

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MODELO DE
CENTRAL TORRE PARA CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR EM ENERGIA
TÉRMICA

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Débora Damasceno Belarmino

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Natal, Julho/2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MODELO DE
CENTRAL TORRE PARA CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR EM ENERGIA
TÉRMICA

Débora Damasceno Belarmino

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN – Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN

Prof. Dr. Roberto Silva de Souza – IFRN

Consagro a produção e a divulgação do conhecimento científico proposto ao meu Deus, que me levou em seus braços, mostrando-me o caminho certo e frutífero a prosseguir; a razão da minha vida o meu filho Gabriel Rian; ao meu amado cônjuge Michell Barros, pelo o amor e companheirismo e aos meus pais pelas suas orações, carinho e cuidado para conosco.

AGRADECIMENTOS

Ao meu imponente Deus, pelo estímulo espiritual neste trabalho;

A Instituição - UFRN, pelo meu ingresso no curso de Física, o qual viabilizou condições necessárias para minha formação acadêmica possibilitando-me aluna de pós-graduação;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, - PPPGEM/UFRN, por possibilitar-me concretizar este curso de mestrado;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelos financiamentos ao trabalho realizado;

Dedico a minha maior gratidão ao meu Orientador Prof. Dr. Luiz G. M. de Souza, pelo reconhecimento aos seus ensinamentos, que possibilitou me orientar, com afeição e paciência, devido a sua inteligência esplêndida.

Ao técnico Mecânico Aldo P. M. Júnior, com suas formações de idéias hábeis e imprescindíveis durante todo o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar - LMHES/UFRN, que possibilitou a realização deste trabalho;

Aos colegas do LMHES/UFRN. Em especial a Rafaela e aos mestres: Aroldo e Reginaldo com suas amizades e colaborações de forma direta e/ou indireta na realização deste trabalho e ao longo de todo o mestrado;

A banca examinadora pelas avaliações indispensáveis ao encerramento deste trabalho e

A toda minha Família pelo apoio e estímulo. Em especial ao meu amado conjugue: Michell Barros, pelo auxílio nos experimentos realizados neste trabalho e a minha querida irmã: Loilde Belarmino pelo apoio e incentivo ao longo dos meus estudos.

Mui grata.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	07
LISTA DE TABELAS.....	09
SÍMBOLOS.....	10
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Apresentação do trabalho.....	14
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo geral.....	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Energia.....	18
2.1.1. Fontes de energia.....	19
2.1.2. Consumo e geração de energia.....	19
2.1.3. Passado, presente e futuro energético.....	20
2.1.4. O impacto ambiental.....	21
2.2. Energias renováveis.....	22
2.3. Energia solar.....	23
2.4. Dispositivos solares.....	26
2.5. Sistemas termosolares de concentração (STC).....	28
2.5.1. Centrais torre solares.....	28
2.5.2. Concentradores no mundo.....	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1. Desenvolvimento teórico.....	43
3.1.1. Determinação da equação do campo direcionado ao foco.....	43
3.1.2. Determinação do balanço térmico em superfícies.....	44
a) Potência máxima absorvida.....	44
b) Potência perdida.....	45
c) Potência útil.....	47
d) Eficiência global.....	47

3.1.3. Fator de concentração	48
3.2. Processos da fabricação e montagem do modelo de sistema torre solar.....	48
3.2.1. Projeto das dimensões e desenho do campo de espelhos.....	48
3.2.2. Confecção dos heliostatos	49
3.2.3. Focalização dos heliostatos	51
3.2.4. Confecção do absorvedor e da torre	52
3.3. Montagem experimental e instrumentação utilizada	54
3.3.1. Posicionamento dos heliostatos em relação à torre... ..	54
3.3.2. Abastecimento de água no absorvedor	55
3.3.3. Medições da temperatura	56
3.3.4. Medição da radiação	56
3.3.5. Medição da quantidade de água vaporizada	56
3.4. Testes para avaliar a eficiência do modelo de central torre solar	56
3.4.1. Testes sem carga.....	57
3.4.2. Testes com carga	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1. Análise dos resultados obtidos	59
4.1.1. Determinação da máxima potência térmica absorvida	59
4.1.2. Determinação da potência total perdida	59
4.1.3. Determinação da potência útil	61
4.1.4. Determinação da eficiência óptica.....	61
4.1.5. Determinação da eficiência térmica.....	61
4.1.6. Determinação da eficiência global.....	61
4.1.7. Cálculo do fator de concentração	61
4.2. Resultados dos testes realizados	61
4.3. Viabilidade econômica	70
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de interação da radiação solar com atmosfera terrestre	24
Figura 2.2: Focalização linear em função da geometria da superfície refletora (Queiroz, 2005).....	27
Figura 2.3: Focalização pontual em função da geometria da superfície refletora (Queiroz, 2005).....	27
Figura 2.4: Modelo de cavidade desenvolvida pela Ansaldo, na Itália, para a central europeia EURELIOS (Foto Ansaldo-1 979).....	29
Figura 2.5: Parte posterior dos heliostatos utilizados na central tipo torre de potência, denominada Solar One, localizada em Barstow, Califórnia, EUA	30
Figura 2.6: Receptor tipo cavidade de quatro aberturas, podendo operar na faixa de 510 – 565 °C de temperatura	32
Figura 2.7: Receptor tipo externo instalado na Central Solar One de Barstow, colocado no topo da torre de 77,1 m de altura	32
Figura 2.8: Esquema de central torre	34
Figura 2.9: Campo Solar CESA 1 em Almería – Espanha	35
Figura 2.10: Campo Solar SSPS-CRS em Almería – Espanha.....	36
Figura 2.11: Campo Acurex em Almeria – Espanha	36
Figura 2.12: Campo Ace em Almería – Espanha	37
Figura 2.13: Campo DISS em Almería – Espanha	37
Figura 2.14: Campo Solar 2 na Califórnia – EUA.....	38
Figura 2.15: Campo Solar NSTTF no Novo México – EUA	38
Figura 2.16: Protótipo Dish-Stirling nos EUA	39
Figura 2.17: Campo Solar do Instituto Weizmann em Rehovot – Israel	39
Figura 2.18: Campo Solar DSG System em Ben Gurion – Israel.....	40
Figura 2.19: Campo Solar Eurodish na Alemanha	40
Figura 2.20: Protótipos Dish-Stirling na Arábia Saudita.....	41
Figura 2.21: Concentrador cilindro-parabólico em operação	42
Figura 3.1: Curva plana	43
Figura 3.2: Esquema do balanço energético	44
Figura 3.3: Esquema do absorvedor	45

Figura 3.4: Curvas da primeira, segunda e terceira fileiras dos heliostatos.....	49
Figura 3.5: Desenho do campo de heliostatos	49
Figura 3.6: Estrutura do heliostato	50
Figura 3.7: Fixação dos espelhos.....	50
Figura 3.8: Heliostato montado	51
Figura 3.9: Focalizações do heliostato	51
Figura 3.10: Partes do cilindro após o corte	52
Figura 3.11: Absorvedor em processo de soldagem	52
Figura 3.12: Absorvedor do sistema.....	53
Figura 3.13: Absorvedor no topo da torre	54
Figura 3.14: Campo solar com sombreamento	55
Figura 3.15: Campo solar em seu formato final	55
Figura 3.16: Máxima temperatura coletada para o absorvedor sem carga	57
Figura 3.17: Modelo central torre solar em teste.....	58
Figura 4.1: Comportamento assumido das temperaturas máximas e médias do teste sem carga - Dia 1	64
Figura 4.2: Comportamento assumido das temperaturas máximas e médias do teste sem carga - Dia 2	64
Figura 4.3: Comportamento assumido das temperaturas máximas e médias do teste sem carga - Dia 3	65
Figura 4.4: Comportamento assumido das temperaturas médias dos três dias dos testes sem carga	65
Figura 4.5: Comportamento assumido das temperaturas máximas do teste com carga.....	68
Figura 4.6: Comportamento assumido das temperaturas médias do teste com carga - Dia 1	68
Figura 4.7: Comportamento assumido das temperaturas médias do teste com carga - Dia 2	69
Figura 4.8: Comportamento assumido das temperaturas médias do teste com carga - Dia 3	69
Figura 4.9: Comportamento assumido das temperaturas médias dos três dias dos testes com carga.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultados do teste sem carga - Dia 1	62
Tabela 4.2 - Resultados do teste sem carga - Dia 2	62
Tabela 4.3 - Resultados do teste sem carga - Dia 3	62
Tabela 4.4 - Médias dos três dias de teste sem carga do protótipo em estudo	63
Tabela 4.5 - Resultados máximos obtidos para o teste com carga	66
Tabela 4.6 - Resultados do teste com carga - Dia 1.....	66
Tabela 4.7 - Resultados do teste com carga - Dia 2.....	66
Tabela 4.8 - Resultados do teste com carga - Dia 3.....	67
Tabela 4.9 - Médias dos três dias de teste com carga do protótipo em estudo	67

SÍMBOLOS

Alfabeto Latino:

A_c	Área total da superfície de captação [m^2]
A_i	Área iluminada pela radiação refletida [m^2]
A_{iso}	Área isolada do absorvedor [m^2]
A_s	Área de sombreamento [m^2]
A_u	Área útil [m^2]
C	Fator de concentração da energia solar
E	Espessura do absorvedor [m]
GWh	Giga Watts-hora
h	Coefficiente de transferência de calor [$W/m^2 \cdot K$]
I_d	Radiação solar direta instantânea coletada pelo sistema de captação [W/m^2]
K	Condutividade térmica do ar [$W/m.K$]
k_{rd}	Fração da radiação refletida que chega ao absorvedor [%]
kW	kilo Watts
kWh	kilo Watts-hora
L	Comprimento do absorvedor [m]
MW	Mega Watts
Nu_D	Número de Nusselt
$P_{perdida}$	Potência perdida pelo absorvedor [W]
P_{abs}	Potência máxima absorvida que chega ao absorvedor [W]
P_{conv}	Potência perdida por convecção [W]
P_{iconv}	Potência perdida por convecção pela área iluminada do absorvedor [W]
P_{irad}	Potência perdida por radiação pela área iluminada do absorvedor [W]
P_{isocnv}	Potência perdida por convecção pela área isolada do absorvedor [W]
P_{isorad}	Potência perdida por radiação pela área isolada do absorvedor [W]
Pr	Número de Prandtl
P_{rad}	Potência perdida por radiação [W]
P_u	Potência útil do sistema [W]
r	Raio da área iluminada pela radiação refletida [m]

