic trough*), o disco solar parabólico (*dish/stirling*) e a Torre solar (*power tower*), estarão sendo abordadas essas três tecnologias e suas aplicações no mundo.

O capítulo 4 é conclusivo mostrando que o objetivo deste trabalho é trazer informações e conhecimento sobre este setor que vem apresentando-se bastante vantajoso e que vem crescendo no mundo trazendo benefícios, pois a energia solar é uma importante alternativa para a geração de eletricidade que oferece vantagens ecológicas.

1.1 – Importância da energia solar

A energia tem sido através da história a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural. É assim, evidente a importância da energia não só no contexto das grandes nações industrializadas, mas principalmente naquelas em via de desenvolvimento, cujas necessidades energéticas são ainda mais dramáticas e prementes.

Com a recente crise dos preços de referência do petróleo, este variando em torno de 70 US\$ o barril, as energias renováveis, principalmente a energia solar, ganha destaque no cenário energético mundial, sendo o seu estudo e pesquisa de grande importância.

1.2 - Energia solar

A maior fonte de energia disponível na Terra provém do sol. A energia solar é indispensável para a existência de vida na Terra, sendo o ponto de partida para a realização de processos químicos e biológicos.

No centro do Sol ocorre um processo de fusão nuclear, no qual dois núcleos de hidrogênio se fundem com um de hélio, radiando para o espaço uma grande quantidade de energia. A energia proveniente desta fusão é radiada para o espaço em forma de ondas eletromagnéticas. Tendo em conta que o Sol se encontra a 143 milhões de quilômetros da Terra apenas uma pequena fração da energia irradiada está disponível. No entanto a energia fornecida pelo Sol durante um quarto de hora é superior à energia utilizada, a nível mundial, durante um ano.

1.2.1-Bases astronômicas e meteorológicas

A energia irradiada pelo sol, para a atmosfera terrestre é praticamente constante. Esta energia irradiada ou intensidade de radiação é descrita como a constante solar relativa a uma área de 1 m^2 . Esta constante está sujeita à pequenas alterações, provocadas pela variação da atividade solar (*sun spots*) e com a excentricidade da órbita da Terra. Estas variações, que se detectam para a gama dos raios UV são menores que 5%, e não são significativas para as aplicações de tecnologia solar. O valor médio da constante solar é $E_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$.

Caso de Estudo: Energia irradiada, irradiação, quantidade de calor. A irradiação solar (E) de 1000 Watts por metro quadrado, significa a capacidade de irradiar uma potência P de 1000 W, numa superfície de 1 m^2 , sendo a unidade de medida de potência o Watt. Quando a potência se define para uma superfície então é chamada de irradiação.

Quando o Sol brilha com uma potência de 1000 watts durante uma hora, produz 1 KW de trabalho por hora. No caso de se converter 100% desta energia em calor, então produz-se 1KWh de calor.

Potência irradiada: P (W).

Irradiação: E (W/m^2).

Quantidade de calor: Q (Wh).

Tendo apenas por base os dados astronômicos sabe-se que a energia solar disponível na Terra é muito variável. Para uma localização pré-estabelecida esta variação depende da latitude geográfica, do dia e do ano. Devido à inclinação do eixo da Terra os dias de verão são maiores que os dias de inverno, e as altitudes solares que o sol atinge são mais elevadas nos meses de verão do que no inverno.

A figura seguinte mostra a seqüência de irradiação durante um dia na cidade de Lisboa numa placa horizontal com uma superfície de 1 m^2 , para quatro dias ao longo do ano.

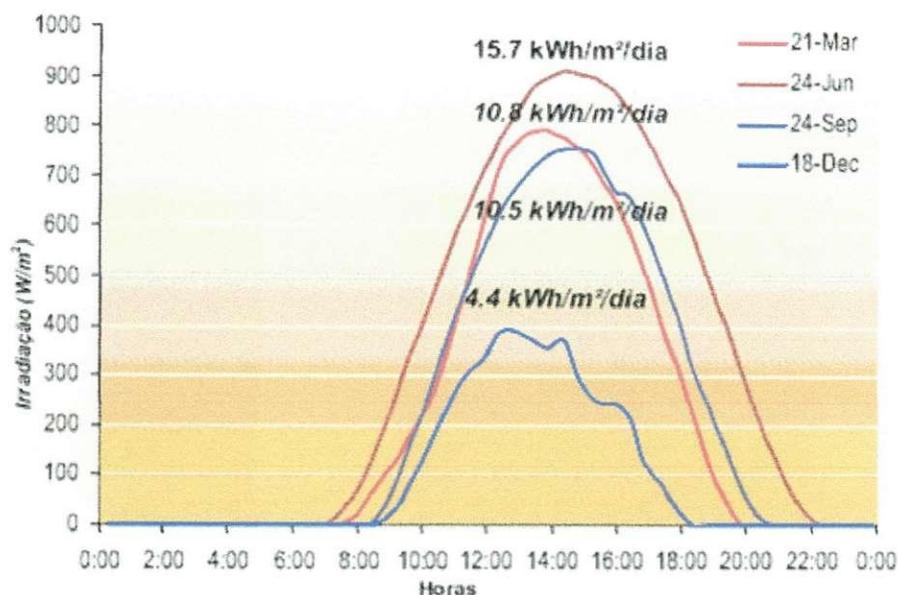


Figura 1.1 – Variação diária e valor global diário de irradiação
Fonte - greenpro

A radiação solar tem diversas componentes: a radiação solar direta E_{dir} proveniente do sol, que atinge a terra sem qualquer mudança de direção e a radiação difusa E_{dif} , que chega aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. A radiação difusa inclui também a radiação refletida pela superfície terrestre. A soma da radiação difusa e direta equivale à radiação solar global E_g .

$$E_g = E_{dir} + E_{dif}$$

Esta equação, caso não sejam referidas outras condições, refere-se à radiação sobre uma superfície horizontal.

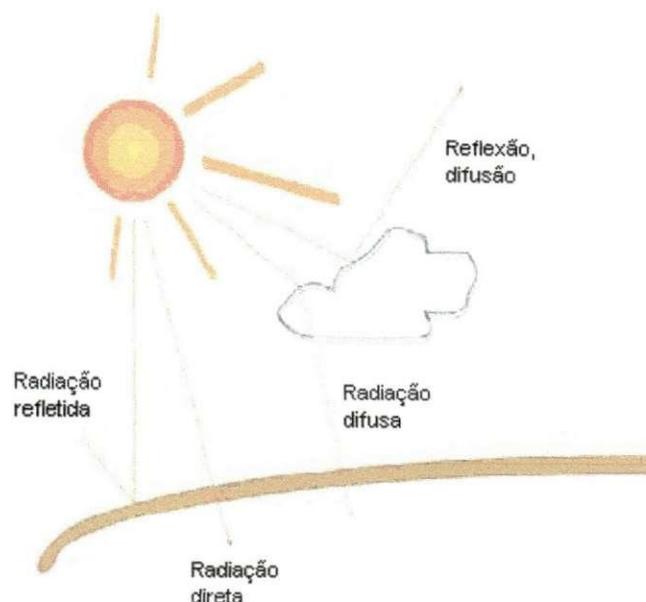


Figura 1.2 – Radiação solar global e suas componentes
Fonte - greenpro

Quando o Sol incide verticalmente, acima de uma determinada localização, a radiação efetua o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando o Sol se encontra num ângulo mais baixo a radiação percorre um caminho mais longo, sofrendo a radiação solar uma maior absorção e difusão e estando disponível uma menor intensidade de radiação. O fator “Massa de Ar” (MA) define-se como a medida do número de vezes que o caminho da luz solar até à superfície da terra corresponde à espessura de uma atmosfera. Usando esta definição com o Sol numa posição vertical ($\Delta S = 90^\circ$) obtém-se um valor de $MA=1$.

1.3 - COMPONENTES DE UM SISTEMA SOLAR TÉRMICO

1.3.1 - Coletores

Os coletores servem para converter a maior quantidade de radiação solar disponível em calor e transferi-lo com o mínimo de perdas para o resto do sistema. Existem diversos tipos e *designs* de coletores para diferentes aplicações com custos e performances específicos.

1.3.2 - Placa Absorvedora

A peça fundamental de um coletor plano é a placa absorvedora. Esta consiste numa chapa metálica que apresenta boas características de absorção de calor (fabricadas, por exemplo, em alumínio ou cobre numa superfície unitária ou em várias placas) com revestimento preto-baço ou com revestimento seletivo e

tubos de transferência de calor (usualmente o material utilizado é o cobre) ligados ao coletor. Desta forma, quando a radiação solar atinge a placa esta é parcialmente absorvida e parcialmente refletida. Da absorção da radiação é gerado calor, que é transferido da chapa metálica para os tubos ou canais de escoamento. Através destes tubos de escoamento o fluido de transferência térmica transporta o calor para os tanques de armazenamento.

Esse coletor serve para converter a maior quantidade de radiação solar disponível em calor e transferir este calor com o mínimo de perdas para o resto do sistema. Assim, o absorvedor está otimizado para ter a maior capacidade de absorção possível e a menor emissividade térmica possível. Esta otimização é possível através do tratamento da chapa metálica, com um revestimento de pintura: preto-baço ou seletivo. Ao contrário de um revestimento preto-baço, um revestimento seletivo é formado por uma estrutura com diferentes camadas que melhora a conversão de radiação solar de onda-curta minimizando as perdas.

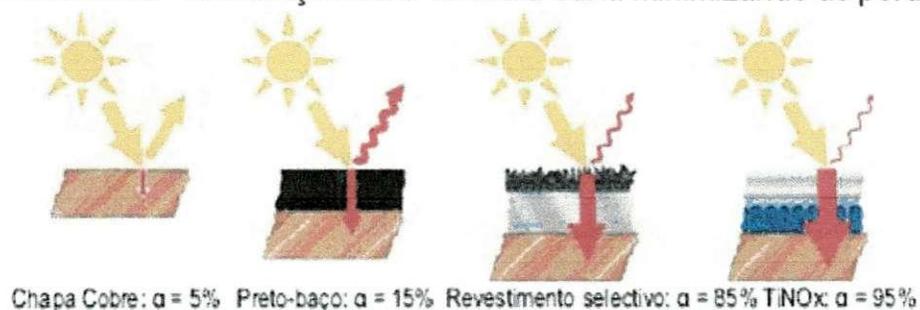


Figura 1.3 – Absorção (α) e emissão através de superfícies diferentes

Fonte - Greenpro

Caso de estudo: Radiação e interação com materiais:

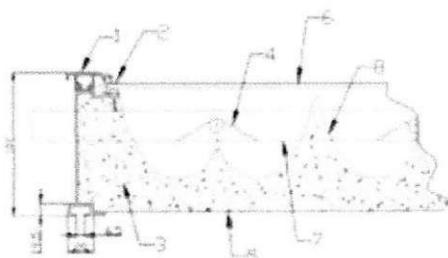
Quando as ondas-curtas da luz solar (comprimento de onda 0,3-3,0 μm) atingem um objeto, no caso uma cobertura solar, estas são refletidas de acordo com a estrutura da superfície (material, rugosidade, cor).

Superfícies claras refletem mais, comparadas com superfícies escuras. A proporção de radiação refletida (especialmente com superfícies de vidro) é também dependente do ângulo de incidência da radiação (Lei de Fresnel). A radiação que não é refletida é absorvida pelo objeto, ou no caso de objetos de material translúcido é também transmitida através desses objetos. A parte absorvida é convertida em radiação térmica de ondas-longas (comprimento de onda 3,0-30 μm) e radiada de acordo com a estrutura da superfície.

1.3.3 - Coletores Parabólicos Compostos (CPCs)

Por forma a reduzir as perdas térmicas existentes nos coletores planos desenvolveu-se uma tecnologia baseada na redução da área de absorção, em comparação com a área de captação da radiação solar. Desta forma reduzem-se as perdas térmicas, tendo em conta que são proporcionais à área do absorvedor em contraposição com a área de abertura.

O modo de funcionamento destes coletores passa pela concentração da radiação solar, na placa absorvedora, através dum sistema duplo de absorção da radiação. Assim, os coletores são constituídos por: um sistema de absorvedores que permite absorver a radiação de forma semelhante aos coletores planos; um sistema de reflexão da radiação que permite a absorção da radiação na parte inferior do absorvedor. Estes coletores são conhecidos como concentradores do tipo CPC (Coletores Parabólicos Compostos) devido à configuração da superfície refletora em forma de parábola.



Legenda

- 1 - Perfil de alumínio anodizado;
- 2 - Vedante de borracha E.P.D.M.;
- 3 - Isolamento em poliuretano expandido livre de CFCs;
- 4 - Alheta em alumínio seletiva em ambas as faces;
- 5 - Chapa de fundo;
- 6 - Vidro temperado c/ 3 mm de espessura;
- 7 - Tubo de cobre $\phi 22$ mm;
- 8 - Alumínio espelhado de alta reflectividade.

Figura 1.4 - Coletores Parabólicos Compostos
Fonte: Ao Sol

A superfície refletora, através da sua configuração, permite assim concentrar a radiação com a utilização de materiais espelhados com elevado nível de refletividade. O ângulo de abertura destas superfícies permite captar a radiação direta e a difusa tal como nos coletores planos.

1.3.4 - Vantagens e desvantagens de um CPC

Vantagens:

- Tem elevada eficiência mesmo com elevadas diferenças de temperaturas entre o absorvedor e o meio envolvente (verão);
- Tem uma elevada eficiência com baixa radiação (inverno);
- Suporta aplicações de calor com mais eficiência do que os coletores planos;
- Funciona com elevadas temperaturas, (condicionamento do ar).

Desvantagens:

- Mais caro do que um coletor plano.
- Os CPCs consistem em sistemas de concentração da radiação solar, para obtenção de temperaturas mais elevadas, com alto rendimento, devido às menores perdas térmicas, mas com características de simplicidade que os tornam equivalentes, na montagem e utilização, aos coletores convencionais planos, pelo fato de se poderem colocar da mesma forma em telhados ou outras estruturas fixas e captar também a radiação solar difusa.

CAPÍTULO 2 GERAÇÃO HELIOTÉRMICA

2.1 - VISÃO GERAL DA GERAÇÃO HELIOTÉRMICA

A energia solar é a forma mais abundante de energia disponível do mundo. É uma alternativa importante para a geração de eletricidade que oferece vantagens econômicas e ecológicas. Algumas destas vantagens são:

- Inesgotável fonte de energia renovável e gratuita; geração de eletricidade livre de contaminantes gasosos como: CO₂, SO₂ e NOX;
- Níveis de poluição aceitavelmente baixos quando complementada com combustíveis fósseis;
- Reduzida necessidade de área (3,0 ha/MW) quando comparada a outras fontes renováveis (Hidráulica: 55,0 ha/MW em média), isto é, impacto ambiental mínimo ao meio ambiente.

A conversão da energia solar em energia mecânica e/ou elétrica tem sido objeto de experiências por mais de um século. Em 1872, MOUCHOT exibiu uma imprensa acionada a vapor durante a Exposição de Paris, e em 1913 um sistema de irrigação solar começou seu breve período de operação em Meadi no Egito. Estes e outros desenvolvimentos utilizaram coletores concentradores para fornecer vapor para acionar estas máquinas. Uma interessante revisão histórica destas experiências foi apresentada por JORDAN & IBELE (1956).

Progresso significativo foi alcançado no desenvolvimento de tecnologias heliotérmicas tornando-as economicamente competitivas para a geração de eletricidade. Durante o início dos anos 80, foram construídas várias e importantes plantas pilotos que operam satisfatoriamente, estabelecendo-se assim a viabilidade da tecnologia (HOLL & BARRON, 1989). Hoje mais de 354 megawatts de eletricidade são gerados através de plantas heliotérmicas comerciais nos Estados Unidos e a experiência ganha destas plantas, além das atividades de pesquisa e desenvolvimento, ajudou a reduzir o custo dos sistemas heliotérmicos para um - quinto daquele das primeiras plantas pilotos (De LAQUIL et al., 1993).

Sem dúvida, as melhoras tecnológicas futuras reduzirão os custos mais ainda, além de contribuir para melhorar os níveis de desempenho. Estes avanços, junto com reduções de custo viabilizadas pela escala de produção, possibilitarão a construção de uma sucessão de plantas heliotérmicas, prometendo tornar o custo de geração dos sistemas heliotérmicos, competitivo em relação às plantas de combustível fóssil.

No desenvolvimento de tecnologias heliotérmicas a atenção tem se voltado para o aperfeiçoamento de vários processos, a saber: a captação da radiação solar; sua conversão para aquecer; o transporte e armazenamento do calor e sua conversão final para eletricidade. Assim, as tecnologias de heliotérmicas (cilindros parabólicos, torres centrais, e discos parabólicos) baseiam-se em quatro componentes básicos: coletor, receptor, transporte-armazenamento, e conversão de potência.