R	Raio da área isolada do absorvedor [m]
Re _D	Número de Reynolds
T _∞	Temperatura do ar [K]
T _{abs}	Temperatura absoluta no foco do absorvedor [K]
T _{amb}	Temperatura ambiente [K]
T _{iso}	Temperatura do isolante térmico [K]
V	Velocidade do ar [m/s]
W	Watts

Alfabeto Grego:

α_t	Absortividade do absorvedor [%]
ε_i	Emissividade do absorvedor [%]
ε_{iso}	Emissividade do isolante térmico [%]
η_g	Eficiência útil de conversão [%]
η_o	Eficiência ótica do sistema de captação da energia solar [%]
η_t	Eficiência de conversão térmica ou rendimento térmico [%]
ν	viscosidade cinemática do ar [m ² /s]
ρ	Refletividade do concentrador [%]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [5,67x10 ⁻⁸ W/m ² . K ⁴]

RESUMO

Apresenta-se um modelo de dois subsistemas de Centrais Torre Solar para a transformação da radiação solar em vapor. O primeiro subsistema é composto de 24 heliostatos tendo como bases de apoio em estruturas metálicas, móveis e adaptadas para acompanhar o movimento aparente do sol, sobre as quais foram montadas quatro segmentos de espelho plano focalizantes para cada heliostato, obtendo-se 96 espelhos de 2,0 mm de espessura e 150,0 mm de largura por 220,0 mm de comprimento, totalizando uma área de captação de energia solar em torno de 3,2 m². O segundo subsistema é constituído por uma torre, também de estrutura metálica e de simples locomoção, para que em seu topo se posicionasse um absorvedor de luz pintado externamente de preto fosco, sendo isolado termicamente em sua parte não iluminada pelos raios solares. Foram levantados dados da temperatura do absorvedor sem carga, como também do fluido contido em seu interior, para avaliação da eficiência térmica do sistema. A temperatura máxima alcançada no receptor sem carga foi de 500,8°C e a temperatura média para o intervalo de 5 horas para os três dias de testes foi de 461,2°C. A máxima temperatura de vapor d'água foi de 109,4°C para uma temperatura de 140,4°C na área iluminada do absorvedor. O resultado médio, para os três dias de testes, da temperatura de vapor d'água, foi de 106,8°C para uma temperatura média de 134,0°C na área iluminada do absorvedor. As médias de temperaturas de vapor d'água ficaram continuamente acima de 103,0°C. O modelo de Central Torre apresenta uma eficiência global de 51% e houve a vaporização em torno de 7,5 litros de água em cinco horas de operação. O modelo apresenta as características de fáceis processos de construção e montagem; e baixo custo, uma vez que a maioria dos materiais que compõem o sistema é de sucata, o que demonstra a viabilidade de tais subsistemas poderem constituir um sistema torre futuro.

Palavras chaves: central torre; energia solar; produção de vapor; baixo custo; energia elétrica.

ABSTRACT

It presents a model of two subsystems of Central Solar Tower for the transformation of solar radiation in steam for possible generation of electricity from small scale. The first subsystem is composed of 24 heliostats with the support bases of steel structures, mobile and adapted to track the apparent movement of the sun, on which were mounted four segments of plan mirror for each heliostat, yielding 96 mirrors, 2 mm thick and 150 mm wide by 220 mm in length, totaling an area of capture of solar energy around 3.2 m². The second subsystem consists of a tower, of steel structure and also of simple locomotion, to its top in an absorber is positioned outside of light painted matte black and is thermally isolated on its part not illuminated by sunlight. Data were collected in the temperature of the absorber without charge, but the fluid contained in its interior, to evaluate the thermal efficiency of the system. The maximum temperature reached in the absorber without load was 500.8° C and average result for three days of testing, of the temperature for was 461.2° C. The maximum temperature of water vapor was 109.4 ° C to a temperature of 140.4 ° C in the absorber. The average result for three days of testing, of the temperature of water vapor for an interval of 5 hours was 106.8 ° C to an average temperature of 134.0 ° C in the illuminated area of the absorber. The average temperature of water vapor was continuously above 103.0° C. The model of the Central Tower presents a useful efficiency of 51% and there was steaming around 7.5 liters of water in five hours of operation. The model has the characteristics of processes easy of construction and assembly and low cost, since most of the materials that compose the system of scrap, which demonstrates the feasibility of such subsystems can be a future tower.

Keywords: central tower; solar energy; production of steam; electric power; low cost.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do trabalho

Esse trabalho busca demonstrar a viabilidade de utilização de um modelo de sistema torre para geração de vapor, para uma possível geração de energia elétrica de pequena magnitude, a partir da radiação solar. O modelo proposto pode ser uma alternativa, na substituição de combustíveis de origem fósseis para o atendimento às demandas energéticas da humanidade, por energias alternativas, pelo uso de uma fonte energética renovável, num presente onde todas as nações desenvolvidas buscam soluções energéticas viáveis tecnologicamente, economicamente e ecologicamente corretas.

Diversos são os motivos que levam para essa possível troca, sendo o principal deles a ameaça do aumento insustentável da temperatura do planeta, em função da emissão indiscriminada de poluentes, decorrentes de fontes fósseis de energia. O presente trabalho, portanto, busca uma opção de substituição das energias convencionais sujas por uma fonte limpa e renovável de energia.

No Brasil quase não se tem informação de significativos investimentos em projetos para a substituição de tecnologias convencionais de energia, por aquelas que utilizam fontes renováveis e limpas. Atualmente não existe um único grande projeto que utilize a tecnologia que se estuda nesse trabalho, o que é uma situação preocupante, pois de acordo com o Balanço Energético Nacional (2009), o consumo de energia no Brasil cresceu 5,6 % em 2008 em relação a 2007.

Serão apresentados os processos de dimensionamento, construção, montagem e levantamento de desempenho de um modelo de baixo custo de dois, dos quatro, subsistemas de uma Central Torre. Tal modelo tem a necessidade de operar sob adequadas condições solarimétricas, ou seja, em períodos e em regiões de baixa ou nenhuma nebulosidade.

Segundo Filho (2008), o sistema é mais favorável nas regiões nordestinas do Brasil, uma vez que oferece uma média de horas de insolação da ordem de 300/ano. Segundo Martins, *et al* (2004), o Brasil por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial de energia solar durante todo ano.

A utilização da energia solar poderia trazer benefícios em longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento,

regulando a oferta de energia em situações de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera.

Este protótipo foi produzido para converter energia solar em vapor, com a perspectiva futura de utilizá-lo para acionar uma turbina que possa movimentar um gerador elétrico, convertendo, portanto calor em energia elétrica de baixa magnitude. Pode também ser usado simplesmente para aquecer e/ou vaporizar água para aplicações comerciais, doméstica e na manutenção das indústrias em zonas rurais e urbanas.

Os heliostatos do sistema proposto foram projetados a partir de resultados experimentais obtidos com vários modelos, optando-se pelo que apresentava uma maior eficiência, e processos de fabricação e montagem de significativa simplicidade. A determinação dos parâmetros geométricos do sistema foi também através de ensaios preliminares que levaram em conta os processos ópticos na captação e reflexão dos raios solares.

O modelo apresenta uma área de captação reduzida, da radiação solar, recoberto por 96 lâminas de espelho de 150,0 mm de largura por 220,0 mm de comprimento, totalizando uma superfície de concentração de 3,2 m². Cada heliostato utilizou-se de quatro lâminas de espelhos segmentados obtendo assim 24 heliostatos distribuídos em três fileiras, cada uma com oito unidades, e suas estruturas foram adaptados para um melhor direcionamento da radiação solar refletida para um foco pontual, que se localiza em um absorvedor, posicionado no topo de uma torre. O absorvedor foi pintado de preto fosco para melhorar, sua absorvidade e foi também termicamente isolado em sua parte não iluminada, para evitar assim as perdas de calor por convecção e por radiação.

Uma inovação deste trabalho foi a confecção do absorvedor do sistema, o qual foi projetado a partir de um reservatório para gás, utilizado em sistemas de refrigeração, que teve sua geometria cilíndrica alterada para permitir um menor volume de água em seu interior e minimizar as perdas de calor por convecção, em função da incidência do vento.

Antes de o sistema entrar em funcionamento, todos os heliostatos, foram previamente regulados, para acompanhar o seguimento do movimento aparente do sol. Durante o processo de análise foi constatado que os raios refletidos não direcionados ao absorvedor eram significativos para algumas regulagens, havendo assim a focalização de cada heliostato individualmente, evitando as perdas reflexivas.

No que diz respeito ao acompanhamento do movimento aparente do sol, o sistema de

captação dos raios solares foram regulados manualmente a cada 15 minutos para a realização dos testes, para garantir a radiação centralizada no seu foco, precisando ser melhorado para um sistema de automatização, com aquisição de dados, acoplados a um computador.

Para demonstrar a viabilidade de utilização do modelo de central torre foram coletados e analisados alguns parâmetros que traduzem a eficiência de um sistema solar para a produção de vapor, tais como: temperatura do absorvedor no foco iluminado pelos raios solares, do vapor d'água, do isolante térmico utilizado e do meio ambiente; como também a quantidade de vapor d'água produzido e a radiação solar direta; dos testes realizados.

Foram abordados neste trabalho os seguintes parâmetros: forma de obtenção das superfícies refletoras, da torre e do absorvedor em seu topo, o emprego de materiais de sucata, o processo de captação e reflexão da energia radiante, dentre outros.

Foram estudadas as viabilidades térmica, econômica e de materiais do protótipo de central torre, priorizando-se a conversão térmica.

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

O capítulo 1 descreve o trabalho desenvolvido, apresentando suas inovações e as contribuições que o mesmo poderá trazer para uma política de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis e limpas para uma possível geração de energia elétrica de baixa magnitude.

O capítulo 2 apresenta um estudo sobre energias com ênfase em uma revisão bibliográfica sobre as energias renováveis, principalmente a energia solar. Apresenta o estado da arte dos concentradores solares para a geração de energia elétrica, em especial para as centrais torre solares.

O capítulo 3 mostra o procedimento teórico e experimental, descrevendo os detalhes da construção, a relação dos materiais utilizados e o método experimental empregado na construção e diagnóstico do sistema de receptor central (CRS) ou sistema torre projetado.