Tabela 2.1 – Redução de custos Verificados e esperados para algumas fontes Alternativas

TECNOLOGIA	CUSTO ATUAL DA ENERGIA (US\$/kWh)*	QUEDA DO CUSTO DA ENERGIA NOS ÚLTIMOS 10 ANOS (%)	REDUÇÃO ESPERADA NO CUSTO DA ENERGIA EM 10 ANOS (%)
PCH	0,02 - 0,10	constante	ligeiro aumento
BIOMASSA			
Queima de Rejeitos	0,02 - 0,14	constante, mas agora elevando-se	elevação contínua
Digestão Anaeróbica	0,02 - 0,14	5 - 10	5 - 10
Gás de Lixo Urbano	0,04 - 0,06	10 - 15	ligeiro aumento
Energia de Florestas e Cultivo de Grãos	0,05 - 0,08 (calor)	5 - 10 (calor)	10 - 15 (calor)
	0,08 - 0,15 (elétrico)	10 - 15 (elétrico)	30 - 50 (elétrico)
BIOCOMBUSTÍVEIS			
Etanol	0,24 - 0,37 (US\$/litro)	5 - 10	25 - 50
Biodiesel	0,40 - 0,52 (US\$/litro)	5 - 10	20 - 25
AQUECIMENTO SOLAR DIRETO	0,03 - 0,20	30 - 60	30 - 50
GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	0,10 - 0,25	50	25
FOTOVOLTAICA	0,50 - 1,50	40	40 - 50
GERAÇÃO EÓLICA	0,04 - 0,10	30 - 50	20 - 25

* os valores podem variar de um país para outro e de país para país

Fonte - (OECD/IEA,1997)

O coletor captura e concentra a radiação solar que é entregue então ao receptor. O receptor absorve a luz solar concentrada e transfere a energia térmica a alta temperatura para um fluido de trabalho. O sistema de transporte-armazenamento leva o fluido do receptor para o sistema de conversão de potência; em algumas plantas heliotérmicas uma parte da energia térmica é armazenada para uso posterior. O sistema de conversão de potência consiste de uma máquina térmica que aciona um gerador elétrico assegurando a conversão da energia térmica em energia elétrica, de forma semelhante à geração de eletricidade convencional a partir de combustíveis fósseis ou fontes nucleares.

As tecnologias heliotérmicas concentram radiação solar por meio de refletores ou lentes que rastreiam o sol, focalizando os raios solares sobre um receptor, onde a energia solar é absorvida como calor para em seguida ser convertida em eletricidade ou incorporada a produtos na forma de energia química, como no caso da produção do gás de síntese. Os dois sistemas heliotérmicos básicos, receptores distribuídos e receptor central empregam, respectivamente, vários pontos ou focos lineares e uma única cavidade focal onde a radiação solar direta é concentrada. As três principais tecnologias mais desenvolvidas são diferenciadas pela característica da superfície refletora na qual a radiação solar é coletada e refletida (WINTER et al., 1991) (De LAQUIL et al., 1993) (GRASSE, 1994a, 1995). Eles são o sistema de cilindro parabólico, o sistema de disco-parabólico, conhecido como receptores distribuídos e o sistema

de solar de torre conhecido como receptor central (De LAQUIL, 1993) (GRASSE, 1994a e 1994b).

As tecnologias heliotérmicas são apropriadas para uma série de aplicações, podendo ser usadas para atender o pico de demanda ou cargas intermediárias a nível das concessionárias, ou instaladas como sistemas modulares em áreas isoladas.

Sistemas Heliotermoelétricos tiveram avanços consideráveis desde 1985, voltando agora após uma redução de investimentos. Uma análise feita para o World Energy Assessment indica, para o conjunto de sistemas de concentração em estudo/desenvolvimento e aplicação comercial, os seguintes parâmetros e projeções:

A capacidade instalada cresceu 5% ao ano (1993-1998); há cerca de 400MW instalados, com fator de capacidade 20-35%; investimentos estavam entre 3 a 4 mil US\$ / kW, com custos de energia entre 0,12 a 0,18 US\$ / kWh, e a projeção para o futuro era 0,04 a 0,10 US\$ / kWh. Concentradores cilindro-parabólicos foram talvez os mais estudados experimentalmente, e há várias instalações no mundo. Há duas instalações em projeto na Espanha, com avanços técnicos, para operar nos próximos anos.

Também há novos projetos de torre central (faixa de 10-15 MW) e de parabólicos, estes em torno de 25 kW, na maioria com motores a ciclo Stirling.

2.2 - ENERGIA SOLAR TERMELÉTRICA NO BRASIL

No Brasil não houve instalações experimentais, mas destaca-se um estudo conduzido pelo CEPTEL – Eletrobrás (Gera-hélio) analisando condições locais, radiação direta e tecnologias, buscando obter custos de geração no Brasil.

Resultados indicam investimentos atuais de 2,6 US\$ / W (cilindro-parabólicos); 4,5 US\$ / W (torre central) e 12 US\$ / W (parabólico). Nestes estudos, o câmbio era de 1 US\$ = 2,7 R\$. Possibilidades de reduções de custos foram vistas.

Estes valores correspondem a custos de energia muito acima dos valores comerciais hoje. No entanto é recomendável manter os estudos nas tecnologias, principalmente quanto aos sistemas novos em início de operação na Europa e EUA.

Pontos onde a P&D se faz necessária são os mesmos que no exterior:

- Materiais (óticos; fluidos de trabalho).
- Sistemas de rastreamento
- Sistemas de armazenagem térmica
- Complementação dos dados solarimétricos para as regiões de maior interesse: radiação direta, e suas séries temporais.

A geração heliotérmica de eletricidade apresenta-se como uma excelente opção para o setor elétrico brasileiro, predominantemente hidráulico, pois a medida que os recursos hídricos decrescem nos períodos de seca, aumenta o potencial solar devido a menor interferência de nuvens e radiação solar mais intensa. A combinação solar/hidro possibilita um planejamento equilibrado para

minimizar influências devido às variações no clima. A região Nordeste brasileira apresenta as melhores condições climáticas para a instalação de plantas heliotérmicas. Apresenta-se neste trabalho a análise das três tecnologias heliotérmicas mais desenvolvidas, a saber: cilindro parabólico, torre central e disco parabólico. Estima-se que a demanda de eletricidade para atender as metas de irrigação do semi-árido nordestino seja da ordem de 4.500 a 7.500 MW, em função do tipo de tecnologia de irrigação usada e da distância à fonte.

O "Plano Nacional de Energia Elétrica 1993/2015 - PLANO 2015" (ELETROBRÁS, 1994, 1995, 1999) analisou as alternativas por ampliar o sistema elétrico brasileiro nas próximas décadas, considerando o fornecimento e demanda de energia em diferentes cenários de crescimento. Várias alternativas para o uso do potencial hidroelétrico brasileiro conduziram o setor elétrico a considerar a necessidade de: (i) preparar um plano para a geração termoelétrica a carvão e gás natural; (ii) estudar e avaliar projetos de plantas pré-comerciais para geração de eletricidade usando fontes alternativas, tendo em vista, que este tipo de geração é ambientalmente compatível.

O Brasil é um país com elevado potencial para a implementação de plantas heliotérmicas, por causa das grandes áreas com disponibilidade de radiação solar e a proximidade do equador. Energia solar em quantidade suficiente para uso em grande escala comercial é predominantemente disponível na área de semi-árido, localizada principalmente na Região Nordeste brasileira. Esta área apresenta as melhores condições climatológicas para a instalação de plantas térmicas solares, como: baixa nebulosidade, precipitação reduzida, baixa umidade, alta insolação, e o mais alto nível de radiação solar direta disponível no Brasil. Na região Nordeste, principalmente na bacia do rio São Francisco, há aproximadamente 30,8 milhões de hectares de terra irrigáveis distribuídas em dezessete áreas prioritárias, mas por causa de algumas restrições como distância à fonte ou altura de bombeamento, este valor é reduzido a 8,1 milhões. Infelizmente, não existe água suficiente para irrigar esta área. Além disso, considerando o uso múltiplo da água nesta região, apenas 1,5 milhões de hectares do semi-árido podem ser irrigados no futuro (CODEVASF, 1991). Assim, a demanda potencial de eletricidade associada com a irrigação é estimada como sendo da ordem de 4,500 a 7,500 MW, em função da tecnologia de irrigação utilizada e da distância a fonte.

O potencial hidrelétrico da região Nordeste é da ordem de 26,700 MW; dos quais mais de 13,350 MW já são explorados em plantas hidrelétricas ao longo do rio São Francisco (Três Marias, Sobradinho, Paulo Afonso, Moxotó, Xingó e Itaparica).

A limitação do uso da hidreletricidade e a demanda potencial de energia elétrica para irrigar o semi-árido na região Nordeste apóiam a idéia de associar a geração heliotérmica a projetos de irrigação. Esta associação criará maior disponibilidade de energia nesta região. Esta energia conduzirá a vários benefícios, tais como: crescimento local e desenvolvimento; implementação de benefícios sociais locais; oferta de empregos novos no campo, evitando o êxodo rural; mais água poderá ser direcionada para a irrigação ao invés da geração; a hidreletricidade não usada para irrigação estará disponível para outras aplicações; além de outros.

2.2.1 - Opções de Fontes de Energia Renováveis para a Irrigação

O custo da eletricidade obtida a partir do aproveitamento de energia renovável varia e depende da tecnologia usada. Além disso, o custo desta energia depende, também, das características de outros equipamentos do sistema e da variação na demanda de eletricidade, a qual é influenciada pelo clima, hora do dia e mês do ano. A determinação do custo de energia não é simples para a geração intermitente: eólica, fotovoltaica, e heliotérmica. A flutuação na produção de eletricidade intermitente gera novos problemas para o gerenciamento de sistemas produtores. Sistemas de armazenamento de eletricidade podem reduzir o custo para atender flutuações na demanda ou na fonte. A escolha da tecnologia é principalmente determinada pelas características do local como: localização geográfica do sítio, demanda de carga elétrica, além de outros. Tipicamente o custo da energia a partir de fontes renováveis caiu à metade na última década e espera-se que caia a metade durante os próximos dez anos.

A geração eólica apresenta o mais baixo custo de energia, mas como os projetos de irrigação na região Nordeste do Brasil serão desenvolvidos principalmente na bacia do rio São Francisco, onde o potencial da energia eólica não é tão atraente para explorar em comparação com a radiação solar direta disponível. As exigências de carga para irrigação durante aproximadamente dezoito horas por dia requerem armazenamento de energia, que poderá ser feito na forma de calor, gás de síntese ou água. Considerando a escala desejada de demanda de 1MW a 30 MW para cada planta, a geração heliotérmica apresenta-se como a melhor solução de armazenamento e menor custo de energia quando comparados à geração fotovoltaica. Assim, por causa destas razões a geração heliotérmica é a escolha adequada para esta região e aplicação.

As figuras a seguir correspondem às imagens das irradiações médias anuais para o período e os respectivos níveis de variabilidade mensais, calculados de forma análoga às variabilidades diárias no mês.

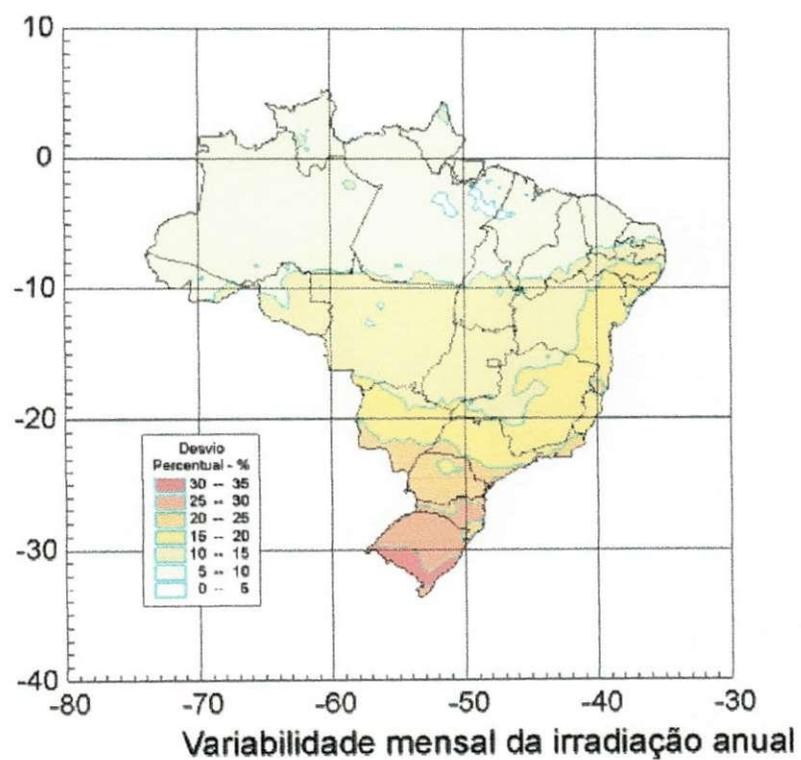
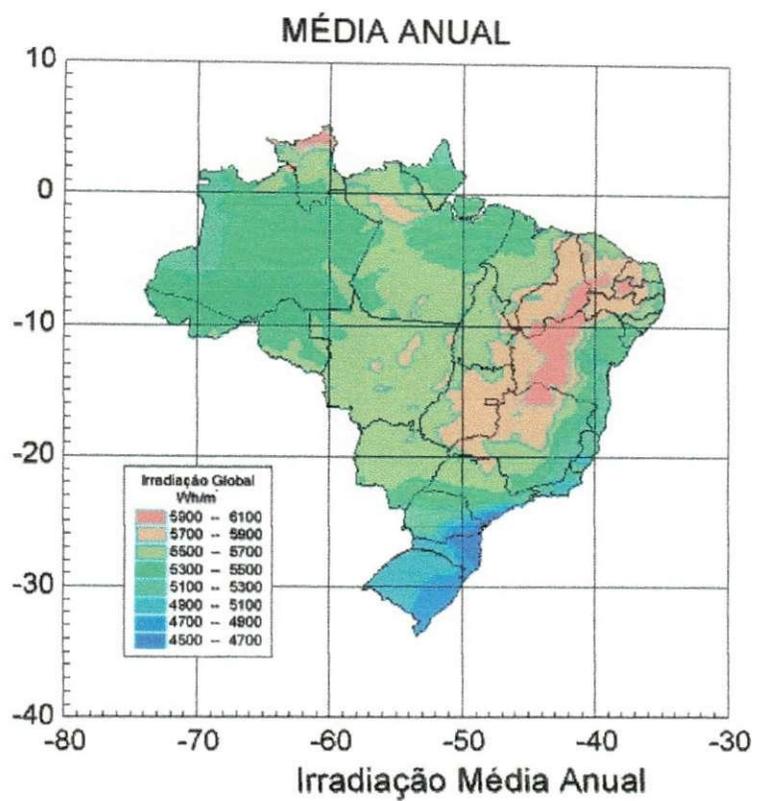


Figura 2.1 – Irradiação e variabilidade da irradiação no Brasil
 Fonte - INMET

Atualmente estão sendo desenvolvidas várias formas alternativas de energia para gerar eletricidade, o Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas – PROINFA vem sendo o principal incentivador para este desenvolvimento, a tecnologia da energia solar térmica aparece com significativa importância.

Na questão de fontes de energia renováveis as radiações solares são as maiores fontes de energia renovável da Terra e sua distribuição é mais uniforme do que a de outros recursos, como a biomassa ou mesmo os ventos, tendo, portanto, maiores possibilidades de aproveitamento. Outra característica de suma importância para o aspecto econômico é o fato de que esta fonte minimiza os custos operacionais, na medida em que os dispêndios no item “combustível” não existem. A experiência tem mostrado que sistemas bem geridos também podem reduzir outros custos de manutenção ao mínimo.

Esta tecnologia é ainda pouco estudada no Brasil, vemos assim que o presente estudo sobre este assunto é de grande importância para uma instalação futura destes sistemas em regiões brasileiras, é ainda importante também pelo fato de servir como referência para outras instituições, considerando o caráter pioneiro da tecnologia no país.

2.3 - TECNOLOGIA SOLAR NO BRASIL NOS PRÓXIMOS 20 ANOS

São analisadas as perspectivas de utilização e desenvolvimento das tecnologias heliotérmica e fotovoltaica. Em relação às primeiras, são considerados o mercado solar térmico e suas perspectivas de expansão que permite prever, ao longo das próximas duas décadas, a substituição de uma significativa fração da demanda de energia elétrica residencial (25 a 30%) nas regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste. Sistemas para produção de energia elétrica a partir de energia solar térmica podem fazer uma contribuição importante na produção de energia destinada à agricultura irrigada na região Nordeste. Estima-se que a instalação de centrais heliotérmicas, totalizando 500 MW de potência, poderá atender a demanda de energia de 50 % da superfície irrigável da região, assim como abastecer de energia a empreendimentos similares em outras partes do país. No que diz respeito à tecnologia fotovoltaica, considera-se basicamente o potencial do mercado rural na demanda de sistemas de eletrificação para escolas, postos de saúde, comunidades e abastecimento de água, destinado a abastecer parte de um universo de 17 milhões de habitantes e 4 milhões de domicílios sem energia elétrica. Um programa de caráter público, o PRODEM, impulsiona as ações neste campo.

Admitindo uma taxa de crescimento de 20 % e investimentos da ordem de 1,2 bilhões de dólares ao longo das próximas décadas, poderiam ser beneficiadas 10.000.000 de pessoas com uma potência total instalada de 115 MW. A redução do preço dos módulos fotovoltaicos poderá consolidar e ampliar as atividades que estão sendo desenvolvidas no presente.

Fazer previsões sobre o desenvolvimento da Tecnologia Solar no Brasil, para os próximos 20 anos, não é tarefa fácil. A Tecnologia Solar tem uma presença bastante forte no país o que permite, a partir da realidade atual, imaginar qual poderá ser o curso dos acontecimentos nas 2 próximas décadas. Claro que isso limitaria nosso trabalho a uma extrapolação mais ou menos cuidadosa do presente, sem incorporar as novidades que poderiam surgir nesse período. Afortunadamente, existem tecnologias que apesar de não serem exploradas ainda no Brasil, são fortes candidatas a ocupar um espaço mensurável na estrutura energética brasileira. Mas isso não basta, é importante também, por motivos que passo a explicar, fazer referência ao inesperado.