O capítulo 4 exhibe os resultados alcançados no processo de experimentação, e as análises pertinentes relativas aos parâmetros levantados.

O capítulo 5 faz uma abordagem das conclusões e propostas em relação à análise dos resultados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Demonstrar a viabilidade de utilização de um modelo de central torre para uma geração de energia térmica a partir da fonte solar.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Projetar o modelo de central torre.
2. Descrever os processos de fabricação e montagem do modelo proposto utilizado para a vaporização de água.
3. Ensaiar o equipamento proposto evidenciando sua viabilidade térmica.
4. Demonstrar que a partir dos resultados obtidos com o modelo é viável a construção de um protótipo de sistema torre para a obtenção de energia elétrica de pequena magnitude a partir da fonte solar, através do uso de materiais alternativos de menor custo que os convencionalmente usados.
5. Incentivar o emprego de energias alternativas, limpas e renováveis, principalmente a energia solar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão abordados estudos e atuações praticadas em relação à realidade energética mundial, com ênfase em uma revisão bibliográfica sobre a importância das energias alternativas, em especial da fonte energética solar, e ainda sobre os concentradores solares de alta concentração desenvolvidos no mundo, nos quais o sistema proposto, de centrais torres solares, está inserido.

2.1. Energia

Energia é um conceito muito abrangente e, por isso mesmo, muito abstrato e difícil de ser definido com poucas palavras de um modo preciso. Usando apenas a experiência do nosso cotidiano, poderíamos conceituar energia como "algo que é capaz de originar mudanças no mundo", ou seja, é o potencial inato para executar trabalho ou realizar uma ação.

O termo “energia” foi introduzido na Ciência em 1807, por Thomas Young. A energia é à base da vida, tudo o que acontece à nossa volta é provocado por ela; nada acontece sem energia e não seria possível existir vida! Todos os seres vivos precisam da energia, pois está presente nas atividades do nosso dia-a-dia. Ela está em constante transformação como é definida na frase: “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma” escreveu o cientista Antonio Lavoisier, ao concluir que, numa reação química, os elementos que compõem as substâncias podem mudar de lugar, mas não desaparecem.

De acordo com Silvia (2008), a conclusão também se aplica à energia. Uma transformação energética sempre faz parte do processo pelo qual máquinas e equipamentos realizam o trabalho para o qual foram projetados. Um bom exemplo é o modelo aqui proposto, onde a energia solar proveniente do Sol torna-se energia térmica, que possa realizar o trabalho desejado para uma possível geração de eletricidade de pequena magnitude.

As fontes de energia se dividem em **primárias**, que são aquelas que vêm diretamente da natureza, como a energia solar, entre outras e **secundárias**, que são aquelas modificadas pelo ser humano. É o caso do modelo proposto onde a energia elétrica, pode ser gerada a partir de uma fonte primária (energia solar), para então ser transportada para o local de consumo.

2.1.1. Fontes de energia

As fontes de geração energética podem ser divididas em dois grandes grupos: **renováveis e não renováveis**.

As fontes de energia **não renováveis** são aquelas que estão disponíveis em quantidades fixa no planeta, como exemplo, o petróleo que na medida em que é consumido, pode se esgotar.

As fontes de energia **renováveis**, que, ao contrário, resultam de fenômenos cíclicos naturais, acarretando a renovação numa curta escala de tempo, caracterizam-se por serem inesgotáveis; também são designadas por energias não-fósseis ou alternativas, por não provocarem emissões poluentes e por estarem disponíveis um pouco por todo o país, como exemplo temos a radiação solar.

Também existe a co-geração de energia, que segundo Oddone (2001), é definida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil. Podendo promover a incineração de resíduos, como o bagaço de cana e pneus usados.

2.1.2. Consumo e geração de energia

Segundo Silvia (2008), em 2003 com cerca de 6,27 bilhões de habitantes do planeta, cientistas chegaram ao espantoso valor de 44 mil kcal por pessoa/dia, em média, para gastos energéticos. Em 2006, segundo previsões do Ministério de Minas e Energia, de todo o consumo energético no Brasil, mais de dois quintos (45%) foram de fontes renováveis: hidroeletricidade, cana de açúcar, outras biomassas (lenha, carvão vegetal) e outras renováveis. Porém, mais da metade da energia consumida no Brasil ainda vem de fontes não renováveis: combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão mineral) e urânio.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (2009), o consumo total de energia no Brasil, agregando todas as fontes energéticas, cresceu 5,6 % em 2008 em frente a 2007 e a oferta de energia renovável representou 45,3% do total da oferta de energia em 2008, caindo de 45,9% em 2007. A oferta de energia de fontes não renováveis aumentou para 54,7% do total em 2008 de 54,1% em 2007.

Segundo Sven (2008), as fontes limpas têm capacidade hoje de gerar 50% da energia necessária para o planeta. E um investimento pesado em renováveis poderia resultar numa indústria poderosa, com faturamento de US\$ 360 bilhões por ano.

A conservação de energia é cada vez mais empregada, no sentido de uso racional da

energia, consistindo num conjunto de procedimentos e técnicas para reduzir o desperdício e promover o uso mais eficiente da energia em todas as atividades realizadas pelo seres humanos. Portanto, economizar é essencial, pois a energia é um bem escasso.

2.1.3. Passado, presente e futuro energético

No princípio homens e mulheres das cavernas, possivelmente aproveitavam as queimadas das matas, provocados por raios para fazer tochas que mantinham sempre acesas, até descobrirem como fazer o fogo friccionando pedras e madeiras e assim aprenderam a usá-lo para cozinhar, se aquecer e entre outros.

Segundo Silva (2008), ao longo da história, os seres humanos foram descobrindo como também aproveitar outras fontes de energia para realizar determinados trabalhos. Eram sempre fontes já disponíveis na natureza. Gradativamente, outras fontes entraram em cena.

Silva (2008) demonstrou que nos séculos XVIII e XIX os seres humanos aprenderam a dominar a geração e a transmissão da eletricidade, permitindo captar energia num lugar diferente de onde é consumida. No século XIX, veio o motor a explosão, que usava a queima de combustíveis fósseis para movimentar veículos automotores. O petróleo - combustível fóssil não renovável - passou a imperar como a principal fonte de energia no mundo. Historicamente, poderosos grupos econômicos dominaram a extração e o refino do petróleo em vários países, sem favorecer populações locais.

Em 2001, ocorreu o “apagão”, a falta de eletricidade obrigou cidadãs e cidadãos a reduzirem o consumo em todo o país. As pessoas perceberam quanto desperdiçavam. E o governo optou por apoiar a construção de novas usinas termelétricas (a gás natural, óleo diesel, co-geração).

Um desafio das próximas décadas será desenvolver novos combustíveis de energia renováveis e não poluentes, ajudando, assim, a região e o país, pois postergam a necessidade de investir em novos projetos para produzir energia, que trarão novos impactos ambientais.

Através de uma política energética manipulada por cada país de acordo com a demanda de energias renováveis de cada um, em especial a solar, que é a única disponível em todas as nações, há a possibilidade de um futuro energético mais sustentável com a garantia da continuação da vida sem racionamento de energia. Isso é um desafio pra a sociedade atual.

2.1.4. O impacto ambiental

Atualmente, a utilização crescente de energia obriga ao consumo irracional de recursos energéticos, na sua maioria combustíveis fósseis, provocando conseqüências ambientais, tais como as alterações climáticas.

Os impactos ambientais no uso das fontes atuais, não renováveis, como emissões de gases de efeito estufa e vários tipos de poluentes. Também há impactos durante a produção e o transporte desses combustíveis. A saída é apostar em combustíveis que gerem menos emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com Silva (2008), o setor energético é responsável por lançar na atmosfera três quartos (75%) do dióxido de carbono (CO₂) gerado por atividades humanas. A concentração em excesso de CO₂ e outros gases de efeito estufa é o principal responsável pelo aquecimento global. Reduzir essas emissões, seja pela diminuição do consumo, pela busca de eficiência energética ou investimento em fontes de energia alternativas, menos impactantes, tornou-se um grande desafio.

Vale lembrar que, em grandes derramamentos de petróleo, além da morte de peixes, moluscos e plantas marinhas, muitas aves podem sucumbir quando tentam mergulhar para capturar um peixe. Atividades econômicas, como a pesca, também são inviabilizadas.

No Brasil, o ano de 2001 foi marcado por dois desastres com plataformas da Petrobrás: o afundamento da P-36 e o acidente com a P-7, que despejaram milhões de litros de óleo na Baía de Guanabara (RJ) e em Araucária (PR), com prejuízos à vida, à economia local e à empresa, passou a investir fortemente na segurança ambiental.

Segundo Silva (2008) em 1973, houve a primeira crise do petróleo, a principal fonte de energia no mundo. Novas fontes começaram a ser buscadas. Na mesma época, começaram se multiplicar os alertas para o perigo do aquecimento global do planeta. Nos anos 1980, nasceu a expressão desenvolvimento sustentável, que une aspectos econômicos, ambientais e sociais, e propões explorar os recursos existentes de um modo responsável, para garantir a disponibilidade para as próximas gerações.

Em dezembro de 2009, mais de 200 nações, de todo o mundo, se reunirão em Copenhagen, na Dinamarca, para definir o acordo que sucederá o Protocolo de Kyoto em 2012. O que defende que todos os países signatários se comprometam a investir US\$ 140 bilhões em medidas contra o aquecimento global anualmente e a cortar as emissões em 40%, em relação aos níveis de 1990 (www.greenpeace.org).

O grande desafio dos técnicos é a conquista da eficiência energética, ou seja, promover o aproveitamento total do combustível para o fim desejado. Enquanto essa conquista não se torna real, temos que optar por substituir pelo menos parte desse combustível poluente por fontes alternativas de energia que são renováveis de baixo impacto ambiental. Por exemplo, a utilização da radiação eletromagnética emanada do sol para a produção de calor e potência, por ser considerada uma energia pura, não poluidora, não lança fumaça e nem resíduos radioativos. Sendo uma maneira ideal de energia para proteção do meio ambiente.

2.2. Energias renováveis

Segundo Silva (2008), o Brasil tem oito mil de quilômetros de costa; sol diário e ventos intensos; 12 % da água doce do Planeta e um enorme potencial de energias “limpas” (não poluentes) a explorar.

Atualmente as energias renováveis mais utilizadas em todo o mundo, com massiva aplicação de recursos para seus desenvolvimentos, são a solar, a eólica e a biomassa, sendo a eólica a fonte que na última década apresentou maior nível de crescimento.

O Brasil é extremamente privilegiado em relação a potenciais energéticos renováveis e hoje é considerado o país que mais utiliza energia limpa a para a geração de energia, principalmente pelo massivo uso da fonte hidrelétrica para a geração de energia elétrica. Principais energias renováveis: Energia hidrelétrica, Biomassa “tradicional”(lenha, carvão vegetal), Biomassa” moderna “(produção de álcool e biodiesel), Energia eólica, Energia solar entre outras.

Apesar dos investimentos serem ainda extremamente poucos o Brasil está dando contribuições concretas para a luta contra a mudança do clima. O nosso país subscreveu também as Metas do Milênio, compromisso partilhado dos países em prol de uma ação conjunta do governo e sociedade pela sustentabilidade. Está claro que quanto mais eficientes forem os processos de geração e transmissão de energia, menor o desperdício de recursos naturais e o impacto ambiental. Só que a opção por tecnologias mitigadoras, preventivas, ou mesmo a mudança de postura, depende do que a sociedade valoriza.

Quanto aos prejuízos ambientais e desperdícios não são cobrados dos usuários, a tendência é preferir opções aparentemente “mais baratas”, “mais cômodas”. Mas o preço será pago lá na frente pela sociedade, quando for preciso combater os prejuízos sociais e

ambientais não evitados.

Soluções criativas devem fazer parte do planejamento. Por exemplo, algumas cidades da Alemanha, Espanha e EUA decidiram incentivar a instalação de painéis solares nos telhados das casas como elemento da política energética. Cada casa que aderiu a esse sistema produz um pouco de energia solar. Quando a quantia supera o gasto, a casa fornece eletricidade para a cidade (e recebe dinheiro). Quando a quantia é menor que o consumo, usa energia da rede (e paga pelo consumo). Com isso, ganhou o consumidor e o meio ambiente. Além disso, quando existe a produção em grande quantidade, o custo dos painéis fica mais baixo.

2.3. Energia solar

A energia solar é uma das formas mais limpas de geração de energia por não produzir poluição térmica nem química. É disponível em grande quantidade, trata-se de uma fonte renovável e praticamente inesgotável.

A tecnologia envolvida para o aproveitamento da energia solar é bastante simples e está ao alcance de quase todos os países. Os raios solares atingem todas as partes da superfície e da atmosfera terrestre, sendo que o uso da energia solar é particularmente importante nas regiões de difícil acesso, sem esquecer que é a responsável pela maior parte da energia existente no mundo, todas as outras fontes de energia dependem dela.

Ela é proveniente de um conjunto de reações de fusão termonucleares que ocorrem no núcleo do Sol. Segundo Souza (2002), o Sol emite uma enorme quantidade de radiação, em torno de 62,8 MW de energia eletromagnética que são lançados no espaço.

Ao deslocar-se pelo espaço, com a velocidade da luz, essa energia, chegar à parte exterior da atmosfera terrestre com uma intensidade média de $1,36 \text{ KW/m}^2$, ao passar pela atmosfera parte dela, é absorvida e espalhada por ela e refletida pelas nuvens e pela superfície da Terra, chegando à superfície terrestre, em dia de céu limpo, com cerca de 1000 W/m^2 de energia radiante por unidade de área perpendicular ao feixe de raios.

O potencial solar incidente nas Massas Continentais da Terra é cerca de mil vezes o consumo de energia da humanidade. Esses dados demonstram a importância de investimentos massivos para a utilização desse imenso potencial, ainda mais pelo fato do Brasil ser privilegiado em relação ao potencial solar.

A Figura 2.1, mostra os efeitos da atmosfera sobre a radiação solar.

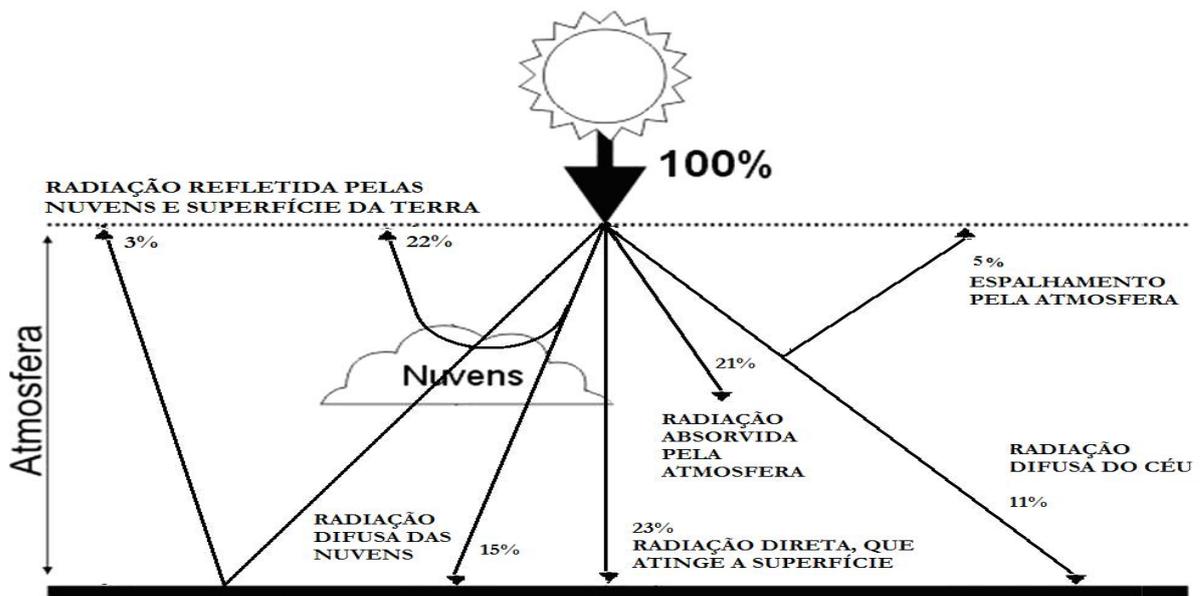


Figura 2.1. Esquema de interação da radiação solar com atmosfera terrestre.

Como demonstra na Figura 2.1, a radiação solar é de natureza **direta** e **difusa**, a soma destas duas radiações é a radiação **global**. A radiação solar direta é aquela proveniente do disco solar para os respectivos dias de insolação e que não sofre interação com a atmosfera terrestre, enquanto a difusa é toda aquela oriunda da atmosfera. A radiação solar global é aquela proveniente do conjunto do hemisfério aparente diurno da esfera celeste.

A energia solar provém da luz do sol e depois de captada pode ser transformada em energia térmica e/ou elétrica. Há duas formas a explorar essa energia, podendo ser transformada **direta** ou por via **indireta** em energia elétrica.

Na conversão **indireta** é necessária uma prévia transformação da energia solar em outra forma de energia, que posteriormente será transformada em energia elétrica. Segundo Chwiedck (2004), no caso da utilização da radiação indireta considera-se o uso das energias renováveis que são efeitos secundários da energia solar, ou seja, a energia eólica, energia hidráulica, energia das marés, e processo fotossintético que está na sua maioria relacionada com a utilização de biomassa e de bicomcombustíveis.

Já o uso da energia solar de forma **direta**, pode-se aplicar dois métodos fundamentais conversão de energia: **fototérmica** e **fotoelétrica**. Os sistemas **fototérmicos**, têm aplicações à baixa temperatura do Sol, colaborando para diminuir o consumo energético das fontes convencionais, principalmente, como no caso do aquecimento de água domiciliar. E os

sistemas **fotoelétricos** podem causar geração fotovoltaica de energia que na presença de um campo elétrico, os portadores de carga podem produzir corrente.

Segundo Filho (2008), o uso da energia solar se torna viável pelo significativo baixo custo e pela sua qualidade, por ser praticamente idêntica à radiação do corpo negro a 6.000 °K, ou seja, possui uma qualidade termodinâmica muito alta (95%) que é a convertibilidade em trabalho.

Segundo Queiroz (2005), os países tropicais, devido a suas posições geográficas, possuem grande potencial energético, sendo, portanto, bastante favoráveis ao uso de equipamentos solares. O Brasil, apresenta significativo potencial solar com disponibilidade equivalente a $1,13 \times 10^{10}$ GWh, em quase todo o ano, como acontece no nordeste.

Assim a energia radiante fornecida pelo Sol, pelo calor dos raios solares, em sua aplicação térmica, onde a forma de energia necessária ao processo final é o calor, pode aquecer a água; secar frutas por radiação direta que já era utilizada pelo homem desde tempos imemoriais; cozer e assar alimentos através de fornos e fogões solares e etc., por meio de uma tecnologia simples e barata para residências e empresas, até mesmo na geração de eletricidade, por meio de concentradores solares e de células fotovoltaicas. A primeira aplicação prática da energia solar foi, segundo Bezerra (2001), a dessalinização da água salobra.

As nações têm despertado o interesse na pesquisa da energia solar, por ser a mais difundida fonte de energia renovável em todo o mundo. Pois ela vem acabar com a crise energética, com suas varias utilidades. Atualmente existem numerosas estações solares de grande importância sócio-econômico na França, Japão, Israel, Índia, Estados Unidos etc.

Porém os inventos solares não oferecem condições para aplicações práticas imediatas, sendo um problema no uso da energia solar, pois os meios de captar essa energia têm ainda um custo inicial caro, dificultando sua competição com aplicações que utilizam as energias convencionais e ela precisa ser acumulada, pelo fato de nem sempre se encontrar disponível.

Portanto, atualmente, pode-se utilizar a tecnologia solar no Brasil, pelo país ser altamente privilegiado, principalmente nas regiões norte e nordeste quanto ao recebimento dessa energia, no campo da baixa e média temperatura, enquanto esperamos o estágio da tecnologia que venha proporcionar a execução de projetos, como por exemplo, as centrais solares de milhares de MW, dentro de padrões economicamente oportunos por ser um investimento alto, porém devemos levar em consideração varias vantagens favoráveis a

instalação desses sistemas.

Esta fonte alternativa pode ser de grande importância a uma política de economia de energias convencionais, as usinas solares consomem pouco ou quase nenhum combustível, sendo livre de ônus, economizando bilhões de dólares ano após ano havendo somente o pequeno custo do gás natural para acionar os sistemas de ar comprimido, que pode ser substituído por hidrogênio ou bicomcombustíveis.