A Tecnologia Solar não é uma tecnologia única e sim um painel de tecnologias. Lida com fenômenos térmicos, elétricos, químicos e outros. Contudo, o que tem se desenvolvido e atingido um certo grau de maturidade são as tecnologias que se ocupam da conversão da energia solar em energia térmica e em energia elétrica, e a essas tecnologias nos referiremos.

2.4 - CONVERSÃO HELIOTÉRMICA

2.4.1 - Coletores solares térmicos

O equipamento mais popular da tecnologia solar é o coletor solar plano que converte energia solar em energia térmica. O sistema fornece água quente a temperaturas variáveis entre 40 e 60°C, atendendo basicamente demandas de uso residencial, em cozinhas e banheiros. Na maior parte dos casos, no Brasil, o sistema solar térmico é utilizado para substituir o chuveiro elétrico, aplicação que possui grande importância, já que em lugar do consumo inadequado de energia elétrica, emprega-se energia térmica, gerada a uma temperatura bem próxima à temperatura de utilização. O mercado desse equipamento no Brasil é considerável, como os seguintes dados mostram. A título comparativo citamos as vendas, em metros quadrados, no ano de 1999 e as vendas acumuladas desde 1975 na Alemanha, país da Europa que mais utiliza esses sistemas, assim como o total das vendas européias e as respectivas vendas acumuladas.

Vendas de coletores solares planos, em m², no ano de 1999, e vendas acumuladas no Brasil, Alemanha e Europa:

Tabela 2.2 – Vendas de coletores solares planos, em m², no ano de 1999, e vendas acumuladas no Brasil, Alemanha e Europa

País ou região	Ano 1999 (m ²)	Vendas acumuladas (m ²)	Número de empresas
Brasil	240.000	Desde 1983 2.037.000	100
Alemanha	366.000	Desde 1975 2.070.000	
Europa	814.700	Desde 1975 8.488.200	

Fonte - (OECD/IEA,1997)

Uma simples extrapolação a partir da taxa de crescimento (10,2%) dos últimos cinco anos permite fazer uma projeção do número de metros quadrados instalados no Brasil nas próximas décadas. Cabe mencionar que fatores inesperados, podem modificar substancialmente qualquer previsão, neste caso para melhor.

Para dimensionar a contribuição energética dos coletores solares nas próximas décadas, temos estimado também o consumo de energia elétrica residencial destinada ao aquecimento de água nas regiões do país onde se utilizam coletores, ou seja, sudeste, sul e centro oeste. O número de metros quadrados necessários para produzir essa quantidade de energia elétrica foi denominado superfície equivalente de coletores solares e comparado com a contribuição destes em cada região.

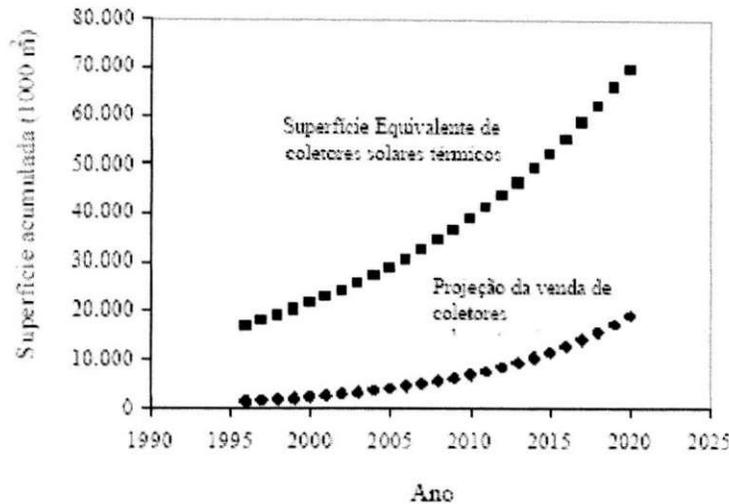


Figura 2.2 - Superfície equivalente de coletores solares planos e projeção temporal da superfície de coletores a serem instalados. Regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil.
 FONTE - (OECD/IEA,1997)

Verifica-se que no período 2001-2002 os coletores solares já representam 10 % do consumo residencial de energia térmica nas regiões mencionadas. Uma taxa de crescimento de 20 % no setor solar implicaria que no ano 2010 a energia solar térmica e a energia elétrica estariam contribuindo com frações iguais.

Dificuldades no abastecimento de energia elétrica poderão acelerar substancialmente este, processo, tal como se verificou no ano 2001 (previsão de vendas, 600.000 m²). Cabe salientar que a indústria de coletores tem condições de responder e tem respondido satisfatoriamente ao aumento da demanda. Podemos acrescentar ainda que o mercado do Nordeste do Brasil, a pesar de incipiente, apresenta tendência de crescimento, podendo chegar a fazer uma contribuição importante no futuro.

2.4.2 - Conversão heliotermoelétrica

A tecnologia de coletores solares térmicos abre e encerra o capítulo do que existe no Brasil em termos de conversão de energia solar em energia térmica. A situação não é muito diferente em países mais desenvolvidos. A única e notável exceção é o sistema que utiliza concentradores de foco linear (Luz Solar Electricity Generating System - SEGS) instalado no deserto de Mojave, na Califórnia (Figura a seguir). Com uma potência total de 354 MW, produz o 90 % da energia elétrica gerada no mundo por esses meios.

Tecnologias que produzem energia térmica a diferentes temperaturas estão comercialmente disponíveis, embora com mercados ainda incipientes. O que se observa é que o mercado solar se amplia hoje, no mundo, a partir das tecnologias mais simples e seguras, coletores solares planos, armazenamento sazonal no solo, por exemplo. Entretanto, a conversão heliotermoelétrica utilizando concentradores cilindro parabólicos tem um excelente potencial técnico-

econômico, com boas possibilidades para sua adoção no Brasil. No presente, o custo da energia elétrica produzida por esses meios encontra-se na faixa dos 12 a 20 centavos de dólar/kWh e custos na faixa dos 5 a 10 centavos de dólar/kWh são possíveis no futuro. Adicionalmente, a utilização combinada da energia solar e outras fontes, biomassa ou gás por exemplo, pode ser um passo intermediário interessante para viabilizar mais rapidamente esses sistemas.

Vários estudos foram realizados nos anos 90, no Brasil, por concessionárias de energia elétrica, visando a instalação de sistemas tipo SEGS e podemos afirmar que essa tecnologia é forte candidata para ser experimentada no país.



Figura 2.3 – campos de coletores concentradores de 8MW cada um, localizados no Deserto de Mojave, Califórnia, operacionais desde 1989
Fonte: DLR-PSA

Do ponto de vista do recurso solar, o Brasil reúne as condições necessárias para a implantação desses sistemas, ou seja regiões com elevado nível da componente direta da radiação, fator essencial para definir a viabilidade técnica desses sistemas. As razões que antecedem somadas à experiência internacional

existente com sistemas de grande porte (350 MW), a rigor trata-se de uma tecnologia bem antiga, nos leva a pensar na possibilidade e conveniência de planejar nosso futuro solar incluindo essa tecnologia.

Na região Nordeste, a instalação destas centrais poderia contribuir a reforçar a produção de energia elétrica, proveniente na atualidade das centrais instaladas ao longo do Rio São Francisco e cujo potencial se encontra já plenamente aproveitado (10.271 MW). Abastecimento de energia para agricultura irrigada, ao longo do Vale do Rio São Francisco, onde existem diversos programas de desenvolvimento, públicos e privados, seria uma aplicação sumamente interessante dessa tecnologia.

É importante destacar que, precisamente nessa região, se registram os maiores índices de insolação do Brasil. Por último, cabe mencionar que a implantação dessas centrais ajudaria a resolver um futuro conflito entre o uso da água e a produção de energia na região.

Em termos de previsão de potência instalada nos próximos 20 anos e admitindo a existência de um programa solar, sem o qual nada que não seja o coletor solar plano será viável, pode se pensar na possibilidade de contar com sistemas aptos para atender a demanda de energia de 50 % das terras irrigáveis na região Nordeste, ou seja 750.000 ha. Para tal, seria necessária uma potência instalada de aproximadamente 300 MW. Admitindo empreendimentos similares em outras partes do país podemos estimar a existência de uma demanda potencial de 500 MW de potência pico, para ser implementada nas próximas décadas. É importante frisar que parte do processo de conversão é realizado com equipamentos e tecnologias utilizadas nas centrais térmicas convencionais que, no presente, estão sendo incorporadas ao parque gerador do Brasil. Esta proposta inclui a possibilidade, como mencionado anteriormente, de instalar sistemas híbridos que usem energia solar e combustíveis derivados da biomassa, por exemplo.

2.4.3 - Conversão Fotovoltaica

Na atualidade, a potência instalada de sistemas fotovoltaicos encontra-se em rápido crescimento na Europa, Japão e Estados Unidos, basicamente devido à expansão das instalações residenciais interligadas na rede. Com custos de sistemas na faixa de 6 a US\$12/W, a energia gerada ao longo da vida útil se encontra entre 25 a 100 centavos de dólar/kWh. Tudo indica que no futuro a tecnologia fotovoltaica vai trilhar um caminho já traçado, melhorar a eficiência das células de silício mono ou policristalino e reduzir preços via aumento da eficiência e fator de escala. Novos materiais estão entrando no mercado, mas ainda deverão provar sua capacidade para ocupar uma fatia significativa do mesmo. Cabe salientar que, ao longo dos últimos anos, os preços tem se mantido no mesmo patamar e continuam sendo um dos fatores que mais limitam uma difusão mais rápida dessa tecnologia.

As principais aplicações da tecnologia fotovoltaica no Brasil são relativas às telecomunicações, à eletrificação rural e ao bombeamento de água. As telecomunicações, em particular as estações repetidoras de microondas,

constituem a aplicação mais antiga da tecnologia fotovoltaica no país. Na sua imensa maioria, as instalações tem estado a cargo de organismos públicos.

Diferentemente do que ocorre com a tecnologia solar térmica, os equipamentos fotovoltaicos, módulos e componentes eletro-eletrônicos, são na sua imensa maioria importados. Existe um fabricante nacional que cobre uma pequena fatia do mercado.

Desde 1995 está em vigência no Brasil um programa de grande porte de caráter público, PRODEM (Programa de Desenvolvimento de Estados e Municípios, MME). O Programa, destinado a melhorar as condições de vida da população rural, tem instalado e está instalando milhares de equipamentos de eletrificação rural, incluindo sistemas de bombeamento. Dada sua importância, descreveremos algumas de suas características e perspectivas de crescimento.

Como resultado de um alto grau de urbanização do país, o Brasil possui um elevado índice de eletrificação global (em torno de 90 % de seus habitantes tem acesso à energia elétrica). A pesar disso, nas regiões rurais a situação é muito menos favorável, como pode ser visto na tabela a seguir (Informativo do PRODEM, maio de 1995 e Anuário Estatístico do Brasil – IBGE, 1997).

Tabela 2.3 - Propriedades, população e eletrificação rural no Brasil (1991)

Propriedades rurais	Habitantes	Propriedades rurais não eletrificadas	Habitantes sem eletricidade	Fração de propriedades rurais não eletrificadas (%)	Fração de habitantes sem eletricidade (%)
5.934.779	35.834.485	4.231.532	16.851.526	72,5	47,0

Fonte – PRODEM

Os projetos promovidos pelo PRODEM têm utilizado essencialmente sistemas fotovoltaicos. O programa foi dividido em fases, a primeira delas implementada em 1995. Foram instalados 383 sistemas para bombeamento de água, iluminação pública, eletrificação de centros comunitários, escolas, centros de saúde e igrejas, beneficiando cerca de 50.000 pessoas em 117 comunidades rurais e 18 estados do Brasil, com um custo de R\$ 1,5 milhões da época. A segunda fase foi iniciada em 1996, durante a qual foram instalados 808 sistemas. O processo de implantação, salvo pequenas variações, foi similar ao da primeira fase. Na terceira fase foram instalados 853 sistemas. Como pode ser apreciado, durante as três primeiras fases do programa, foram instalados 2044 equipamentos totalizando uma potência de 1,17 MW pico. A IV Fase em vias de implementação, prevê a instalação de 1240 sistemas de bombeamento e 470 sistemas de eletrificação rural. Recentemente foram licitados 1500 sistemas de eletrificação

que, somados aos da IV Fase, totalizam equipamentos com uma potência da ordem de 2 MW.

A potência média anual instalada ao longo das diversas fases do Programa pode ser estimada em torno dos 500 kW e a potência acumulada em 3 MW. Admitindo um crescimento anual de 10 % no número de sistemas instalados durante os próximos 20 anos, arribamos a uma potência total de 34 MW, atendendo, em conjunto, 60.000 escolas, postos de saúde, comunidades e sistemas de abastecimento de água, com investimentos da ordem de 340 milhões de dólares. Uma taxa de crescimento de 20 % permitiria atender 200.000 sistemas com 115 MW de potência instalada, exigindo em cambio investimentos da ordem de 1,15 bilhões de dólares. A redução do preço dos módulos fotovoltaicos poderá ajudar a consolidar e ampliar as ações que estão sendo desenvolvidas no presente.

Pela importância social que possui é previsível que o PRODEM, na sua forma atual ou modificada, haverá de continuar nas próximas décadas. Entretanto, enormes desafios deverão ser enfrentados, especialmente no que se refere a assistência técnica e manutenção dos equipamentos, de forma que possibilitem um serviço permanente e de boa qualidade. Os mecanismos tendentes a tornar as instalações mais seguras e operacionalmente mais confiáveis estão sendo aperfeiçoados e possivelmente, as condições de sustentabilidade dos sistemas instalados, serão melhoradas.

2.5 - USINA HELIOTÉRMICA

Nas usinas heliotérmicas, não se utiliza o efeito fotovoltaico para converter a radiação emanada do Sol em eletricidade. Neste caso, o fator central é o calor, e a usina opera coletando, transportando, armazenando e convertendo calor em eletricidade.

Existem três tecnologias principais para essa tarefa: cilindro parabólico, torre central e disco parabólico. Várias plantas-piloto de usinas heliotérmicas foram construídas nos anos 1980, que permitiram o avanço das tecnologias e a redução do custo da energia produzida a 1/5 do custo inicial. Hoje, 350 MW são produzidos nos Estados Unidos por plantas heliotérmicas comerciais. Além dos EUA, Espanha, Israel e Austrália também estão avançados nesses projetos.

Como a exploração da energia solar com a tecnologia heliotérmica exige alta incidência de irradiação solar e baixos índices pluviométricos (ausência de nuvens), no Brasil o potencial existente se restringe ao semi-árido, ou seja, à região Nordeste, apenas 10% do território nacional. Ainda assim, poderia beneficiar uma população de cerca de 20 milhões de pessoas. A pesquisa sobre essa modalidade energética ainda é incipiente no país, tendo sido objeto por ora apenas de um estudo preliminar do CEPEL/ELETROBRÁS, para avaliação de mercado e identificação de sítios adequados no Nordeste. Desse estudo originou-se o projeto Gerahélio, que conta com financiamento do Banco Mundial (GEF) para lançar as bases da primeira usina do gênero no país.

Modelos matemáticos indicam que a região recebe cerca de 2,1 MW/m², valor próximo ao observado na Espanha.

A grande desvantagem da energia heliotérmica está no custo, que supera os US\$ 1.000/MWh. Para que se tornasse competitiva pelo menos diante dos geradores a diesel nas áreas remotas e distantes da rede de distribuição, precisaria ter seu custo de produção reduzido à faixa de US\$ 150/MWh. Não se descarta que a pesquisa possa um dia alcançar tal objetivo, razão pela qual existe a proposta de que o Brasil não se mantenha à margem desse desenvolvimento e destine ao menos uma parte dos recursos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) previstos na Lei No. 9.991 para a construção de uma planta de pesquisa.

2.5.1 - Concentração de radiação solar

A concentração de luz solar para aplicações de larga escala é geralmente feita com um concentrador de reflexão os sistemas de lentes não podem ser usados devido ao elevado preço e limitações de tamanho.

Um concentrador de reflexão em forma parabólica centraliza a radiação solar, tanto numa linha focal como também num ponto focal. Para concentrar a luz solar o concentrador necessita seguir a trajetória solar, de modo a que os raios incidentes sejam sempre perpendiculares à área de abertura.

Em princípio, os sistemas de acompanhamento da trajetória da luz solar estão divididos em sistemas com um único eixo e sistemas com dois eixos. Sistemas com um eixo concentram a luz solar sobre um tubo absorvedor numa linha focal do centralizador, enquanto que com um sistema de dois eixos foca-se a luz num ponto focal de um absorvedor com forma arredondada.