2.4. Dispositivos solares

As possibilidades da utilização do calor solar podem ser diferenciadas de acordo com o fator de concentração e capacidade de produção. Assim a captação de energia solar é feita utilizando-se dispositivos solares, que utilizam a radiação eletromagnética produzida pelo Sol, denominados de coletores, que se dividem em coletores de baixa, média e altas concentrações.

Os **coletores de baixa concentração** são aqueles que permitem obter temperaturas de até 100°C. Enquadram-se nessa classe os coletores de placa plana para aquecimento de líquidos, os secadores solares e os destiladores solares.

Os **coletores de média concentração** são dispositivos baseados em superfícies refletivas formadas por segmentos planos devidamente dispostos a formar no conjunto, uma determinada curva, geralmente um segmento parabólico, que permitem obter uma zona fortemente iluminada, denominada foco, na qual está posicionado o absorvedor e permitem a obtenção de temperaturas no foco do sistema entre 200°C e 400°C.

Para temperaturas acima de 400°C as superfícies refletoras desses coletores exigem uniformidade e acabamento perfeitos. Sendo adequados para a produção de vapor para fins industriais; a movimentação de pequenas potências, a cocção de alimentos, entre outras.

Os **coletores de alta concentração** admitem obter altas temperaturas, através da superposição de inúmeras imagens do sol, em uma determinada área denominada foco do sistema, o que é feito por meio da reflexão da radiação. Os sistemas óticos utilizados na obtenção das altas temperaturas são sistemas parabólicos que têm a propriedade de concentrar toda a radiação incidente em uma zona situada no plano focal.

Os sistemas de alta concentração são plantas compostas pelos campos solares com uma produção de mais de 1MW. Com o avanço da tecnologia têm-se as centrais torre solares com receptor central para a produção de até mais de 100 MW permitindo obter temperaturas da ordem de 3600°C. Esses sistemas possuem um elemento de captação da radiação solar

representado por campos de espelhos, o que acompanha o movimento da Terra, e outro elemento fixo denominado concentrador, em ambas o foco do sistema permanece invariável, graças ao campo que acompanha o movimento aparente do sol.

As superfícies cilíndricas ou cilíndrico-parabólicas e as superfícies cônicas permitem obter foco linear. As superfícies esféricas, semi-esféricas e parabolóides e as superfícies parabólicas formadas por segmentos de espelhos planos tencionados produzem focos pontuais. As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam, respectivamente, os princípios de focalização linear e pontual em função da geometria do coletor.

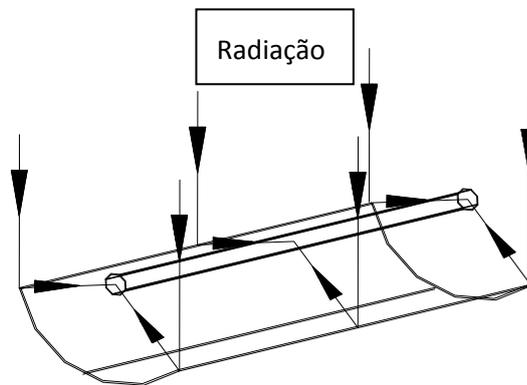


Figura 2.2. Focalização linear em função da geometria da superfície refletora (Queiroz, 2005).

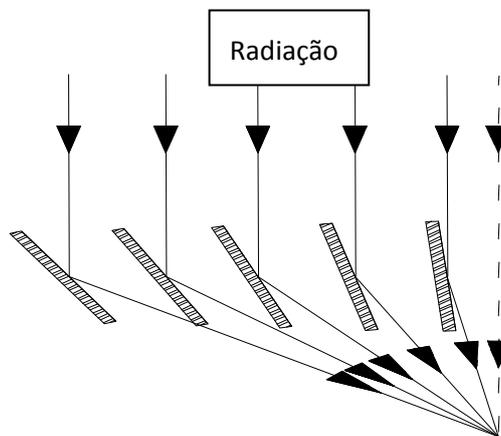


Figura 2.3. Focalização pontual em função da geometria da superfície refletora (Queiroz, 2005).

Portanto, o princípio de funcionamento destes coletores é o de concentrar radiação solar mediante procedimentos ópticos, antes de sua transformação em calor. Dessa forma, a radiação solar incidente no concentrador através de uma superfície é refletida, sendo refratada ou absorvida por uma superfície menor, para em seguida ser transformada em energia térmica.

Os coletores concentradores são formados por uma superfície refletora (espelho, alumínio, etc.) que capta a radiação solar e a concentra no foco. Os raios refletidos são

enviados a um receptor, que os absorve, transformando em calor, que em seguida é transferido a um fluido de trabalho.

Tem-se ainda a geração fotovoltaica que apresenta um grande potencial e parece ser um dos mais atrativos modos de obtenção de energia no futuro. O emprego das pilhas fotovoltaicas constitui uma maneira de converter a radiação solar incidente, diretamente em energia elétrica. No Brasil, são mais utilizados nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos são atualmente mais confiáveis e econômicos que muitas outras tecnologias energéticas por serem independentes, descentralizados e pelas alternativas de aplicabilidade, gerando uma gama de produtos para consumo. A área necessária, para painéis fotovoltaicos para cada GWh é menor que uma usina a carvão (www.sciam.com.br).

2.5. Sistemas termosolares de concentração (STC)

Sistemas Termossolares de Concentração (STC) convertem a componente direta da energia primária solar em outra forma de energia inclusive na energia elétrica, para seu imediato emprego ou armazenamento; melhoram a eficiência energética, reduzem o consumo de energia e de CO₂ na atmosfera.

Os STC se dividem em três sistemas: os sistemas de receptor central (CRS) ou sistemas de torre, os discos parabólicos (DP) ou discos stirlings e os coletores cilindros parabólicos (CCP). Os dois primeiros concentram a radiação solar em um ponto (foco pontual), obtendo assim maiores temperaturas comparadas ao último que concentra em um eixo (foco linear). Estes sistemas se utilizam da radiação direta, céu claro e sem nebulosidades.

2.5.1. Centrais torre solares

As centrais torre solares ou sistemas de receptor central (CRS) são assim designadas por terem um receptor de luz (absorvedor) montado no topo de uma torre, a qual possibilita posicioná-lo no campo de visualização de todos os espelhos, a todas as horas do dia.

Possuem heliostatos instalados no solo que são direcionados de modo a refletir a componente direta da luz solar sobre um foco pontual, no qual concentram a radiação solar direta, convertendo a energia solar em energia térmica e posteriormente transformando-a em energia elétrica por meio do fluido de trabalho quente que é então transferido a uma

tubulação acoplada a um alternador, que produz eletricidade. Uma fonte fria deve ser providenciada, como em qualquer processo de conversão termodinâmica.

O armazenamento de vapor também deve ser providenciado, pelo menos para compensar breves intervalos de nebulosidade acima dos espelhos. A concentração de radiação é trabalhada para fornecer uma temperatura de 500-1000 °C, dependendo da sua utilização.

Arquimedes pode ter usado este efeito para por fogo na frota romana que sitiou Siracusa. Ele se utilizou da idéia, que se todo um exército fosse dotado de espelhos planos de modo a concentrar a luz solar refletida num só navio, sem dúvida teria sido possível incendiar este navio. Esta história foi narrada pelo poeta grego Tzetzes, mas não se sabe se foi baseada em fato histórico.

De acordo com outra lenda, Proclus tentou usar a mesma técnica contra a frota de Vitaliano que sitiava Bizâncio. Vários inventores sucessivos da concentração por espelhos facetados são conhecidos, a saber: Anthemius, arquiteto da Hagia Sofia, em Bizâncio, Kircher, que viveu no século XVII, e Buffon, um século depois.

Desde 1968 a França construiu a primeira usina utilizando um sistema torre solar. A Figura 2.4 mostra um modelo, para a central européia EURELIOS, em escala reduzida. No interior da cavidade, um tubo de aço inoxidável está disposto de maneira a recobrir uniformemente a superfície interior do receptor. O fluido transportador de calor circula no interior do tubo, que está ligado a um gerador de eletricidade. O modelo foi testado com sucesso em 1978 (Schramek, 2006).



Figura 2.4. Modelo de cavidade desenvolvida pela Ansaldo, na Itália, para a central européia EURELIOS (Foto Ansaldo-1 979).

Como qualquer concentrador solar, os CRS's só podem aproveitar a radiação direta, o que exige que campos de heliostatos, que compõe o primeiro subsistema das centrais torre, se modificam automaticamente em relação a sua posição durante o dia para que em todo momento reflitam a radiação solar direta que eles incidem para um receptor situado a uma altura sobre o terreno no qual estão os espelhos, de forma que toda energia seja transferida ao ponto central por transmissão óptica.

Para mover o heliostatos, meios eletrônicos são utilizados: cada espelho recebe periodicamente ordens emitidas por programa incorporado a um computador central. Movimento este adquirido por meio do giro em torno de dois eixos paralelos ao seu ponto focal. Para o eixo vertical o giro é em torno de $\pm 270^\circ$ e para o eixo horizontal em torno de $\pm 90^\circ$.

A superfície total de um heliostato na maioria das vezes, é decomposta num certo número de elementos focalizantes que são ajustados individualmente, na direção do foco. Quanto maior o número de heliostatos maior será o fator de concentração, aumentando assim significativamente a eficiência do sistema. A Figura 2.5 mostra um heliostato de espelhos planos.

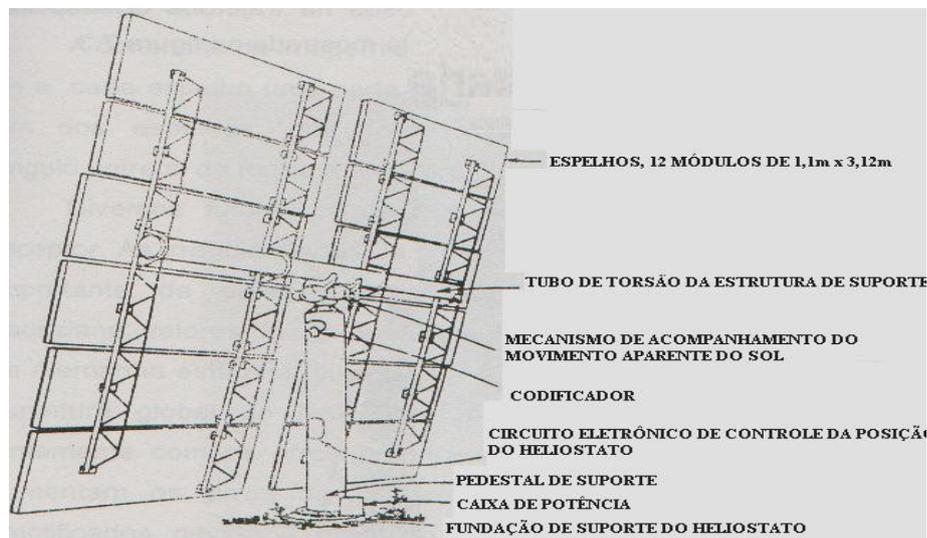


Figura 2.5. Parte posterior dos heliostatos utilizados na central tipo torre de potência, denominada Solar One, localizada em Barstow, Califórnia, EUA.

Os heliostatos dos sistemas torre podem ser formados de espelhos planos ou por espelhos tensionados, os quais são ajustados a distância focal respectiva. Se os heliostatos não fossem focalizantes, mas se comportassem como um só espelho plano sua superfície teria uma perda de emissão radiativa acrescida. Sendo assim é desejável a focalização dos heliostatos, com também não é aconselhável a utilização de espelhos parabólicos nesse tipo de sistema

torre, pois as imagens refletidas por eles não se formam exatamente no mesmo ponto dando origem no plano focal a uma zona de menor luminosidade, o que de certo modo afetaria a concentração energética.

Os heliostatos são organizados ao norte e ao redor da torre em sistemas amplos, sendo importante que cada círculo seja composto de uma mesma área de espelho para uma geometria do campo onde os espelhos fiquem dispostos em círculos concêntricos; sendo os espelhos menores no círculo exterior e os maiores, no interior, de modo a compensar a divergência dos feixes quando são dirigidos ao receptor.

É preciso um cuidado especial no projeto de um sistema torre para as questões do sombreamento e bloqueio, pois segundo Schramek (2006), ocorrerá o bloqueio, onde parte de alguns raios refletidos de um heliostato para o ponto central são interrompidos por outro heliostato e o sombreamento sobre os espelhos. Para garantir plena operação a partir das 8:00 horas há a necessidade que as bordas dos espelhos estejam a uma distância regular uma das outras, reduzindo assim os efeitos de sombra e bloqueio.

O segundo subsistema das centrais torre é composto por um receptor situado no topo de uma torre, onde o mesmo é deslocado ligeiramente para o sul, com o campo de heliostatos ficando posicionado ao norte. A instalação da torre à margem do campo na direção sul, consiste em remeter a radiação pelo campo sobre o receptor de luz na direção do Sol, ao sul, pois do lado Sul, o efeito sombra é mais forte que no lado norte. O ideal seria que ao sul não se colocasse espelho ou deixasse esse lado mais vazio. Melhora-se ainda o ensobrecimento instalando-se os espelhos em ladeira.

Dentro do receptor, a luz é absorvida por um receptor negro, em que um fluido de trabalho é aquecido, convertendo desta forma a radiação solar em energia térmica, ou seja, na forma de calor. O absorvedor de luz é uma unidade de pequeno volume, facilmente integrável num ciclo de conversão de energia. Como o aquecimento do fluido de trabalho ocorre dentro do absorvedor de luz, ele deverá ter a máxima absorvidade de luz solar por todo o espectro de interesse, particularmente no visível e no infravermelho superior. Pode-se atingir 98% de absorção num “corpo negro”. Quanto mais elevado, melhora eficiência, pois há uma minimização dos problemas de interferência destrutiva entre os espelhos vizinhos.

Existem dois tipos de receptor: o de cavidade e sem cavidade. O receptor de cavidade tem uma abertura onde penetram os raios solares refletidos. Já o receptor sem cavidade tem recepção energética exterior, portanto absorve a energia solar por toda sua parte externa, ou

seja, tem a nítida vantagem, pois é visível em todas as direções sendo bem menor e mais leve que o de cavidade. Entretanto, suas perdas térmicas, por convecção e radiação são maiores em relação ao receptor de cavidade, pois emite uma radiação infravermelha que é função da temperatura de regime e esta emissão intervém juntamente com a convecção, como perda no balanço térmico. Podendo atenuar-se as perdas, utilizando um isolamento térmico em sua área não iluminada pelos raios solares.

Não há uma significativa diferença entre as eficiências ópticas e térmicas para os dois tipos de receptores, porém o receptor sem cavidade apresenta melhores resultados no que diz respeito à absorção dos raios refletidos pelo campo heliostático. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram, respectivamente, um receptor de cavidade e um sem cavidade.

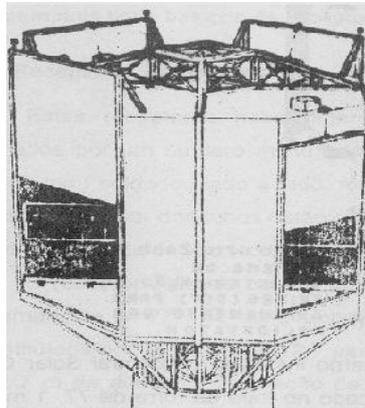


Figura 2.6. Receptor tipo cavidade de quatro aberturas, podendo operar na faixa de 510 – 565 °C de temperatura.

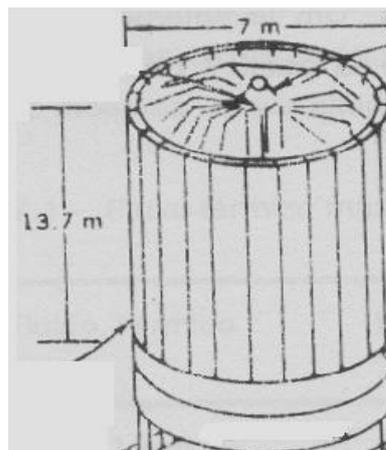


Figura 2.7. Receptor tipo externo instalado na Central Solar One de Barstow, colocado no topo da torre de 77,1 m de altura.

É importante, para um bom rendimento da central que o fator de concentração da radiação no absorvedor seja elevado, e a parte iluminada de pequena dimensão para que as

perdas térmicas sob a forma de infravermelho não sejam excessivas. A altura da torre evidentemente deve aumentar com a potência da central, quer dizer, com o diâmetro do campo.

Enviar radiação na direção do Sol tem uma consequência direta para a altura da torre que sustenta o absorvedor. As centrais atuais que empregam uma cavidade de potência de 0,5 a 2 MW têm um campo de heliostatos pequeno o bastante para que uma altura de cavidade de 50 a 80 m em relação ao solo, baste. Já uma central de 10 MW exigiria uma torre ao sul do campo de uma altura de cerca de 120 m, bem como uma considerável abertura da cavidade, e, portanto, uma cavidade pesada.

Como em todos os sistemas de energia solar deve-se atentar para o tema do armazenamento da energia. É necessário proporcionar um armazenamento térmico, pelo menos para curtos períodos, de modo a evitar a perda de tempo que de outro modo ocorreria após uma ocasional paralisação, por falta de insolação, enquanto a instalação não atingisse novamente sua temperatura de operação.

O armazenamento do calor por curto período pode ser efetuado por tijolos refratários, óxidos cerâmicos (MgO, etc.), sais fundidos (NaNO₃ funde a 260°C; HITEC, uma mistura fusível de sais, é estável até 540°C), enxofre (líquido entre 113°C e 444°C) ou metais como mercúrio (líquido entre 39°C e 357°C), lítio (líquido entre 180°C e 1400°C) sódio (líquido entre 98°C e 880°C). Alguns materiais orgânicos são também adequados, até 300°C. Os projetos atuais se concentram no armazenamento HITEC e sódio, que em alguns casos servem simultaneamente como fluido de trabalho no circuito primário. A central européia EURÉLIOS, por exemplo utiliza um circuito a vapor no qual uma parte do fluido pode ser armazenada sob a forma de água pressurizada levada a 400°C.

Via de regra, o subsistema de geração de energia e a unidade de armazenamento de calor são muito grandes e pesados para serem montados perto do receptor no topo da torre. É usualmente mais conveniente montá-los no solo, com o meio de trabalho constantemente circulando acima e abaixo da torre em ductos isolados. Uma usina de 100 MW implica em 130 toneladas de tubulação, juntas de expansão, isolamento e fluido de trabalho.

Em vista destes problemas de armazenamento oriundos da intermitência da luz solar, uma caldeira convencional queimando gás natural poderia ser associada com uma usina solar de central torre. A caldeira de combustível forneceria energia sempre que a demanda excedesse a capacidade da unidade de armazenamento, durante a noite, ou com tempo

nublado. Também compensaria as variações sazonais de insolação. Um sistema híbrido deste tipo pode ser construído economicamente acrescentando a caldeira ao circuito de trabalho. Assim, pode-se proporcionar calor à unidade geradora a partir da caldeira a combustível, ou do absorvedor solar.

Portanto, as **centrais torre solares** são subdivididas em **quatro subsistemas**, quais sejam:

1. **Conjunto de espelhos planos** separados instalados no chão e orientados de modo a refletir a componente direta da luz solar a um absorvedor, montado no topo de uma torre;

2. **Torre com o receptor central** em seu topo, a qual possibilita posicionar o absorvedor no campo visual de todos os espelhos, a todas as horas do dia, nos quais o fator de concentração é tanto maior quanto maior for o número de espelhos e no receptor, a luz é absorvida por um receptor negro em que um fluido de trabalho circula e é aquecido;

3. **Dispositivo de acumulação de calor** que armazena o calor pelo menos para compensar curtos períodos de nebulosidade e durante a noite, onde o fluido de trabalho quente é transferido a uma tubulação acoplada a um gerador de eletricidade;

4. **Gerador elétrico** que produz eletricidade e uma fonte fria deve ser providenciada, como em qualquer processo de ciclo de conversão termodinâmico.

A Figura 2.8 mostra um esquema de uma Central Torre Solar.