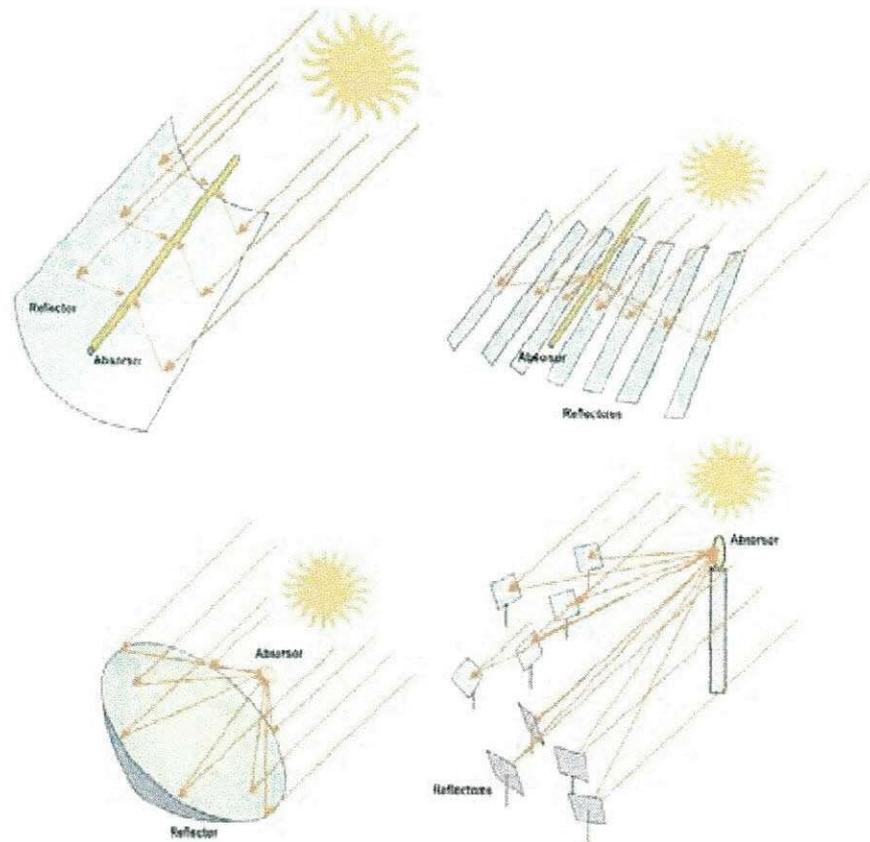


Figura 2.4 - Varias opções de concentração de radiação solar (em cima: refletores com um eixo de acompanhamento, em baixo: refletores com dois eixos de acompanhamento)
 Fonte: DLR-PSA

O valor teórico de concentração mais elevado é 46.211; é limitado pelo fato do Sol não ser uma fonte de radiação pontual. Através da concentração de radiação solar pode ser atingida uma temperatura máxima de 5.500°C – que corresponde a um valor próximo da temperatura da superfície do Sol. Contudo, na prática, este valor nunca é atingido e na maioria dos casos não é necessário atingi-lo. Com o aumento da taxa de concentração a temperatura que teoricamente pode ser atingida também aumenta. Na prática a temperatura que se opera, geralmente não apresenta valores de temperatura iguais aos teóricos. As principais razões para este fato são: não é possível produzir uma instalação ideal e absoluta; o calor é transportado, o que reduz a temperatura de um modo contínuo.

Contudo, nos casos em que há uma interrupção de remoção de calor, a temperatura aumenta drasticamente.

Tabela 2.4 – Concentradores Térmicos, concentração, temperatura de operação e teórica

Tipo / sistema de coletor	Razão de concentração	Temperatura de operação	Temperatura limite teórica
Concentrador Parabólico Cilíndrico "LS-3 e Euro-Frog"	82	Cerca de 400 °C	810 °C
Torre de concentração com receptor "REFOS-pressurizado"	Cerca de 500	Cerca de 1.100 °C	1.500 °C
Concentrador parabólico "Lundish Sistema Dish/String"	2.500	650 °C	2.510 °C

Fonte - DLR-PSA

2.5.2 - Sistemas de concentração para processos térmicos

A geração de energia e os custos de eficiência para níveis de temperatura acima dos 150°C, só é possível com sistemas solares que utilizam coletores concentradores, ao contrário de sistemas sem concentração ou coletores com baixas taxas de concentração (p.e. coletores CPC). Geralmente a exigência dos processos de calor é elevada em gamas de temperatura entre 80 a 250°C e entre 900 a 1.500°C. De particular interesse, são o mercado dos segmentos de processos de baixas temperaturas, de 80 a 250 °C. A indústria química, as indústrias têxteis, alimentares e a indústria de papel assim como a indústria de processos alimentares consomem grande parte deste calor. As áreas de aplicação são numerosas e incluem processos muito diferentes como o aquecimento de banhos (p.e. banhos de galvanização ou de limpeza), os processos de secagem, processos químicos (processos de separação térmica), os processos de fusão ou ebulição, mas também a geração de processos de baixa temperatura, evaporação e fornecimento de calor ao sistema de condução dos sistemas de refrigeração.

Relativamente aos aspectos econômicos, os processos de fornecimento de calor, em particular para os concentradores parabólicos cilíndricos são muito interessantes.

Coletores parabólicos concentram a radiação solar linear, através de um refletor com curva parabólica sobre um tubo absorvedor revestido de negro. Geralmente a abertura a atravessar nestes coletores varia entre 2 a 4 metros. O tubo absorvedor recolhe a radiação solar, converte esta radiação em calor e transfere o calor ao fluido de transferência térmica. Geralmente o fluido utilizado é composto por água (água quente ou vapor), mas também se utiliza ar e óleos térmicos.

Ao contrário dos coletores planos estes sistemas têm uma menor perda de calor. Esta menor perda de calor é, sobretudo devida ao fato da área de superfície do absorvedor ser pequena comparada com a área de abertura e também por causa do revestimento especial do tubo absorvedor, que reduz a emitância de radiação infravermelha e logo as perdas por radiação. Para encontrar a melhor eficiência do coletor, devem atingir-se mais elevadas temperaturas de operação, e o espaço entre o vidro e o tubo absorvedor deve ser evacuado.

Um dispositivo de acompanhamento da trajetória solar – geralmente um motor e um dispositivo de transmissão – permite ao concentrador parabólico cilíndrico acompanhar o Sol num único eixo. A maioria destes concentradores é

instalada com uma orientação Norte-Sul. Esta orientação permite uma produção de energia anual mais elevada, comparada com a orientação Leste-Oeste. Contudo, com a orientação Leste-Oeste a produção de energia está mais distribuída ao longo do ano. No caso de dois eixos, os requisitos necessários para a construção: controle e manutenção são maiores e logo mais caros, portanto os concentradores com um único eixo demonstram por si só, ser mais confiáveis e mais eficientes.

Desenvolvimentos na tecnologia de concentradores parabólicos cilíndricos apontam para o aperfeiçoamento da eficiência óptica e ao mesmo tempo para o uso de menos material.

Outra diferença significativa entre os sistemas de coletores concentradores e os sistemas solares térmicos convencionais, tais como coletores planos, é verificada nos conceitos operacionais e de segurança.

No sentido de reduzir o aumento da temperatura devido à estagnação, os coletores concentradores utilizam as respectivas rotinas de controle de segurança, que desfocam o coletor para prevenir temperaturas de estagnação excessivas.

Alguns coletores de tubos de vácuo integram CPC's dentro da proteção de vidro no sentido de aumentar a abertura. São também utilizadas faixas de absorção planas para este propósito.



Figura 2.5 - Estrutura esquemática de um coletor CPC
Fonte: Consolar

A figura 2.5 mostra a eficiência de vários tipos de coletores, através da produção anual de energia por metro quadrado de área do coletor versus a temperatura média. O rendimento da energia para coletores não-concentradores diminui significativamente, com o aumento da temperatura, a partir de uma temperatura máxima do 100°C, a diminuição é consideravelmente menor para tubos coletores de vácuo com CPC's e coletores parabólicos cilíndricos.

Geralmente os coletores e tubos coletores de vácuo utilizam a radiação solar total (i.e. a irradiação direta e a irradiação difusa no céu) em contraste com os sistemas solares de concentração, que usam apenas a irradiação direta. A produção de energia ilustrada na figura foi calculada para coletores com orientação para o Sul e com um ângulo da inclinação de 40° situado na cidade de Würzburg, Alemanha.

A produção de energia de um sistema coletor não depende apenas do dimensionamento do coletor, mas também da quantidade de irradiação direta.

Würzburg recebe uma média anual de cerca de 1.066 kWh/m² de irradiação. Comparando os concentradores parabólicos cilíndricos de construção simples com os coletores solares térmicos convencionais conclui-se que mesmo no clima da Europa Central, os concentradores têm muitas vantagens, em particular quando é necessário ter uma temperatura de operação elevada.

O sistema de integração de coletores concentradores para fornecer calor não difere muito dos sistemas convencionais para fornecimento de calor. A peça central do sistema é o campo de coletores, ou seja, o arranjo dos coletores. O fluido de transferência térmica circula através deste campo de coletores. Através da medição da temperatura do fluido, na saída do coletor, um controlador regula a taxa de fluxo de calor tendo em conta a irradiação. O calor ganho é transferido para o permutador de calor onde é usado diretamente (p.e. para aquecer um banho ou pré-aquecer água de alimentação ou ar de combustão) ou então é armazenado a curto ou longo prazo no tanque de armazenamento de calor.

A integração direta de calor solar no processo é a mais simples e a que apresenta um menor custo. Esta variante apenas faz sentido se o processo for contínuo e se o calor necessário for muito elevado para ser fornecido por um sistema de energia solar. O esquema mostra um sistema indireto, onde o circuito do coletor é separado por causa da corrosão e do congelamento, para aplicação através de um permutador de calor. Por motivos econômicos o dimensionamento do campo coletor deve assegurar que a energia solar máxima produzida não exceda as necessidades de calor, em qualquer momento.

Os processos mais comuns são os que funcionam apenas 5-6 dias por semana ou processos com interrupções frequentes. Tais situações exigem o uso de um tanque de armazenamento, que armazena qualquer excesso de calor. O calor necessário pode ser fornecido a qualquer hora.

O dimensionamento do tanque de armazenamento e do respectivo campo de coletores não depende apenas do calor necessário, do nível de temperatura e da concepção, mas também da capacidade de armazenamento e do tempo que o calor demora a ser fornecido. Geralmente distingue-se entre um curto tempo de armazenamento com uma capacidade para cobrir algumas horas de flutuações diárias e um sistema de armazenamento com capacidade para vários dias e armazenamento sazonal. O dimensionamento de um tanque de armazenamento deve ser feito de acordo com as necessidades específicas.

Ao contrário das centrais de produção de energia a partir de sistemas solares térmicos, os sistemas solares térmicos de processo devem ser instalados diretamente no lugar onde o calor é necessário no sentido de evitar perdas por transporte do calor. Para tal é necessário haver bastante espaço para o campo de coletores e valores elevados de irradiação anual no local em causa.

A título indicativo apresentam-se os custos típicos de investimento para sistemas solares térmicos de processo.

Tabela 2.5 - Custos de investimento para vários tipos de coletores:

Tipo de colector	Custos em €/m ²
Colector plano	275
Colector Parabólico Composto	300
Colector Parabólico tipo 'Trough'	315
Colector de Tubo de Vácuo plano	400
Colector de Tubo de Vácuo	440
Colector de Tubo de Vácuo com CPC	440

Fonte - DLR-PSA

Considerando os custos para o sistema total e para os componentes simples, cerca de 80% dos custos do investimento são para o campo de coletores (para o tamanho de um campo de >1.000 m²) incluindo a elevação, a estrutura de suporte e os tubos. Os restantes 20% do investimento são para os permutadores de calor, bombas, sistema de controle e planeamento. Enquanto que a integração de tanques de curto prazo não influencia os custos de investimento significativamente, o tanque de armazenamento para períodos longos são caros, atingindo cerca de 10 a 20% do total dos custos de investimento.

Os custos totais de investimento para sistemas solares térmicos para processos caloríficos estão numa gama de 250 a 1.000 €/kWt da capacidade de instalação.

Num futuro próximo será importante demonstrar a integração e a segurança dos sistemas solares térmicos, para processos em aplicações adequadas. Um obstáculo para estes sistemas é o espaço que é preciso disponibilizar, para montar o campo coletor. Os elevados custos comparados com os sistemas de calor dos processos convencionais é outra barreira. Contudo, uma redução de custos é vista na modificação da concepção dos coletores e pequenas unidades de módulos de coletores são mais apropriadas para serem levantadas num telhado de topo ou para uma integração no telhado. Um maior potencial é esperado com o aumento da mecanização das operações, logo com a redução dos custos de operação e de manutenção. Com uma produção em massa, redução dos custos de operação, manutenção e aperfeiçoamento do design do sistema. Espera-se que a eficiência dos coletores diminua os custos para metade no ano de 2010.

Hoje em dia o mercado Europeu não disponibiliza sistemas de concentração para aplicação em processos de calor. Contudo, diversos projetos Europeus apontam para o desenvolvimento de coletores comerciais para um futuro próximo. Algumas companhias de Israel e dos EUA já disponibilizam estes sistemas no mercado. Existem também alguns sistemas que estão a operar nos EUA com campos de coletores numa gama de 200 a 3.000 m².

Com a "Campaign for Take-Off" a Comissão Europeia prossegue com o objetivo de ter 2 milhões de metros quadrados de coletores instalados para processos industriais de calor e arrefecimento solar. Através desta iniciativa, é esperado economizar, em energia primária, cerca de 2 milhões de MWh/a.

Em 2001, coletores solares térmicos com uma área total de 10.000 m² foram utilizados em processos industriais de calor na Europa. No futuro, a médio e curto prazo, os coletores concentradores podem desempenhar um papel importante na divulgação de processos solares de fornecimento de calor.

CAPÍTULO 3 TECNOLOGIAS SOLARES TÉRMICAS

3.1 - SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DE CONCENTRAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE.

3.1.1 - Energia Solar Concentrada

A utilização de aproximadamente 1% da área de superfície do Saara, para projetos de centrais solares, seria suficiente para cobrir as necessidades de energia elétrica para todo o planeta. Alguns projetos de centrais solares, sem contar com as fotovoltaicas, oferecem a oportunidade de produzir eletricidade em alguns pontos da Terra a baixo custo. Estas centrais aplicam o calor na geração de eletricidade. A tecnologia de energia solar concentrada possibilita o acúmulo da energia provinda do Sol, que se apresenta naturalmente na forma dispersa. Atualmente existem três vertentes dos sistemas de Energia Solar Concentrada (CSP – Concentrating Solar Power) que aparecem com maior ênfase nas discussões, estudos e aplicações de sistemas de energia solar térmica:

- Calha Parabólica (Parabolic Trough),
- Receptor Solar Central ou Torre Solar (Tower Solar)
- Sistema de Disco Parabólico (Parabolic Dish)

3.1.2 - Produção de Eletricidade

A energia térmica solar é um dos candidatos principais para fornecer uma parte principal da energia limpa renovável necessitada no futuro por que:

- A radiação solar é o maior recurso renovável da terra. Aproximadamente 1% da área do deserto no mundo utilizada por usinas de força térmicas solares seria suficiente gerar a demanda inteira da eletricidade do mundo prevista em 2000.
- A radiação solar é distribuída mais uniformemente no cinturão solar do mundo do que o vento ou a biomassa, permitindo mais localizações.
- A geração de eletricidade através de energia térmica solar é uma das tecnologias de custos mais efetivos para energias renováveis, pois os custos de geração de energia situam-se dentro do setor de 6 a 15 cents/kWh. E a eletricidade solar é a mais barata no mundo, prometendo custos sem competitividade comparada com as energias geradas por combustíveis fósseis no futuro.
- É uma tecnologia provada e demonstrada. Mais de 100 anos de experiência acumulada operacional, com as nove usinas de energia térmica solares do tipo parabólico da calha que geram mais de 8 bilhões de kWh da eletricidade baseada na energia solar na costa da Califórnia demonstram a viabilidade do conceito.

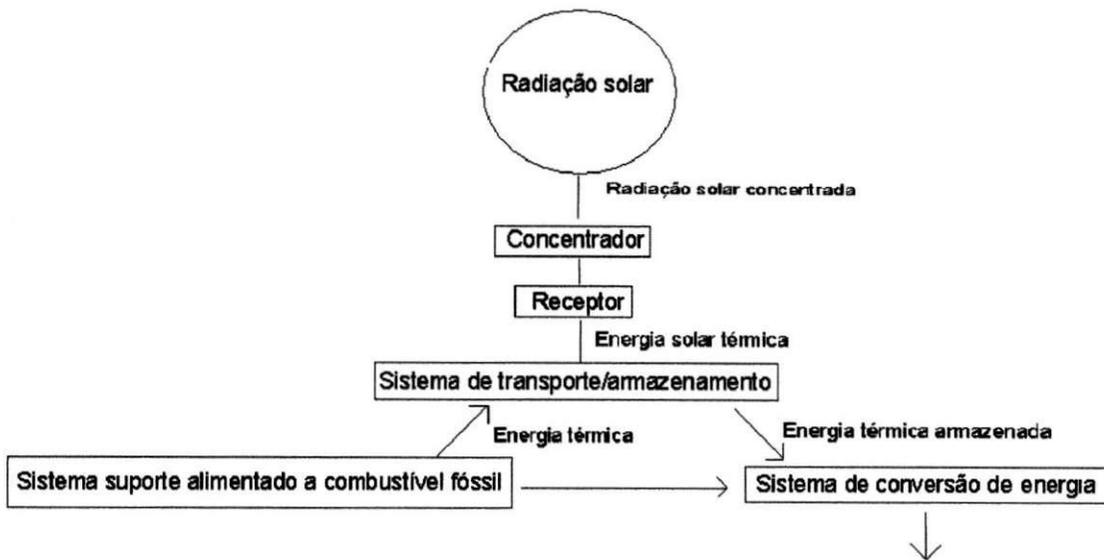


Figura 3.1 – Trajeto da conversação da radiação solar à eletricidade solar

Todas as tecnologias da energia solar concentrada (CSP) baseiam-se em quatro elementos chaves básicos: concentrador, receptor, transporte, armazenamento, e conversão da energia.

O concentrador captura e concentra a radiação solar dos concentrados, que é levada então ao receptor. O receptor absorve a luz solar concentrada, transferindo seu calor a um líquido de trabalho. O sistema de transporte/armazenamento passa o líquido do receptor ao sistema da conversão de energia; em algumas usinas solar/térmicas uma parcela da energia térmica é armazenada para um uso posterior. Como sistemas de conversão térmicos solares de energia, os tipos Rankine, Brayton, de ciclos combinados ou tipo Stirling foram testados com sucesso. Três conceitos térmicos de geração de energia solares serão analisados aqui de maneira mais detalhada

3.2 - CALHA PARABÓLICA (Parabolic Trough)

A Calha Parabólica ou a Fazenda Solar consiste em longas fileiras paralelas de módulos idênticos de concentradores, usando normalmente espelhos de vidro em forma de calha. Seguindo o sol do leste para o oeste pela rotação em um eixo, o coletor da calha concentra a radiação solar direta em uma tubulação absorvente posicionada ao longo de sua linha focal. Um produto de transferência térmica, normalmente óleo, em temperaturas até 400°C, circula através dos tubos. O óleo quente evapora a água e o vapor gerado aciona o gerador da turbina de vapor de um bloco de força convencional.

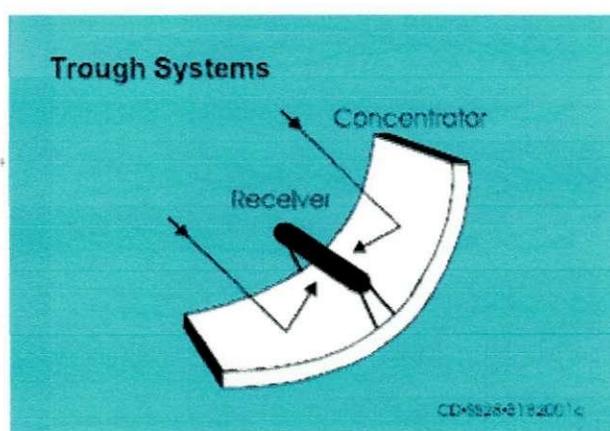


Figura 3.2 - Calha parabólica solar
Fonte - DOE

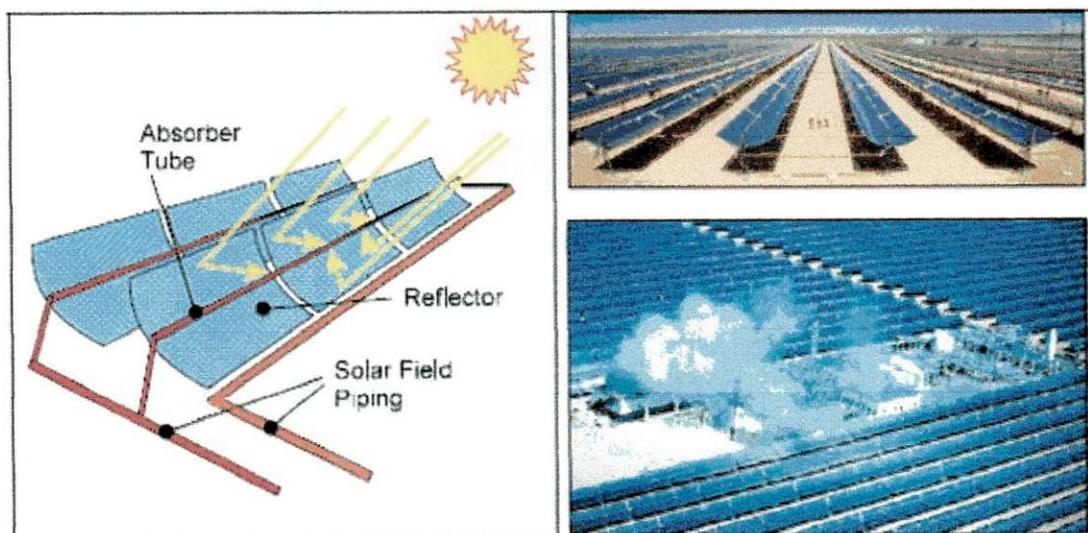


Figura 3.3 – Princípio dos sistemas parabólicos de calha e Usina Elétrica Térmica Solar de Calha Parabólica, Califórnia, EUA
Fonte - DOE

3.2.1 - Histórico

Em 1906 foram efetuados os primeiros desenvolvimentos de projetos de centrais solares nos EUA. As primeiras centrais de demonstração foram construídas e testadas com sucesso nos EUA e próximo do Cairo no Egito que naquele tempo era uma colônia inglesa.

Estes sistemas eram muito parecidos com os sistemas usados hoje em dia, contudo, problemas relacionados com materiais e dificuldades técnicas puseram fim à primeira geração de eletricidade solar em larga escala, em 1914, pouco antes da explosão da Primeira Guerra Mundial.

Em 1978 os EUA lançaram as bases para o renascimento da tecnologia solar elétrica. Os utilizadores da eletricidade pública no estado da Califórnia foram obrigados através da "Public Utilities Regulatory Policy Act" a adquirir eletricidade de produtores independentes, com uma tarifa claramente definida. Depois da multiplicação dos custos de eletricidade em apenas alguns anos, devido às crises de petróleo, a Southern California Edison (SCE) oferece condições a longo prazo para o fornecimento de eletricidade através de sistemas de energias renováveis. Em conjunto com incentivos, tais como isenção do pagamento da taxa de propriedade pelas centrais solares, o desenvolvimento de projetos de centrais solares começou a ficar atrativo a nível financeiro. Em 1979 a companhia LUZ foi fundada e concretizou, em 1983, um contrato com a SCE para fornecer eletricidade por mais de 30 anos.

O primeiro projeto de central solar comercializado com tecnologia de concentradores parabólicos cilíndricos foi construído em 1984. Desde então centrais solares com tamanhos maiores e aperfeiçoamento tecnológico apareceram nos anos subseqüentes. Nos meados dos anos 80 o preço da eletricidade reduziu outra vez e depois da extinção da taxa de isenção no fim de 1990, a LUZ faliu antes do início da construção da décima central térmica solar.

Embora a geração de eletricidade das centrais solares fosse significativamente mais barata do que os sistemas fotovoltaicos não foi construída mais nenhuma central solar desde 1991. Atualmente estão em desenvolvimento alguns projetos de centrais solares. O Banco Mundial determinou um financiamento de 200 milhões de US\$ para suportar financeiramente a construção de centrais solares, combinando solar térmico e gás térmico e natural, em países em vias de desenvolvimento tais como Egito, México, Índia ou Marrocos.

Na Espanha e noutros países do sul da Europa estão a ser preparadas medidas semelhantes para a construção de centrais solares. As centrais solares, com tecnologia de concentradores parabólicos cilíndricos foram as únicas a operar comercialmente até hoje. Depois da crise do petróleo nove centrais foram construídas entre 1984 e 1991 no deserto de Mojave na Califórnia, numa área de mais de 7 quilômetros quadrados. Foram chamadas as centrais-SEGS (Solar Electric Generation Systems).



Figura 3.4 - Central com Concentradores "Trough" na Califórnia
Fonte: KJCOC

3.2.2 - Funcionamento

Mais de um milhão de espelhos com uma abertura total de 2,3 milhões de metros quadrados focalizam a luz solar nestas centrais, com uma capacidade elétrica de 354 MW. Cada ano as centrais SEGS na Califórnia geram cerca de 800 milhões de kilowatt-hora de eletricidade, o suficiente para cobrir as necessidades de 60.000 Americanos. Oito das centrais SEGS também podem operar com combustíveis fósseis, de modo que a eletricidade possa ser fornecida durante a noite ou em períodos de mau tempo. Contudo, de acordo com a lei, a taxa de combustíveis fóssil e gás natural está limitada a 25% da entrada térmica anual.

O investimento total para as centrais SEGS é mais de 1,2 bilhões de US\$. Até hoje, estas centrais forneceram mais de 10 bilhões de kilowatt-hora de eletricidade à rede elétrica. Os custos de eletricidade podem diminuir de sistema para sistema com 27 US cents/kWh para a primeira SEGS e 12-14 US cents/kWh para as centrais que foram construídas por último.

O princípio de funcionamento das SEGS é simples de perceber. Grandes refletores, arranjados num coletor em forma cilíndrica, focam a luz do Sol numa linha focal. Diversos coletores são ligados em linha de três a seis centenas de metros. Cada coletor pode girar em torno do seu eixo longitudinal para acompanhar o Sol. A luz solar é centralizada 80 vezes mais sobre o absorvedor, que está posicionado no centro da linha focal. Uma proteção de vidro é colocada em torno do absorvedor para reduzir as perdas de calor. As perdas de radiação são minimizadas aplicando um revestimento especial sobre o absorvedor, resistente às altas temperaturas.

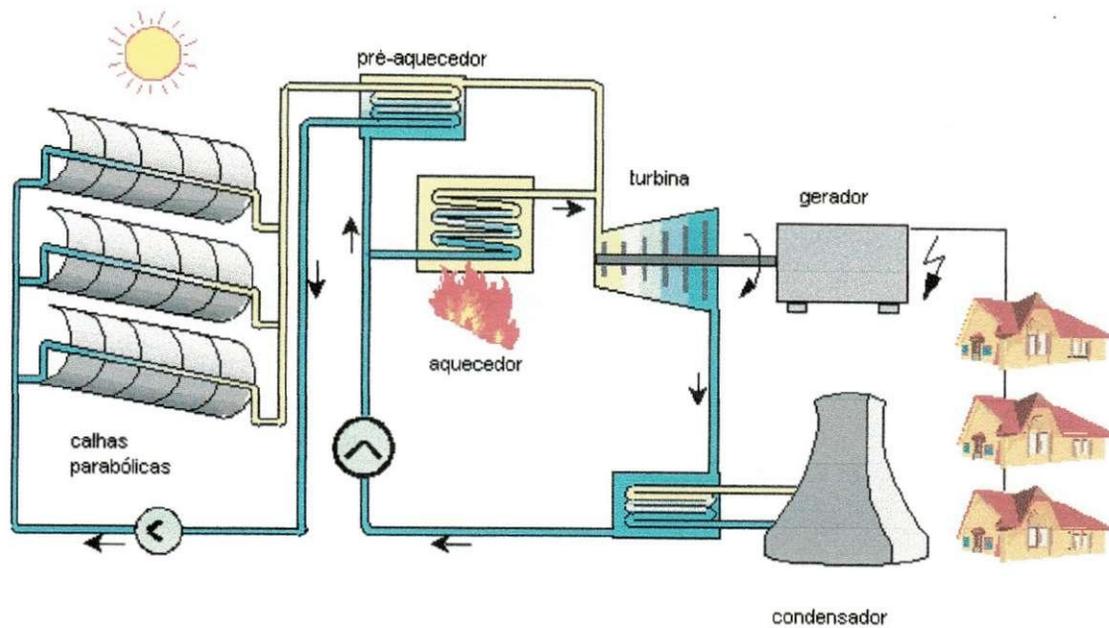


Figura 3.5 – Sistema calha parabólica Solar/ Rankine
 Fonte: Volker Quaschnig



Figura 3.6 - Colectores parabólicos "trough"
 Fonte: Volker Quaschnig

Nas centrais da Califórnia o fluido térmico utilizado é um óleo térmico específico que é aquecido a temperaturas acima dos 400°C. Um concentrador parabólico cilíndrico pode também ser projetado de acordo com o princípio de Fresnel.

Tabela 3.1 - Dados técnicos para os concentradores das centrais SEGS da Califórnia

Central	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Ano de instalação	1984	1985	1986	1986	1987	1988	1988	1989	1990
Capacidade em MW	13,8	30	30	30	30	30	30	80	80
Área utilizada em 1000 m ²	290	670	800	800	870	660	680	1.620	1.690
Abertura em 1000 m ²	83	165	233	233	251	198	194	464	484
Fluido de transferência térmica - temp. de saída em °C	307	321	349	349	349	381	381	381	381
Eficiência									
Turbina a vapor (solar)	31,5	29,4	30,6	30,6	30,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Turbina a vapor (Gás)	-	37,3	37,3	37,3	37,3	39,5	39,5	37,6	37,6
Campo solar (térmico)	35	43	43	43	43	43	43	53	50
Solar-para-Electrico (net)	9,3	10,7	10,2	10,2	10,2	12,4	12,3	14,0	13,6
Custo de investimento específico em US\$/kW	4.490	3.200	3.600	3.730	4.130	3.870	3.870	2.890	3.440

* Projecto

Fonte: KJCOC

Um protótipo, onde é aplicado este princípio, foi construído na Bélgica. Os permutadores de calor transferem o calor solar do fluido térmico para um ciclo água-vapor. A água de alimentação está a uma pressão muito elevada, é pré-aquecida, evaporada e super-aquecida pelo fluido térmico. O vapor super aquecido é conduzido para uma turbina de vapor convencional para gerar a eletricidade. Em turbinas de dois estágios, com alta e baixa pressão, parte do vapor é re-aquecido entre os dois estágios. Quando deixa a turbina o vapor é expandido e começa a ser condensado antes de atingir a bomba de água da alimentação. Quando há mau tempo ou é noite o ciclo do vapor pode também operar com uma caldeira paralela de combustível fóssil.

Tabela 3.2 - Características de diferentes coletores de calha parabólica

Tipo de coletor	LS-1	LS-2	LS-3	"EuroTrough"
Ano da 1ª instalação	1984	1986	1988	2001
Taxa de concentração	61	71	82	82
Largura da abertura em m	2,5	5,0	5,76	5,76
Comprimento do coletor em m	50	48	99	150
Abertura em m ²	125	235	545	825
Diâmetro do tubo absorvor em mm	42,3	70	70	70

Fonte: KJCOC

Em contraste com os sistemas fotovoltaicos, uma central solar pode garantir a segurança de fornecimento diário. Este aspecto aumenta a atratividade da tecnologia térmica solar para centrais solares. O fornecimento de eletricidade pode ser feito através de sistemas híbridos com combustíveis fósseis ou apenas com energia solar permitindo não haver emissões de CO₂, através do armazenamento térmico. Um princípio utilizado no armazenamento de calor a temperaturas elevadas, é o uso de dois tanques de armazenamento com sal fundido. No caso

do excesso de calor solar este é transferido, através do permutador de calor, ao sal fundido que é bombeado da parte morna do tanque de armazenamento para a parte quente. Em períodos com menor radiação solar o sal fundido líquido quente pode ser bombeado para o tanque de aquecimento acima do fluido de transferência térmica, que depois conduz o ciclo do vapor.

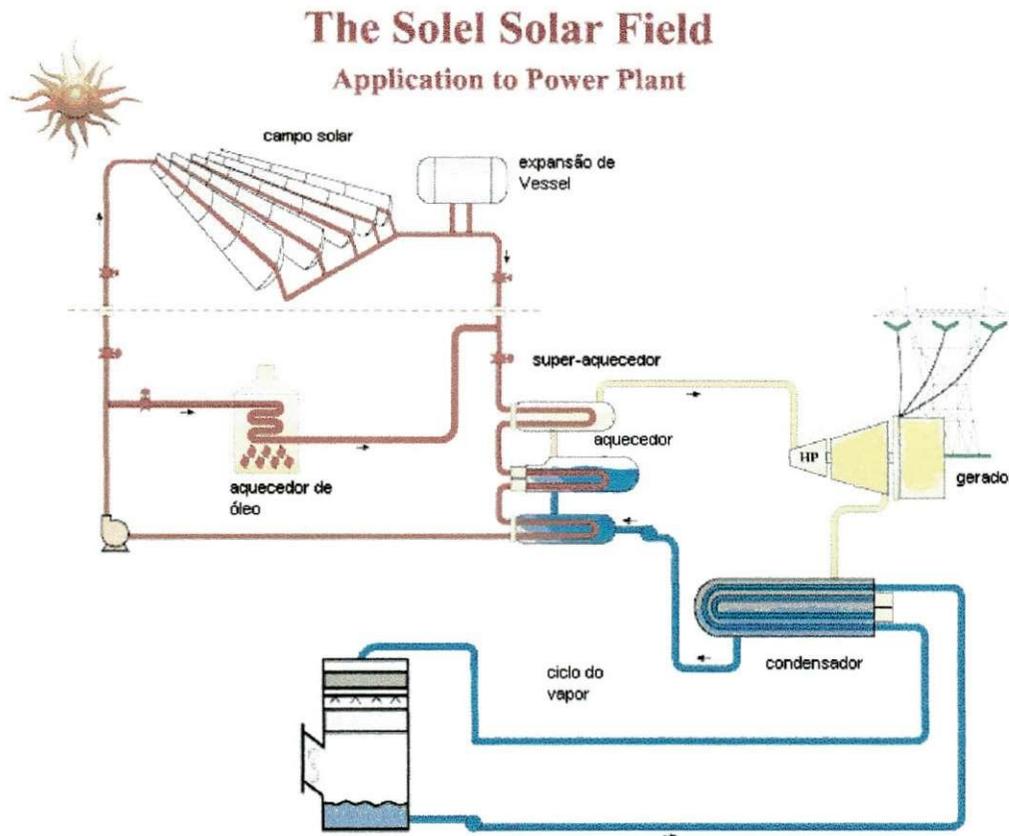


Figura 3.7 – Tecnologia calha parabólica
Fonte SOLEL.

O gerador paralelo de vapor (caldeira) pode também ser abastecido por biomassa ou por hidrogênio (produzido por eletricidade renovável). Esta é uma outra opção para gerar eletricidade sem emissão de CO₂.

Os desenvolvimentos tecnológicos atuais visam a melhoria da eficiência e conseqüentemente a redução dos custos. Por exemplo, no sul de Espanha perto da cidade de Almería a produção de vapor solar está em demonstração. Os concentradores parabólicos cilíndricos aquecem e evaporam diretamente a água em condições de alta pressão a uma temperatura de 400°C. O vapor em tais circunstâncias pode diretamente dirigir uma turbina de vapor, de modo que as centrais podem dispensar o fluido de transferência térmica e os permutadores de calor.