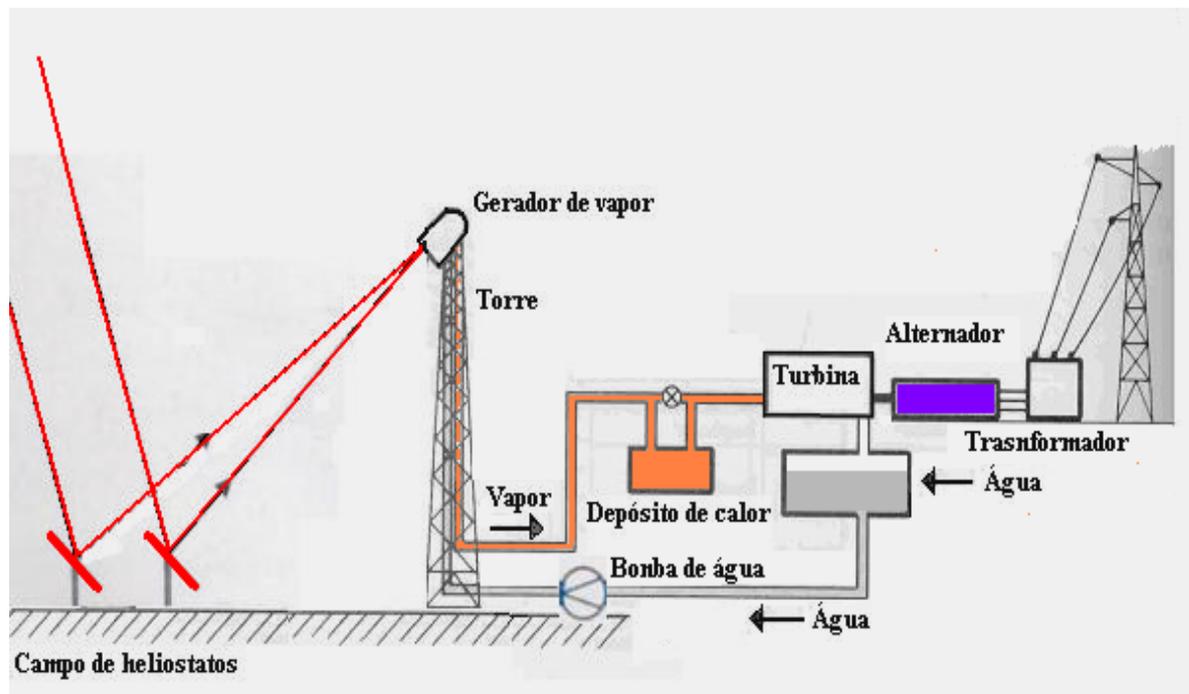


Figura 2.8. Esquema de central torre.

2.5.2. Concentradores no mundo

Segundo Xiping (1994), o uso de concentradores para captar energia solar, remonta pelo menos dois séculos antes de Cristo, quando Arquimedes havia repellido um ataque romano a Siracusa.

A seguir são apresentados vários projetos de alta concentração, em operação, utilizados em vários países do mundo (Filho, 2008, Lion, 2007, Queiroz, 2005):

Espanha:

Campo CESA 1, 1,2 MW, Almería: Este campo tem como origem uma planta de produção de eletricidade com receptor central de vapor superaquecido que entrou em operação em 1983. Está localizado na Plataforma Solar de Almería. Conta com um total de 300 heliostatos de 40 m². A Figura 2.9 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.9. Campo Solar CESA 1 em Almería – Espanha

Campo SSPS-CRS, 0,5 MW, Almería: Este campo tem como origem uma planta de produção de eletricidade com receptor central de sódio. Opera com o nome de Plataforma Solar de Almería. Possui 92 heliostatos com 40 m² cada. A Figura 2.10 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.10. Campo Solar SSPS-CRS em Almería – Espanha.

Campo Acurex, 0,5 MW, Almería: Este campo cilindro parabólico, consta de 20 filas de 80 m de comprimento cada uma com orientação Leste-Oeste e sistema de seguimento solar em um eixo. A abertura dos coletores é de 1,83 m, e a superfície de captação deste campo é de 2674 m². A Figura 2.11 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.11. Campo Acurex em Almeria – Espanha.

Campo Ace 20, 50 kW, Almería: Este campo de coletores são de 2,5 m de abertura e 132,5 m de comprimento foi construído na Plataforma Solar de Almería com o objetivo de alcançar temperaturas em torno dos 300°C mediante um coletor cilindro-parabólico de baixo custo. A Figura 2.12 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.12. Campo Ace em Almería – Espanha.

Campo DISS, 0,5 MW, Almería: Este campo é constituído por um concentrador solar cilindro-parabólico de 500 m de comprimento e 5,76 m de abertura. A superfície de captação deste campo é de 2880 m². A Figura 2.13 mostra a usina solar descrita.



Figura 2.13. Campo DISS em Almería – Espanha.

USA:

Campo Solar 1, 10 MW, Califórnia: Planta com receptor central de vapor saturado.

Conta com 1926 heliostatos. Entrou em funcionamento em 1984, e esteve operativo até o final da década de 80. No ano de 1996 foi transformado em planta de sais fundidos.

Campo Solar 2, 10 MW, Califórnia: Sobre o mesmo campo de heliostatos e torre do Campo Solar 1 se realizaram as reformas necessárias para ensaiar um novo receptor e sistema de geração de sais fundidos. Entrou em funcionamento em 1996 e operou até abril de 1999. Permitiu demonstrar a viabilidade técnica dos sais fundidos e do armazenamento térmico em dois tanques, um frio e outro quente. A figura 2.14 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.14. Campo Solar na Califórnia – EUA.

Campo NSTTF, 1,5 MW, Novo México: Centro de Investigação e Ensaio em Albuquerque. É operado pela Sandia National Laboratories para o Departamento de Energia de U.S.A. Seu funcionamento como centro de ensaios começou em 1978. Conta com 222 heliostatos de aproximadamente 40 m² cada um. A Figura 2.15 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.15. Campo Solar NSTTF no Novo México – EUA.

Protótipo Disco Stirling de 25 kW desenvolvido por um consórcio no qual participam o Departamento Norte-americano de Energia (DOE), e Boeing entre outros. A Figura 2.16 mostra o protótipo desenvolvido.



Figura 2.16. Protótipo Dish-Stirling nos EUA.

Israel:

Campo do Instituto Weizmann, Rehovot: Centro de Investigação. Foi inaugurado em 1988. Conta com 64 heliostatos com superfície refletora de aproximadamente 55 m² cada. A Figura 2.17 mostra o campo solar descrito.



Figura 2.17. Campo Solar do Instituto Weizmann em Rehovot – Israel.

DSG System, 0,5 MW, Ben Gurion: Instalação composta por 20 módulos LS3 de 25 m de comprimento e 6,76 m de abertura, para ensaios de tubos absorvedores e produção direta

de vapor. A Figura 2.18 mostra o campo solar DSG (Direct Steam Generation) descrito.



Figura 218. Campo Solar DSG System em Ben Gurion – Israel.

Europa:

Atualmente, um consórcio Europeu no qual participa a Inabensa, elabora melhoras que impliquem no barateamento destes sistemas com projetos de desenvolvimento do protótipo Eurodish. Este protótipo que incorpora um motor Stirling da companhia Alemã Solo, foi desenhado especificamente para este tipo de aplicação solar. A Figura 2.19 mostra o campo solar Eurodish.



Figura 2.19. Campo Solar Eurodish na Alemanha.

Arábia Saudita:

A Arábia Saudita possui dois protótipos de Disco Stirling 50 kW cada. A Figura 2.20 mostra os protótipos instalados.



Figura 2.20. Protótipos Dish-Stirling na Arábia Saudita

Dentre os trabalhos científicos mais recentes desenvolvidos em todo o mundo, e que foram apresentados em eventos científicos no campo da energia solar, destacam-se:

Martínez, *et al* (2008), desenvolveram um concentrador de média temperatura, de refletor fixo e foco móvel. Usou-se uma malha de 32 tubos evacuados com uma abertura total de 24 m² e uma distância máxima do foco em torno de 0,8 m. Foi obtida uma eficiência média anual da ordem de 40 %, para uma latitude de 39° e temperaturas entre 120 e 150°C.

Aguilar, *et al* (2008), construíram um coletor solar de canal parabólico, com largura de 1,06m e comprimento de 2,44m, com distância focal de 0,26 e um tubo absorvedor de 19,05 mm de diâmetro.

Rolim, *et al* (2008), desenvolveram um modelo analítico de um sistema solar térmico de geração de eletricidade, com concentradores parabólicos de foco linear, que será utilizado para simulação de funcionamento instantâneo e anual de um sistema, a ser instalado na cidade de Ouricuri, Brasil. É atualmente, a tecnologia solar de geração de eletricidade com maior experiência no mundo.

A experiência na fabricação de sistemas de concentradores solares, já é uma realidade no LMHES - Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN- Brasil, já tendo sido construídos dois sistemas tipo cilindro-parabólico. O sistema mais significativo no

laboratório está descrito abaixo:

Filho (2008) construiu e analisou um concentrador cilindro-parabólico, com rastreamento automatizado para acompanhar o movimento aparente do Sol, para a produção de vapor, alterando a curva convencional do protótipo utilizando as observações feitas em processos de simulação de captação e reflexão dos raios. Demonstrou as viabilidades térmica, econômica e de materiais do concentrador estudado. A Figura 2.21 mostra um concentrador construído e estudado no LMHES - UFRN.



Figura 2.21. Concentrador cilindro-parabólico em operação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados a seguir os procedimentos de cálculo para a determinação dos parâmetros envolvidos no estudo de concentradores solares, os procedimentos de ensaio para a medição de parâmetros necessários para a determinação da eficiência térmica do sistema e os processos de fabricação e montagem do modelo de central torre construído.

3.1. Desenvolvimento teórico

São demonstradas as teorias e a equação do campo de espelhos direcionados ao foco, do balanço térmico, como também do fator de concentração do modelo em estudo.

3.1.1. Determinação da equação do campo direcionado ao foco

O campo de espelhos tem similaridade com a geometria de curvas planas, que são conjunto de pontos equidistantes de um ponto fixo F chamado de foco e de uma reta fixa chamada de diretriz d , como mostra na Figura 3.1.

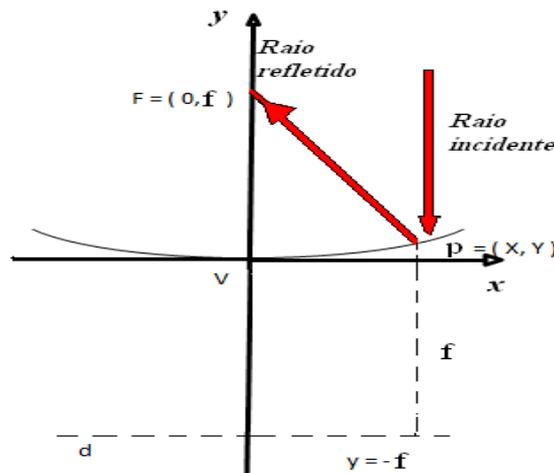


Figura 3.1. Curva plana

Para que ocorra o desenvolvimento dos perfis das fileiras dos heliostatos, para posterior construção do campo, é indispensável o uso da equação desse tipo de geometria para o posicionamento dos mesmos em relação ao seu foco, tendo baseamento no desenho geométrico de curvas concêntricas ao mesmo eixo.