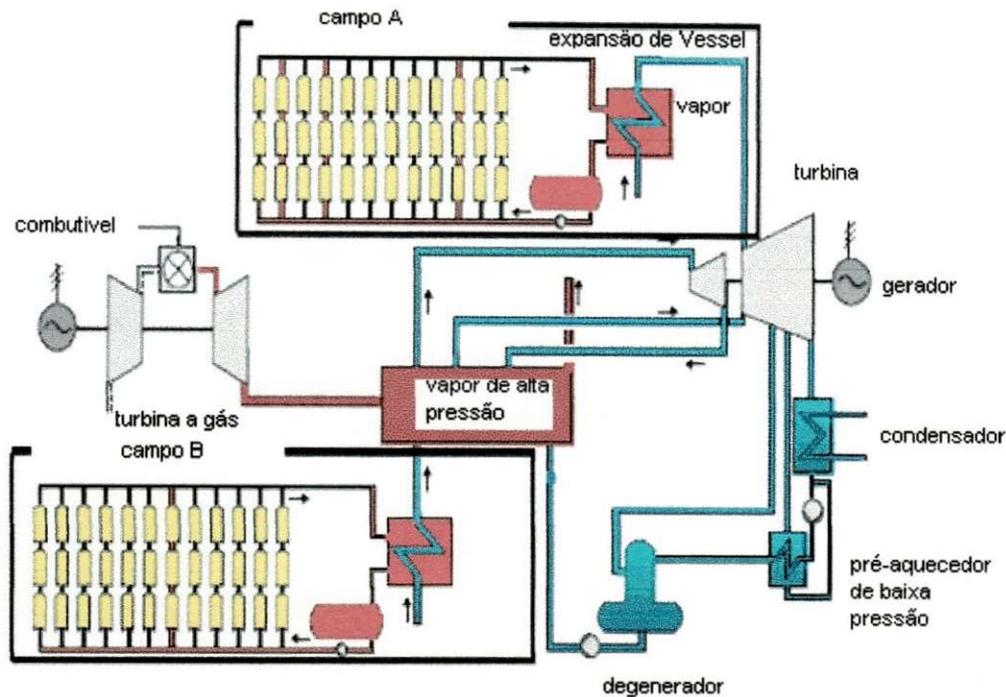


Figura 3.8 – Sistema em Ciclo Solar Integrado
Fonte - DOE

Embora, o maior efeito a respeito de uma redução de custo se possa esperar na produção em grande escala de centrais solares, empregando as economias da escala, a redução dos custos, em longo prazo, de 15€ para 5€ são vistas como possíveis. Isto conduz a menores custos, em comparação com uma ordem de grandeza similar de centrais de combustíveis fósseis convencionais, mas sem a emissão dos gases com efeito de estufa.

3.2.3 - Tecnologias empregadas no Brasil

Uma iniciativa da empresa CEMIG do Brasil refere-se à pesquisa e experimentações relativas ao uso de energia solar térmica para produção de energia elétrica através de termelétricas solares, utilizando concentradores cilíndrico-parabólicos e para aquecimento de água, utilizando coletores solares planos.

Encontra-se em fase de implantação a primeira termelétrica solar do Brasil - de 10 kW – projeto experimental para estudar a viabilidade dessa tecnologia para eventual implementação de um programa sistematizado no Estado.

Nos sistemas a coletores planos, a água aquecida fica armazenada em um reservatório isolado durante todo o dia e quando o sol não é suficiente para aquecê-la na temperatura ideal ou ocorre consumo excessivo da água quente, um sistema elétrico auxiliar é acionado automaticamente para complementar o aquecimento.

Um sistema de aquecimento solar instalado corretamente pode economizar até 80% da energia elétrica consumida para banho. Essa proporção entretanto depende do correto dimensionamento do equipamento para atender o nível de conforto pretendido pelos usuários.

Se, por exemplo, a água quente é utilizada em uma residência em várias torneiras e as duchas são usadas com grande volume de água, o equipamento adquirido precisa ser capaz de atender essa demanda. Caso contrário, o acréscimo do consumo será atendido por energia elétrica e não será alcançada tamanha economia.

Estudos da Cemig indicam que a maioria das falhas deve-se a erros no projeto hidráulico de distribuição de água quente (56%). Projetos arquitetônicos inadequados respondem pelo mau funcionamento de 33% dos sistemas de aquecimento solar que falham e erros no próprio sistema, como a instalação errada ou placas de má qualidade, respondem por apenas 11% das falhas.

Contudo, quando bem instalado, o sistema de aquecimento solar é muito eficiente. Para evitar falhas em uma das três fases do projeto, a Cemig recomenda que os interessados procurem profissionais - engenheiros e arquitetos - que dominam as técnicas e utilizem placas etiquetadas pelo Inmetro. Tais placas foram testadas pela própria Cemig.

Algumas evidências de que a energia solar térmica pode ser a melhor solução para o banho quente do brasileiro sem sobrecarregar o sistema elétrico convencional estão surgindo com o Projeto Cemig Solar, que promoveu a instalação de seis mil metros quadrados de placa para a implantação de sistemas de aquecimento solar de água em prédios de Belo Horizonte e outras cidades-pólo com a coordenação da Cemig, durante o triênio 1999/2000/2001.

A Cemig prestou consultoria técnica referente aos projetos do sistema de aquecimento solar e hidráulico, ajudando o consumidor a economizar energia, aliviando o sistema elétrico no horário de pico e contando com uma fonte de dados interessante para seus estudos sobre o sistema de aquecimento solar.

3.3 - O DISCO SOLAR PARABÓLICO

O Disco Solar Parabólico (Dish/Stirling System) é um sistema de geração de energia elétrica de pequeno porte (de 5 a 25kW), que utiliza como fonte de energia as radiações diretas do Sol concentradas. A geração é feita através da conversão de energia térmica em energia mecânica, que depois é convertida em energia elétrica. Ele é composto por quatro elementos básicos: o concentrador, o receptor, o motor Stirling e o sistema de rastreamento. A quantidade de energia gerada é diretamente proporcional às dimensões da superfície refletora. Quanto maior for a mesma, mais raios são refletidos, obtendo-se temperaturas mais elevadas no foco. O tamanho relativamente pequeno e o caráter modular fazem com que ele seja ideal para geração descentralizada de energia elétrica.

Os sistemas de disco parabólico consistem em um concentrador em forma de parabólica focalizando um ponto determinado que reflete a radiação solar em um receptor montado no ponto focal. Estes concentradores são montados em uma estrutura com um sistema seguindo um duplo eixo para seguir o percurso do sol. O calor coletado é utilizado tipicamente diretamente para um motor térmico, montado no receptor. Os motores de ciclo de Stirling e de Brayton são favorecidos atualmente para a conversão descentralizada da energia, ciclos de Rankine centrais estão sendo estudados para grandes “fazendas” de tais parabólicas.

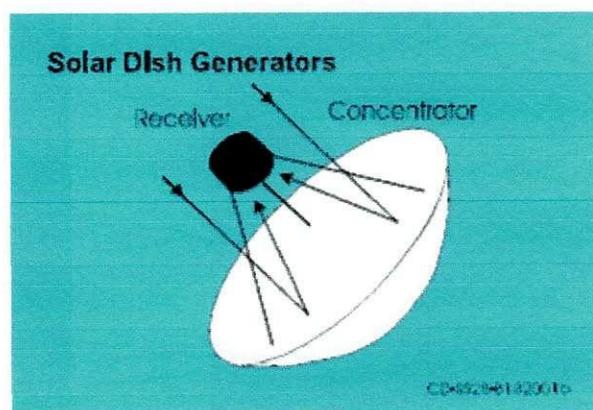


Figura 3.9 – sistema solar disco parabólico
Fonte - DOE

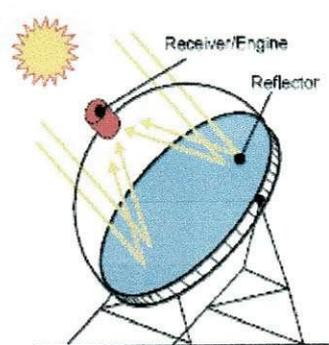


Figura 3.10 – Sistemas de prato/Stirling. Produção de energia descentralizadas para áreas remotas
Fonte - DOE

3.3.1 - Concentrador Solar

O concentrador solar é uma superfície com o formato de uma parabolóide de revolução, que tem como principal função agrupar as radiações diretas do Sol no seu ponto focal. Deve-se entender o mesmo como um grande espelho côncavo. Os raios solares que atingem o concentrador incidem paralelamente a superfície espelhada e se cruzam no foco da mesma após a reflexão. A energia solar concentrada é utilizada para aquecimento de um fluido a temperaturas muito elevadas e posterior conversão de energia térmica em energia elétrica. Materiais com elevado grau de reflexão, desenvolvidos com alta tecnologia são usados para refletir os raios. Já foram desenvolvidos, inclusive, materiais polarizados, que refletem apenas a radiação ideal para esse tipo de sistema.

3.3.2 - Receptor

O receptor se encontra no foco da parabolóide, onde os raios se cruzam, e absorve o máximo de radiação solar possível para transferir uma grande quantidade calor ao motor Stirling. Ele é composto por materiais que resistem a temperaturas bastante elevadas. A depender das dimensões do concentrador solar, a temperatura do gás de trabalho (hélio ou hidrogênio) pode chegar aos 650°C

3.3.3 - Motor Stirling

O ciclo Stirling é o mais eficiente dos ciclos termodinâmicos para a conversão de calor em energia mecânica ou elétrica. Diferentemente dos motores de combustão interna, o motor Stirling depende de uma fonte de calor externa, que caso do Disco Parabólico é a energia solar concentrada. Uma quantidade fixa de gás (hélio ou hidrogênio) sofre expansões quando aquecido e compressões ao ser arrefecido, fazendo com que os pistões do motor possam se movimentar. Ao girar, o motor funciona como uma turbina, fornecendo geração diretamente em AC

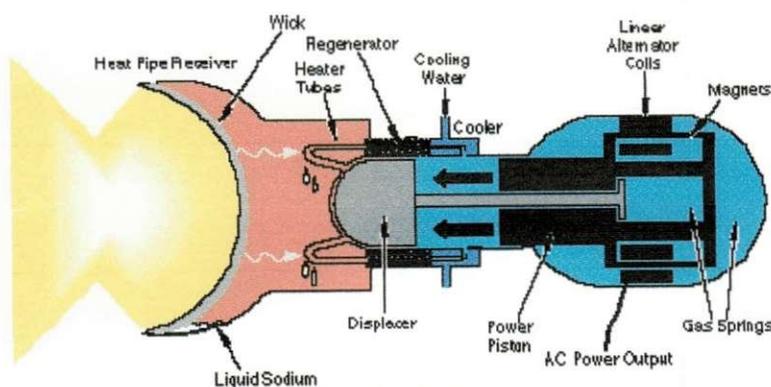


Figura 3.11 – esquema de um motor stirling
Fonte - DOE

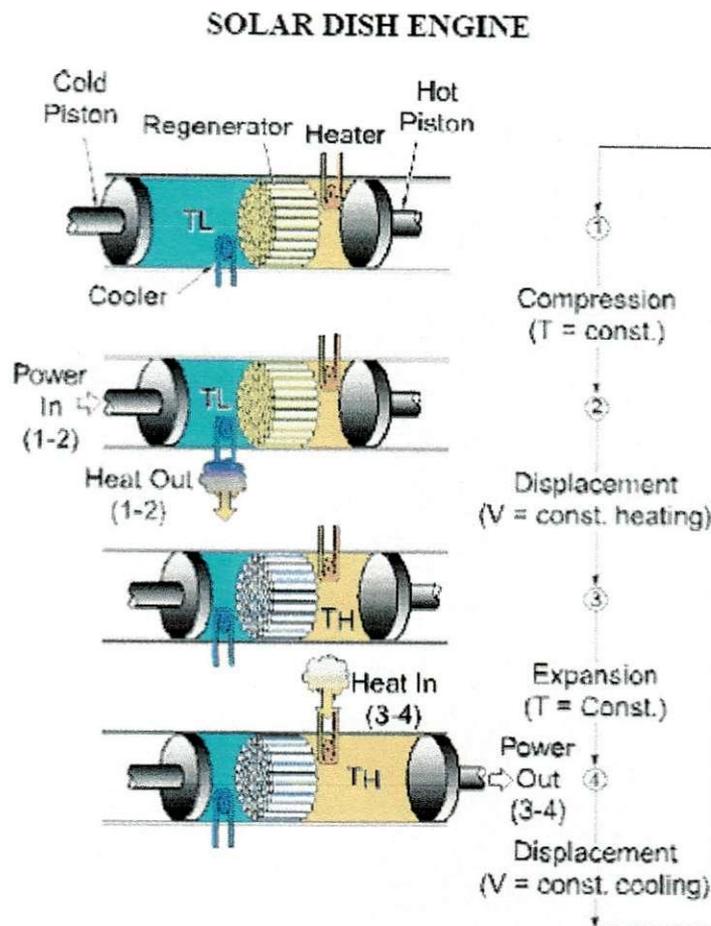


Figura 3.12 – esquema do princípio de operação do motor stirling
Fonte - DOE

3.3.4 - Sistema de Rastreamento

Os sistemas baseados em tecnologia CSP são muito sensíveis à variação da taxa de radiação direta. Para garantir que o Disco Parabólico opere de forma eficiente é necessário que ele esteja perfeitamente alinhado com o Sol. Sendo assim, o Sistema de Rastreamento torna-se indispensável. Ele permite que o Disco Parabólico se movimente em qualquer direção, possibilitando tanto o rastreamento diário quanto o sazonal. O movimento diário é feito na direção leste-oeste, enquanto o movimento sazonal varia na direção norte-sul.

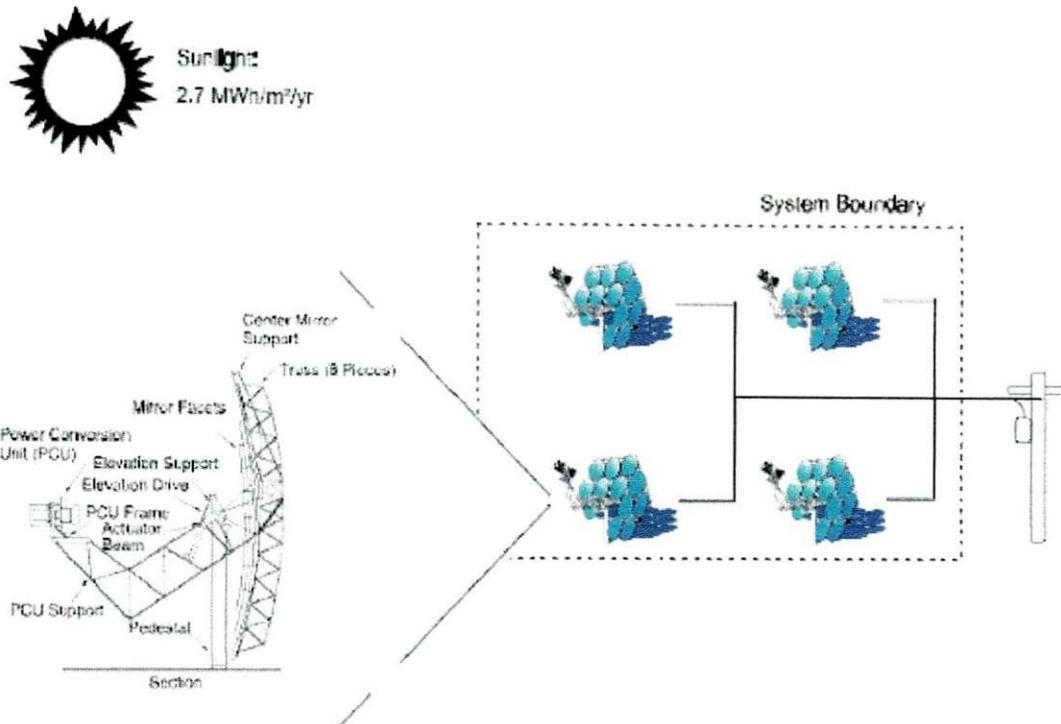


Figura 3.13 – esquema do sistema prato/motor. Combinação de 4 unidades de 25 kW em aplicação
Fonte - DOE

3.3.5 - Sistemas Dish/Stirling

Os sistemas Dish/Stirling podem também ser usados em unidades menores, por exemplo, em sistemas autônomos para abastecer povoações, sem ligação à rede elétrica.

O calor solar não é o único calor que pode alimentar o motor Stirling, pode ser usado calor de qualquer processo de combustão. Combinado com um queimador de biogás o sistema Dish/Stirling permite produzir eletricidade durante a noite e em períodos de mau tempo sem emissão de CO₂.

Alguns protótipos de sistemas Dish/Stirling foram construídos e operados na Arábia-Saudita, Espanha e EUA. Os custos de eletricidade continuam relativamente elevados em comparação com a torre solar ou concentradores parabólicos cilíndricos. Contudo, uma drástica redução de custos é possível quando estes sistemas forem produzidos em grande número e em produção em série.

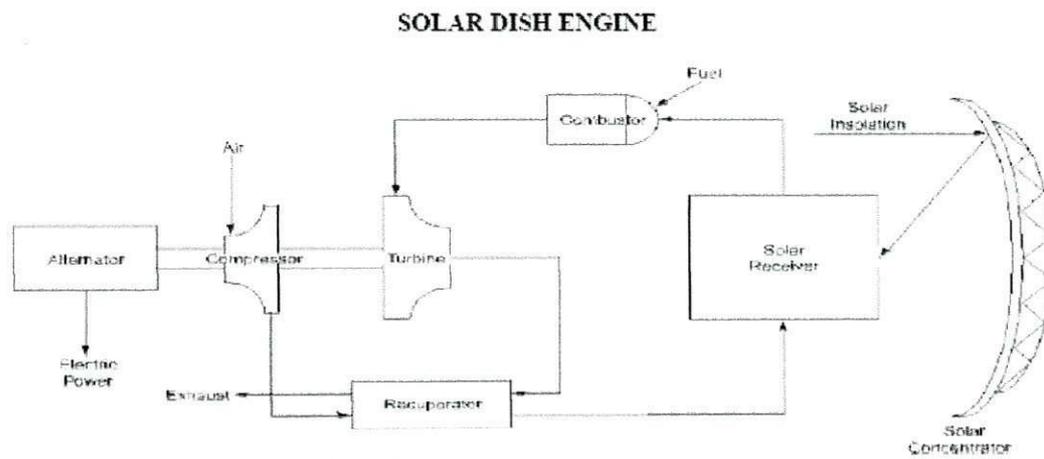


Figure 5. Schematic of a Dish/Brayton system.

Figura 3.14 – esquema alternativo do prato/solar.
Fonte - DOE



Figura 3.15 - Sistemas de demonstração Dish/Stirling em Almería (Sul de Espanha)
Fonte: Volker Quaschnig

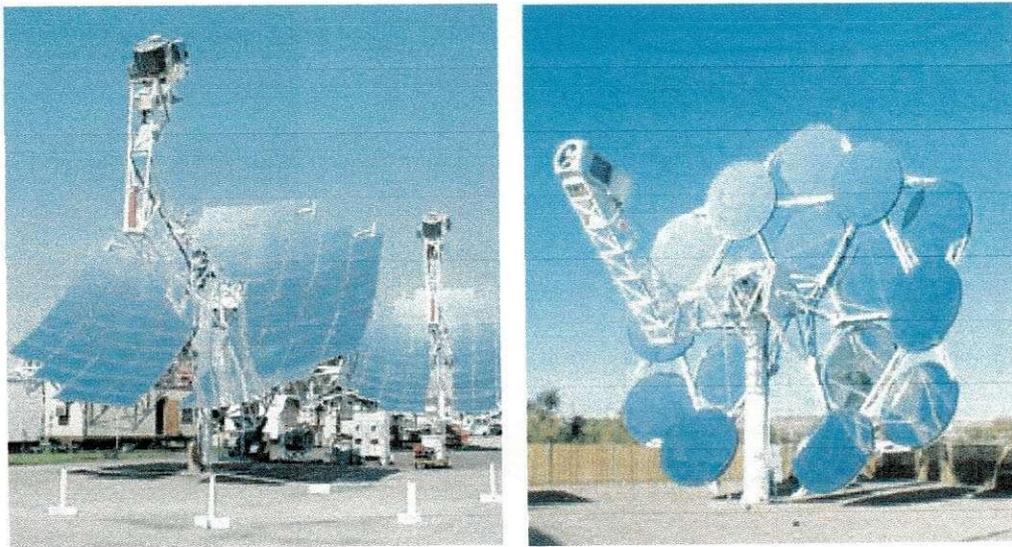


Figura 3.16 – Sistema dish-stirling de 25 kW em operação no projeto Salt Project no Phoenix, AZ.
Fonte - DOE



Figura 3.17 – Sistema prato solar de 10 kW desenvolvido pela “WG associates” para uso de americanos no sudoeste dos Estados Unidos.
Fonte - DOE

Tabela 3.3 - Características técnicas do Sistema Dish/Stirling "EuroDish"

Diâmetro do concentrador: 8,5 m	Reflectividade: 94 %
Abertura: 56,7 m ²	Fluido térmico: Hélio
Distância focal: 4,5 m	Pressão do gás: 20 – 150 bar
Taxa média de concentração: 2.500	Temperatura do gás de entrada: 650 °C
Capacidade eléctrica bruta: 9 kW	Velocidade max. do vento para operação: 65 km/h
Capacidade eléctrica: 8,4 kW	

Fonte: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

3.3.6 - Aspectos económicos

Os sistemas de concentração solar apenas utilizam a parte direta da radiação solar, enquanto que sistemas não concentradores tais como os fotovoltaicos usam a parte difusa também. As tabelas abaixo mostram que a irradiação direta aumenta com a diminuição da latitude até ao equador, mais rapidamente que a radiação global horizontal.

As centrais solares também podem operar em regiões com baixa irradiação direta, mas a viabilidade económica diminui significativamente. Regiões mais adequadas exibem uma irradiação normal direta anual na ordem de 2.000 kWh/m² ou acima. Olhando para a Europa as regiões mais convenientes podem ser encontradas no Sul da Espanha, Sul da Itália ou Grécia. De destacar também a zona do Norte de África.

Tabela 3.4 - Valores da irradiação normal direta e irradiação global horizontal para vários capitais Europeias

	Unidade	Londres	Berlim	Paris	Roma	Madrid	Lisboa
Latitude	°N	51,5	52,5	48,9	41,9	40,5	38,7
Irradiação Directa – normal	kWh/m ² a	690	787	842	1.565	1.593	1.764
Irradiação Global Horizontal	kWh/m ² a	957	993	1.088	1.561	1.582	1.686

Fonte: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

Tabela 3.5 -Valores da irradiação normal direta e irradiação global horizontal para vários regiões que interessam para a instalação de centrais solares

	Unidade	Bari (Itália)	Tabernas (Espanha)	Oujda (Marrocos)	Cairo (Egipto)	Luxor (Egipto)
Latitude	°N	41,1	37,1	34,2	30,1	25,4
Irradiação directa – normal	kWh/m ² a	1.884	2.180	2.290	2.350	2.975
Irradiação Global Horizontal	kWh/m ² a	1.659	1.832	1.995	2.093	2.438

Fonte: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

Hoje em dia, numa boa localização podem obter-se custos de eletricidade na ordem de 0,15 €/kWh. A produção em série e o aperfeiçoamento técnico podem baixar estes custos para 0,10 €/kWh. Tecnicamente a eletricidade solar térmica pode também ser transportada do Norte de África para a Europa.

3.3.7 – Tecnologia

Pesquisadores do Laboratório Nacional Sandia, Estados Unidos, em colaboração com a empresa *Stirling Energy*, estão desenvolvendo um sistema para geração de energia solar. Cada "prato", parecido com uma antena parabólica, deverá ser capaz de gerar energia elétrica suficiente para abastecer 40 residências.

Um protótipo foi feito e os cientistas estão para construir cinco novos geradores. No total, os seis geradores, quando em operação, deverão gerar 150 kW de energia durante o dia, sendo interligados diretamente à rede de distribuição da cidade.

Cada prato consiste de 82 pequenos espelhos dispostos em um arranjo parabólico, construídos sobre uma estrutura de alumínio em forma de favos de mel, inventada pelo cientista *Rich Diver*, também do Laboratório Sandia. A estrutura de sustentação do gerador é feita em aço.

Depois de aprimorada a tecnologia, a empresa *Stirling* planeja construir grandes "fazendas" geradoras de energia solar, à semelhança das fazendas de geração a energia eólicas, já espalhadas por várias partes do mundo.

Os pratos solares geram eletricidade focalizando os raios do sol em um receptor, que transmite o calor para um motor. O motor é um sistema selado cheio de hidrogênio. O aquecimento e resfriamento do gás alteram sua pressão, que é então utilizada para acionar os pistões no interior do motor, produzindo energia mecânica. A energia mecânica é finalmente utilizada para movimentar um gerador e produzir a energia elétrica.

O sistema é totalmente automatizado e funciona sem intervenção humana, acompanhando o sol durante todo o dia e desligando-se automaticamente à noite. Toda a operação poderá ser monitorada remotamente pela Internet.

Cada um dos cinco protótipos possui um custo de US\$150.000,00. Mas os engenheiros acreditam que seu custo poderá ser reduzido a US\$50.000,00 quando estiverem sendo fabricados em larga escala. A esse valor, a energia solar gerada torna-se competitiva com as fontes tradicionais.



Figura 3.18 – Sistema prato solar desenvolvido pelo Laboratório Nacional Sandia, Estados Unidos.
Fonte - Sandia

3.4 - TORRE SOLAR

O Receptor Solar Central ou Torre de Força é cercado por uma série de espelhos seguindo um duplo eixo, denominados heliostatos, refletindo a radiação solar direta em um receptor fixo situado no alto da torre. Dentro do receptor, um fluido – foram testados água, ar, um metal líquido e sal fundido – transfere o calor solar absorvido ao bloco de força onde é usado para aquecer um gerador a vapor. Os conceitos avançados de alta temperatura da torre de força estão agora sendo investigados, onde ar pressurizado aquecido a mais de 1000 °C alimentam as turbinas de gás de modernos ciclos combinados.

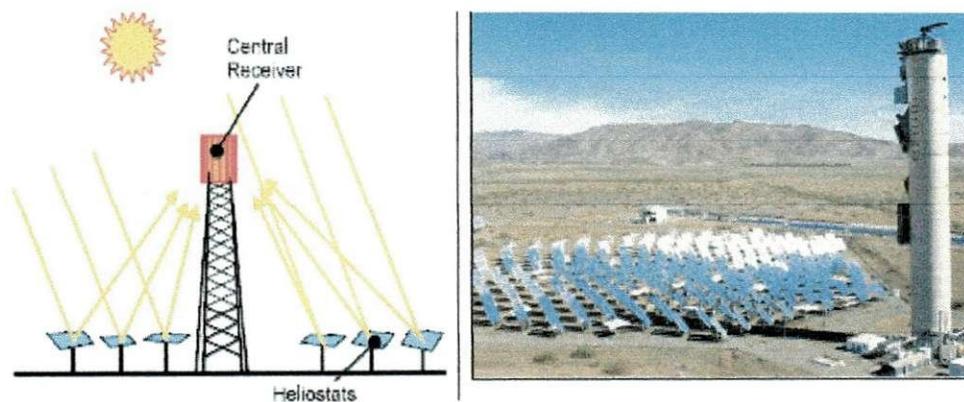


Figura 3.19 – Princípio dos sistemas Torre Solar, Plataforma Solar de Almeria, Espanha.
Fonte - Fonte: Volker Quaschnig

3.4.1 - Centrais solares em torre

Centenas ou milhares de refletores são posicionados à volta de uma torre central. Cada um dos refletores, helióstatos, segue o Sol controlado por um computador no sentido de focar diretamente a luz solar no receptor central que está no topo da torre. A precisão do acompanhamento da trajetória solar é muito importante para assegurar que os raios solares refletidos atingem o ponto focal.

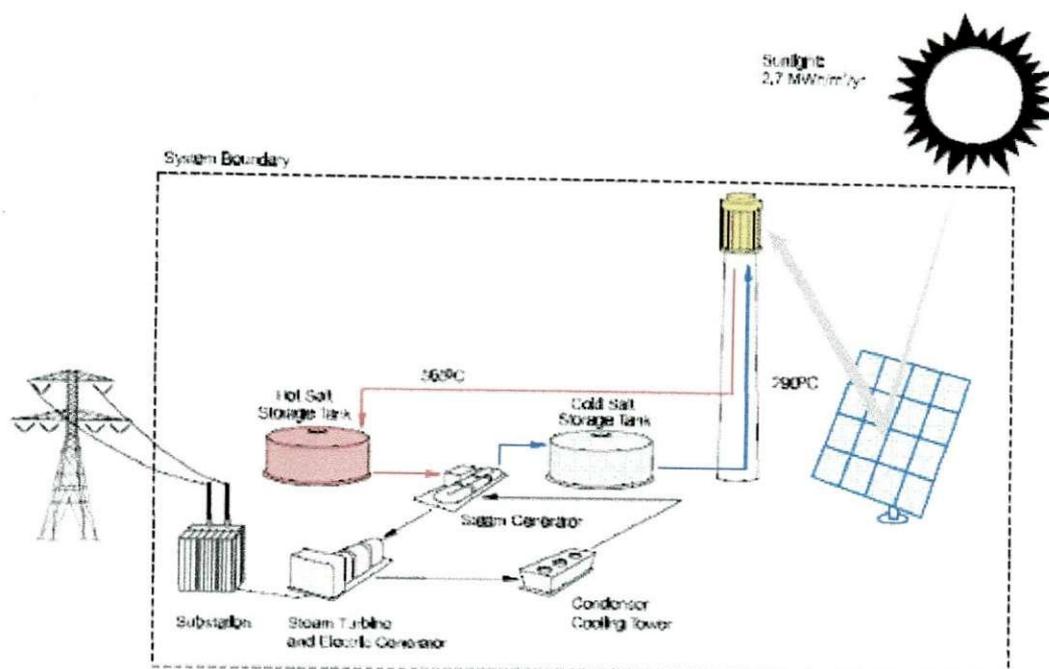


Figura 3.20 – Configuração básica do sistema Torre Solar.
Fonte - DOE

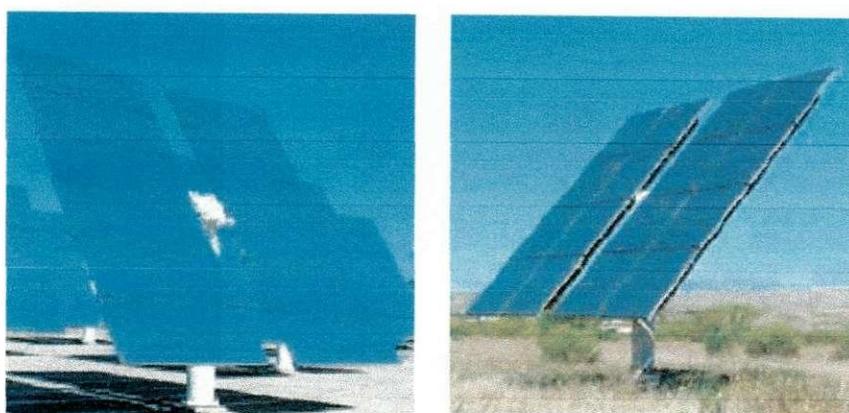


Figura 3.21 -Heliostatos
Fonte: Volker Quaschnig

Um absorvedor é posicionado no ponto focal. A luz solar centralizada aquece o absorvedor a uma temperatura acima dos 1.000 °C. Ar ou sal fundido líquido transferem o calor para o ciclo de vapor – um ciclo de turbina a vapor ou a gás – onde o calor é então convertido em eletricidade.

Em Almería (Espanha), Barstow (EUA) e Rehovot (Israel) estão a funcionar centrais piloto. Na Espanha, a primeira central solar em torre com fins comerciais está numa fase de planeamento muito avançada.



Figura 3.22 - Instalações de torre solar testadas em Almería (Sul de Espanha)
Fonte - Stefan Franzen, CIEMAT

O conceito da torre, com receptores volumétricos abertos trabalha da seguinte forma: uma ventoinha suga o ar para dentro, para o receptor onde os helióstatos focam a luz solar. Geralmente uma malha feita de arame, espuma cerâmica ou metálica ou uma estrutura em forma de favo de mel de cerâmica é utilizada como receptor.

Esta estrutura é aquecida pela radiação solar e transfere o calor para uma corrente de ar. O ar ambiente refrigera a parte dianteira do absorvedor, enquanto que a temperatura aumenta na parte traseira do material absorvedor. Assim, as perdas de radiação são minimizadas. O ar aquecido com temperaturas entre 650°C a 850°C é empurrado para uma caldeira de calor, onde a água é evaporada e superaquecida. Mais uma vez, o vapor superaquecido é conduzido para um gerador de turbina de vapor para produzir eletricidade. Uma variante desta central pode utilizar outros combustíveis.

SOLAR POWER TOWER

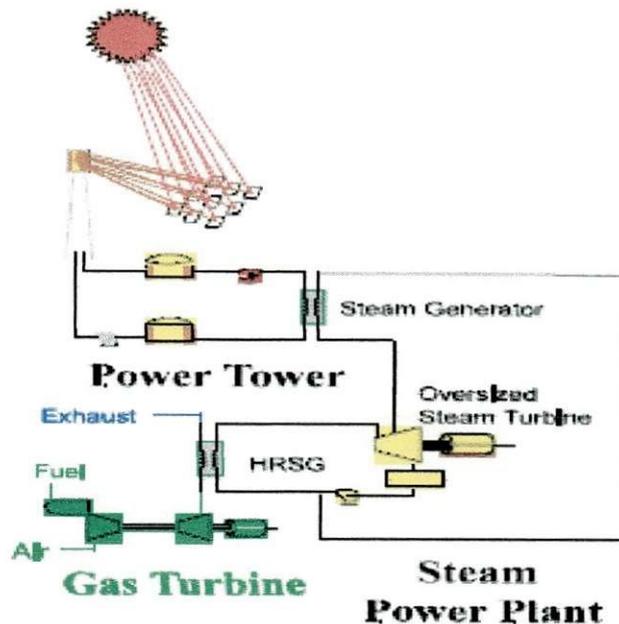


Figura 3.23 - Central solar em torre com sistema alternativo
Fonte - DOE

Um outro conceito de torre que está a ser desenvolvido apresenta um potencial a médio prazo: O receptor volumétrico fechado (conceito-REFOS). Um vidro transparente em forma de cúpula de silicone separa o ar ambiente do absorvedor. O ar é aquecido num receptor pressurizado com uma pressão de aproximadamente 15 bar até a temperaturas de 1.100°C. O ar neste nível de temperatura é dirigido para uma turbina de gás.

Geralmente a eficiência elétrica de ciclos combinados é mais elevada (numa gama de 50-55%) do que a eficiência dos ciclos a vapor (cerca de 35-40%). A integração de energia solar térmica em ciclos combinados permite aumentar a eficiência de solar-para-elétrico em mais de 20%. Esta melhoria e a exploração tecnológica justificam o esforço e o aumento do investimento nesta tecnologia de receptor.

Espera-se que os custos da eletricidade sejam um pouco maiores, em comparação com centrais de concentradores parabólicos cilíndricos. Contudo, devido à elevada eficiência a média prazo espera-se uma diminuição dos custos.

3.4.2 - Torre de energia Solar em construção

Em Mildura, no deserto da Austrália, é o local escolhido para o mais ambicioso projeto já realizado de energia solar. Uma torre de 1 quilômetro e 130 metros de diâmetro será, quando inaugurada, em 2009, a mais alta construção do mundo, mais que o dobro do Empire State Building. Diferente das torres mostradas, a torre fica no centro de um imenso painel solar de 20 quilômetros quadrados e espera-se que forme uma corrente de ar de 50 km/h capaz de movimentar 32 turbinas. A energia resultante será de 200 megawatts, capaz de abastecer 1 milhão de pessoas.

3.5 - VANTAGENS

A vantagem inerente de tecnologias de CSP é sua capacidade de integração única em usinas térmicas convencionais: Todas podem ser integradas como "um combustor solar" em paralelo a um combustor fóssil em ciclos térmicos convencionais e fornecer com a capacidade de reserva de armazenamento, SBP térmico ou do combustível fóssil sem a necessidade de usinas de força de reserva separadas e sem perturbações estocásticas de linha.

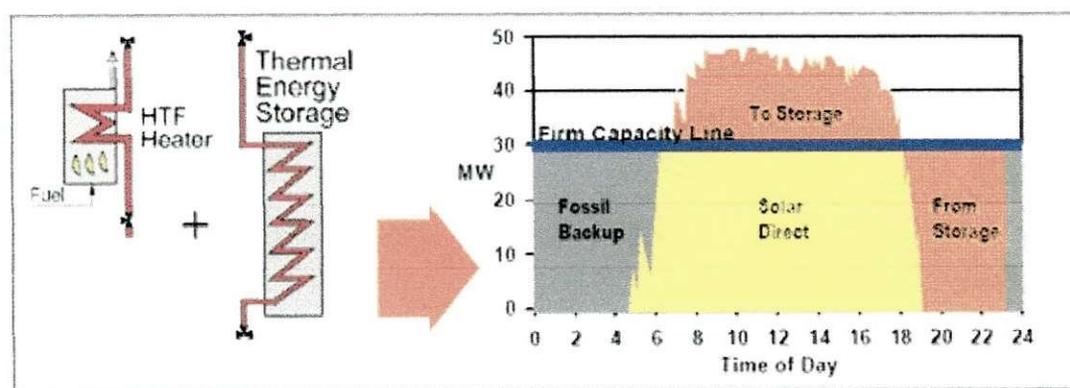


Figura 3.24 - A combustão fóssil de reserva e/ou o armazenamento da energia térmica transforma a capacidade solar em capacidade presente
Fonte - DOE

Com um pouco de energia suplementar de gás natural ou de qualquer outro combustível fóssil, as usinas térmicas solares podem fornecer a energia elétrica de uma maneira segura e em uma base fixada. Isto é possível porque os conceitos térmicos solares fornecem a potencialidade original internamente ao complementar a oscilação de saída do combustor solar com armazenamento térmico ou um aquecedor de reserva fóssil. Com esta característica, os sistemas

térmicos solares são as únicas usinas de força renováveis que nem causarão perturbações da linha nem perturbarão a operação das outras usinas movidas a combustível fóssil existentes no inteiro parque de energia.

Estas habilidades de compartilhar as instalações de geração com biomassa sugerem uma habilidade futura em fornecer uma recolocação para as usinas de combustível fóssil de fator de elevada capacidade.

3.6 - ENERGIA TÉRMICA DO PROCESSO INDUSTRIAL

3.6.1 - Potencial e exigências de mercado

De acordo com uma concepção amplamente difundida, o uso da energia solar é associado com a produção da eletricidade ou energia térmica de baixa temperatura, principalmente para finalidades domésticas. Este ponto de vista negligencia o grande potencial em fornecer eficientemente a energia térmica em uma escala de temperatura até 250 °C e em uma escala de energia da unidade entre uns 100 quilowatts do th e um th de 10 MW, como necessitado em aplicações industriais ou municipais. Os exemplos típicos são indústrias de gêneros alimentícios, indústria têxtil e de papel, fornecedoras para o setor automobilístico, institutos de beleza (bronzamento), cura de materiais de edificação, aquecimento e refrigeração de grandes complexos (hotéis, shopping centers, etc.), ou sistemas de aquecimento urbanos. Esta demanda significativa não pode ser satisfeita por nenhuma outra fonte renovável de energia, com exceção das instalações onde a biomassa ou a energia geotérmica estão abundantemente disponíveis. Os estudos recentes indicam que os sistemas parabólicos de baixo peso da calha podem fornecer a energia térmica a custos entre 0.03 e 0.1 Euros/kWh, dependendo da escala de temperatura e da localização na Europa do sul ou central. Na escala investigada da temperatura e da energia, os sistemas da calha podem superar o rendimento dos tipos mais geralmente conhecidos de coletores solares nos termos de energia anual coletada e do custo específico da energia térmica solar. Isto pode ainda não ser inteiramente competitivo com o baixo custo do processo térmico de usinas abastecidas a combustível fóssil e com a perda da geração de eletricidade convencional, mas pode já ser atrativo para os mercados pioneiros onde os interesses ambientais ou uma imagem "verde" justificam os custos de implementação de um sistema solar.

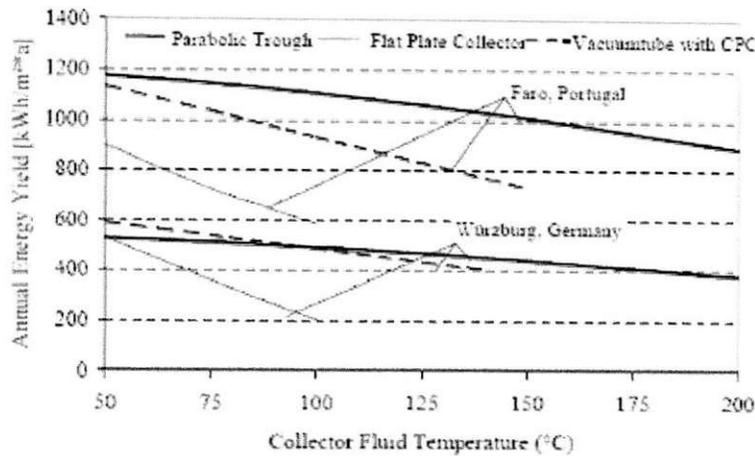


Figura 3.25 – Rendimento anual potencial da energia do coletor de placa, coletor de vácuo e do coletor parabólico de pequeno porte da calha em função da temperatura do fluido do coletor médio em posições de baixa e elevada incidência da insolação.

Campo de energia anual [kWh/m²a]

Preço calor específico [€/kWh]

Fonte: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

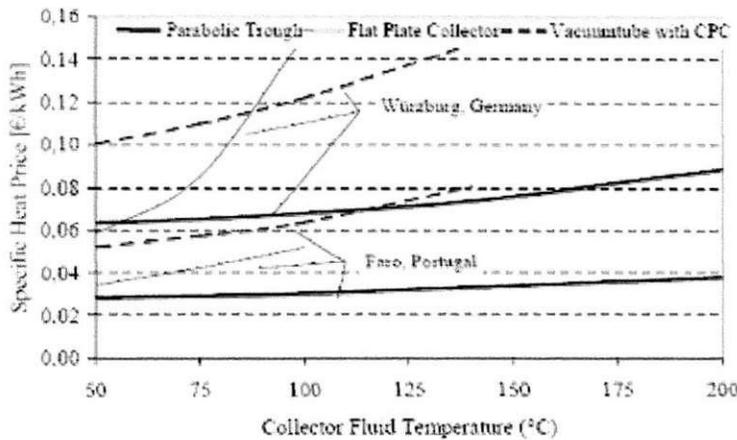


Figura 3.26 – Custos de geração de energia térmica do coletor plano de placa, do coletor de vácuo CPC e do coletor parabólico de pequeno porte da calha em função da temperatura do fluido do coletor médio em posições de baixa e elevada incidência da insolação.

Campo de energia anual [kWh/m²a]

Preço calor específico [€/kWh]

Fonte: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

Em aplicações industriais, o fornecimento de energia segura às linhas de produção é da mais alta importância. Conseqüentemente, os sistemas de combustível híbridos solar/fóssil serão preferidos, iniciando com usinas solares pequenas e realimentação convencionais plenas. A utilização da energia solar não é gratuita, mas tem que ser paga através de investimento (e por um custo operacional e de manutenção muito menores) para o equipamento do campo solar. Deve ser tomado cuidado para selecionar aplicações favoráveis e tecnologias apropriadas e a integração de sistema otimizada assegurando o uso mais efetivo deste investimento.

Os processos de grupo com demanda de energia variável são particularmente apropriados para trabalhar em conjunto com a fonte de energia solar intermitente. As cotas solares podem ser aumentadas onde a demanda de energia coincide com o perfil diário da insolação, que é freqüentemente o caso em aplicações de refrigeração ou em operação passo único. Em sistemas de cogeração, a energia solar pode ser integrada para reduzir a demanda da energia térmica da caldeira adicional, onde o combustível fóssil é usado com baixa eficiência energética. Nos sistemas solares, acionados a longo prazo, de cogeração tornam-se viáveis, baseando-se na experiência dos sistemas de energia térmica solares. Sinergias similares podem esperar-se partindo do desenvolvimento de sistemas apropriados de armazenamento de calor para aumentar a cota solar.

CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO

CONCLUSÃO

O desenvolvimento de tecnologias e o aumento do uso de certos tipos de fontes de energia, por exemplo, o carvão, pode acentuar a causa de sérios problemas ambientais, tais como, a chuva ácida e o efeito estufa. A energia solar é uma importante alternativa para a geração de eletricidade que oferece vantagens ecológicas.

As tecnologias baseadas no uso de fontes renováveis, oferecem soluções com o menor impacto ambiental. Até mesmo em operação híbrida, as plantas heliotérmicas que operam com combustíveis fósseis apresentam grande redução no impacto ambiental.

Embora medidas efetivas não tenham ainda sido implementadas em muitos países para internalizar os custos ambientais da produção da eletricidade, isto certamente irá ocorrer em breve, tornando desejável o desenvolvimento de tecnologias limpas para a geração de energia. A geração heliotérmica tem um nicho bem identificado para o fornecimento de energia em áreas com elevada radiação solar direta. (GRASSE, 1994a,1995).

As plantas heliotérmicas têm a menor necessidade de área quando comparada com outras tecnologias alternativas, em particular, nos projetos hidráulicos, logo apresentam o mínimo impacto ambiental. Exceto para hidrelétricas com grandes quedas, as necessidades de áreas para projetos hidráulicos variam de aproximadamente dez a diversas centenas de vezes aquelas de projetos solares para as eficiências de conversão atuais, em média elas são de 25 a 50 vezes (ANDERSON & AHMED, 1995).

Embora as tecnologias heliotérmicas se apresentem promissoras, elas não serão completamente utilizadas até que ocorra uma ampla cooperação entre governos, concessionárias e setor privado. Além disso, incentivos mercadológicos devem ser criados para que possam ser vencidas as barreiras que existem, especialmente junto a comunidade financeira, pois os sistemas heliotérmicos são novos (e vistos como um investimento de alto risco) e podem ser vistos como concorrentes das tecnologias existentes. Finalmente, os sistemas heliotérmicos precisam ser apoiados por políticas reguladoras de longo prazo para que se faça sentir os benefícios sócio-econômicos do uso evitado dos combustíveis convencionais (De LAQUIL et al., 1993) (GRASSE, 1994a) (PILKINGTON, 1996) e (SolarPACES, 1999).

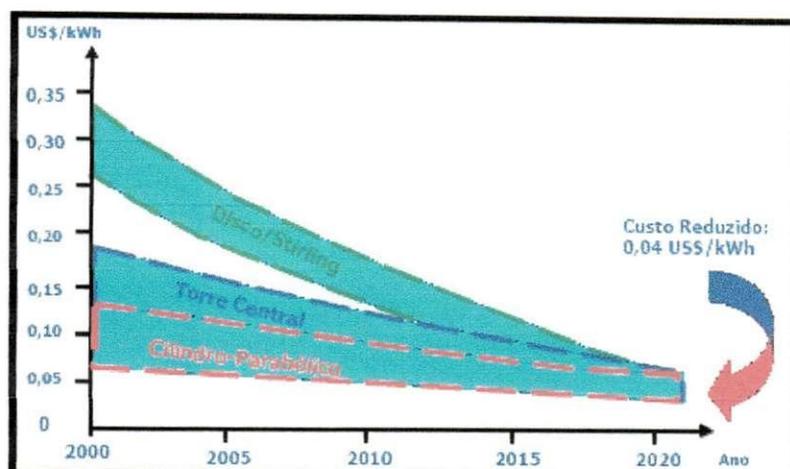


Figura 4.1 – Projeção do custo de energia para a geração heliotérmica.
Fonte - (PSA)

Tabela 4.1 – Comparação das Principais Tecnologias Heliotérmicas

	TORRE CENTRAL	DISCO-PARABÓLICO	CILINDRO-PARABÓLICO
APLICAÇÕES	Plantas Conectadas à Rede; temperaturas para processo elevadas	Sistemas isolados ou Sistemas de baixa potência	Plantas Conectadas à Rede; Calor de Processo
ESTAGIO DE DESENVOLVIMENTO	Testes e Plantas de Demonstração de até 10 MW _e ; estágio comercial a partir de 1999; adequada para integração em ciclos combinados	Testes e Unidades de Demonstração; Sistemas isolados de até 50 kW _e e sistemas modulares de até 5 MW _e ; estágio comercial a partir de 1998	Comercial com plantas de 30 a 80 MW _e ; Existem 354 MW _e operando; Adequada para integração em ciclos combinados
VANTAGENS	Excelente perspectiva de longo prazo alcançar elevadas eficiências e armazenamento à alta temperatura; operação híbrida possível	Elevadas eficiências de conversão; modularidade; operação híbrida em desenvolvimento	Comercialmente disponível com mais de 4500 GWh de experiência operacional; operação híbrida provada; capacidade de armazenamento
DESVANTAGENS	Projeções de custo não demonstradas; heliostatos requerem alta precisão de rastreamento	Back-up com combustível fóssil não provado; dificuldade de armazenamento; elevado custo; ainda em desenvolvimento	Temperaturas baixas conduzem a obtenção de vapor qualidade moderada devido ao limite da temperatura do óleo

Um importante passo para implementar o uso da energia solar em países em desenvolvimento foi dado, em Março de 1994 através da criação do "Global Environmental Facility-GEF". Esta iniciativa envolve a implantação de linhas de projetos elegíveis para financiamentos de aplicações comerciais ou pré-comerciais.

Deve-se destacar que as tecnologias não estão congeladas por causa destes programas, o que significa que algumas pesquisas, desenvolvimentos, e projetos de demonstração usando energia solar podem ser elegíveis para as linhas de financiamento do GEF. Visando introduzir as tecnologias heliotérmicas,

como mais uma opção de geração para o setor elétrico brasileiro, MME, MCT, ELETROBRÁS, CEPEL, CHESF, COELBA, CODEVASF, PETROBRÁS e a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável-FBDS, estão preparando, com recursos obtidos do GEF, um estudo de viabilidade técnico-econômica para a construção da primeira planta heliotérmica pré-comercial a ser implantada no Brasil.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, ARNALDO MOURA - *Aplicações térmicas da energia solar*, Editora Universitária, João Pessoa, 1997.

BRITO, CAMÊLO CAVALCANTI - *Geração heliotérmica: uma nova opção de energia limpa para o Brasil*, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL Ministério de Minas e Energia-MME, Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético

DE MACEDO, ISAIAS CARVALHO - *Estado da arte e tendências tecnológicas para energia*, CTEnerg.

FRAIDENRAICH, NAUM - *Tecnologia Solar no Brasil. Os próximos 20 anos*, Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia - Departamento de Energia Nuclear, Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco.

FUNKEN, KARL-HEINZ & HENNECKE, KLAUS & RICHTER, CHRISTOPH - *Aplicações industriais da radiação solar*, Centro Aeroespacial Alemão (DLR) Institute of Technical Thermodynamics – Solar Research.

GONÇALVES, FELIPE FREIRE - *Estudo da tecnologia e avaliação teórica do potencial do disco solar parabólico*, Departamento de Engenharia e Arquitetura, UNIVERSIDADE SALVADOR.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, janeiro 2006

KEARNEY, HANK PRICE DAVID - *Parabolic -Trough Technology Roadmap: A Pathway for Sustained Commercial Development and Deployment of Parabolic-Trough Technology*, SunLab/NREL and Kearney and Associates Janeiro 1999.

LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar- EMC/UFSC - *Atlas de Irradiação solar do Brasil (1998)*

SARGENT & LUNDY LLC CONSULTING GROUP - *Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts*, National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-550-34440, CHICAGO, ILLINOIS, Outubro 2003

Sites:

SunLab

<http://www.eren.doe.gov/sunlab>

U.S. Department of Energy's Concentrating Solar Power

<http://www.eren.doe.gov/csp>

U.S. Department of Energy (DOE)

<http://www.energy.gov/>

STINE, WILLIAM B. & DIVER, RICHARD B. - *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*, Solar Thermal Technology Department
Sandia National Laboratories Albuquerque
California State Polytechnic University Pomona

<http://solstice.crest.org/renewables/dish-stirling/index.html>

CSP technology, SolarPaces

http://www.solarpaces.org/csp_technology.htm

Volker-Quaschning

<http://www.volker-quaschning.de/artikel/konzenson/index.html>

Solel

<http://solel.com/home/>

Greenpro

<http://www.greenpro.de/po/solartermico.pdf>