Elas estão sujeitas a uma equação simples em coordenadas cartesianas retangulares, dadas por: $x^2 = 4fy$, onde f é considerado o foco, pois o foco é um ponto fixo $F = (0, f)$ e outra característica dessa geometria é a diretriz, uma reta fixa $y = -f$, a qual é perpendicular a outra

reta que passa pelo foco e também o ponto V chamado de vértice, em que a parábola intercepta o eixo.

3.1.2. Determinação do balanço térmico em superfícies

De acordo com Fraidenraich, 1995; Queiróz, 2005 e Lion 2007, o processo de conversão da radiação solar direta em energia térmica, passa por dois estágios, como segue: No primeiro estágio a radiação solar é captada por meio das superfícies dos heliostatos e refletida para o absorvedor. No segundo estágio a radiação solar absorvida pelo receptor é transferida ao fluido de trabalho por condução e convecção e é perdida a partir das superfícies para a vizinhança, por convecção e por radiação. A Figura 3.2 mostra o esquema da termo-conversão no procedimento de transformação da radiação solar direta em calor, relevantes para análise do balanço.

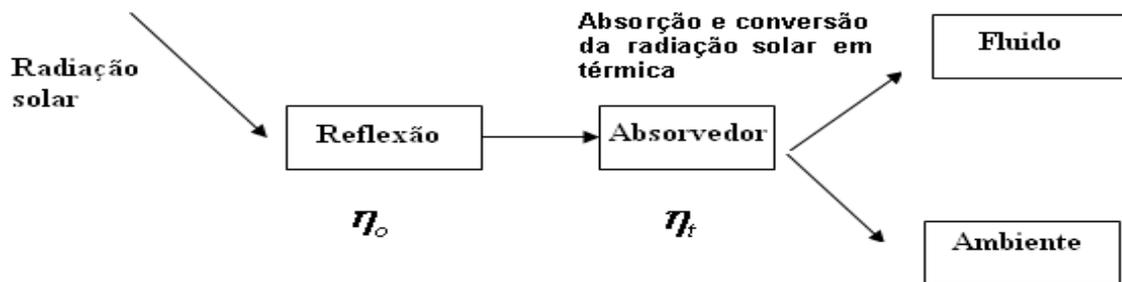


Figura 3.2. Esquema do balanço energético.

Portanto, para avaliar a eficiência do sistema torna-se necessário calcular a potência máxima absorvida, a potência perdida, a potência útil, a eficiência térmica, a eficiência óptica e a eficiência global.

a) Potência máxima absorvida

A potência máxima absorvida, dada em (W), é a energia que entra no sistema e é determinada pela equação (3.1):

$$P_{\text{abs}} = I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot k_{\text{rd}} \cdot \alpha_t \quad (3.1)$$

Onde:

P_{abs} - Potência máxima absorvida que chega ao absorvedor (W)

I_d - Radiação solar direta instantânea coletada pelo sistema de captação (W/m^2)

A_c - Área total da superfície de captação (m^2)

A_s - Área de sombreamento (m^2)

$A_u = (A_c - A_s)$ - Área útil (m^2)

ρ - Refletividade do concentrador (%)

k_{rd} - Fração da radiação refletida que chega no absorvedor (%)

α_t - Absortividade do absorvedor (%)

b) Potência perdida

Considera-se que a potência total perdida é a energia que sai do sistema e é devida à convecção e à radiação, ambas a partir da superfície iluminada e isolada do absorvedor de luz. A Figura 3.3 mostra o esquema da área iluminada pelos raios solares como também a área isolada termicamente.

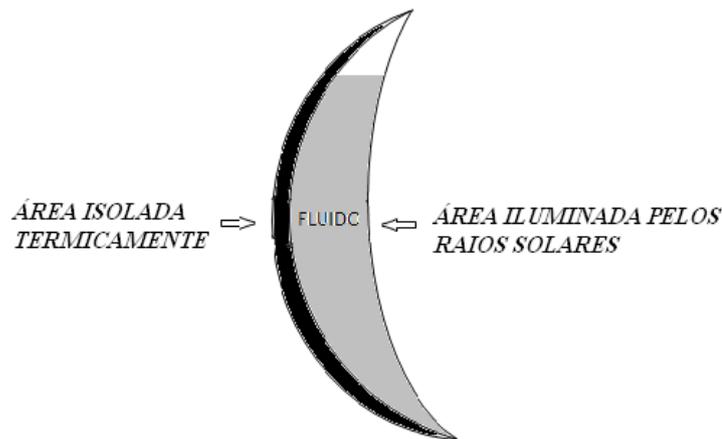


Figura 3.3. Esquema do absorvedor.

Assim as perdas térmicas são representadas respectivamente pelas equações (3.2) e (3.3) e a potência perdida pela equação (3.5).

$$P_{\text{conv}} = P_{\text{iconv}} + P_{\text{isoconv}} = h (A_i) (T_{\text{abs}} - T_{\infty}) + h (A_{\text{iso}}) (T_{\text{iso}} - T_{\infty}) \quad (3.2)$$

$$P_{\text{rad}} = P_{\text{irad}} + P_{\text{isorad}} = \varepsilon_i \sigma (A_i) (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{amb}}^4) + \varepsilon_{\text{iso}} \sigma (A_{\text{iso}}) (T_{\text{iso}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (3.3)$$

$$(P_{\text{perdida}}) = P_{\text{conv}} + P_{\text{rad}} \quad (3.4)$$

Onde:

P_{conv} - Potência perdida por convecção (W)

P_{iconv} - Potência perdida por convecção pela área iluminada do absorvedor (W)

P_{isoconv} - Potência perdida por convecção pela área isolada do absorvedor (W)

P_{rad} - Potência perdida por radiação (W)

P_{irad} - Potência perdida por radiação pela área iluminada do absorvedor (W)

P_{isorad} - Potência perdida por radiação pela área isolada do absorvedor (W)

P_{perdida} - Potência perdida pelo absorvedor (W)

A_{i = πrL} - Área iluminada pela radiação refletida (m²)

A_{iso = πRL + πR²} - Área isolada do absorvedor (m²)

r - Raio da área iluminada pela radiação refletida (m)

R - Raio da área isolada do absorvedor (m)

L - Comprimento do absorvedor (m)

h - Coeficiente de transferência de calor (W/m². K)

T_{abs} - Temperatura absoluta no foco do absorvedor (K)

T_{iso} - Temperatura do isolante térmico (K)

T_{amb} - Temperatura do ambiente (K)

T_{∞ = T_{amb}} - Temperatura do ar (K)

ε_i - Emissividade do absorvedor (%)

ε_{iso} - Emissividade do isolante térmico (%)

σ - Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W/m². K⁴)

O coeficiente de transferência de calor convectivo entre o absorvedor e o ar pode ser determinado através do seguinte procedimento (Filho, 2008):

$$\mathbf{Re_D} = V.E / \nu \quad (3.5)$$

$$\mathbf{Nu_D} = 0,3 + [0,62(Re_D)^{1/2}(Pr)^{1/3}] / [1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4} \cdot [1 + (Re_D/282000)^{5/8}]^{4/5} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{h} = Nu_D \cdot k/E \quad (3.7)$$

Onde:

Re_D - Número de Reynolds

V - Velocidade do ar (m/s)

E = R - r - Espessura do absorvedor (m)

ν - viscosidade cinemática do ar (m²/s)

Nu_D - Número de Nusselt

Pr - Número de Prandtl

K - Condutividade térmica do ar (W/m.K)

c) Potência útil

A potência útil (P_u) do sistema, dada em (W), e é a diferença entre a potência máxima absorvida (P_{abs}) e a potência perdida ($P_{perdida}$), sendo representada pela equação (3.8).

$$P_u = P_{abs} - P_{perdida} \quad (3.8)$$

d) Eficiência global

A **eficiência global** (η_g) de todo o processo de conversão da radiação solar em calor, é um parâmetro que determina o percentual de toda a energia solar radiante que chega à superfície refletora e é transferida para o fluido de trabalho, ou seja, ela depende da **eficiência óptica** (η_o), representada pela equação (3.9), da superfície de captação e da **eficiência térmica** (η_t), dada pela equação (3.10), do sistema absorvedor, assim obtemos a eficiência global de todo o processo representada pela equação (3.11):

A **eficiência óptica** é um parâmetro que determina a porcentagem da energia solar radiante que chega à superfície refletora e é enviado para o absorvedor. Obtém-se, assim, um percentual de perdas ópticas, devido a uma parte da energia radiante que chega à superfície refletora não ser enviada para o receptor de luz. Já a **eficiência térmica** ou rendimento térmico é o parâmetro que determina a porcentagem de toda a energia solar que chega ao absorvedor e é transferido ao fluido de trabalho.

$$\eta_o = \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t \quad (3.9)$$

$$\eta_t = P_u / P_{abs} \quad (3.10)$$

$$\eta_g = \eta_o \times \eta_t \quad (3.11)$$

Onde:

η_o - Eficiência ótica do sistema de captação da energia solar (%)

ρ - Refletividade do concentrador (%)

k_{rd} - Fração de radiação refletida que chega ao absorvedor (%)

α_t - Absortividade do absorvedor (%)

η_t - Eficiência de conversão térmica ou rendimento térmico (%)

η_g - Eficiência global de conversão (%)

Outros fatores importantes e que devem ser considerados para a instalação de um sistema torre solar são: a intensidade de radiação na localidade de instalação do sistema, o clima, a época do ano e a poluição atmosférica.

3.1.3. Fator de concentração

O fator de concentração da energia solar (C) classifica os coletores, definido pela relação entre a área útil, ou seja, pela área de captação da energia eletromagnética e a área iluminada pelo absorvedor, de acordo com a equação (3.12):

$$C = A_u/A_i \quad (3.12)$$

3.2. Processos de fabricação e montagem do modelo de sistema torre solar

Para a fabricação e montagem do modelo de central torre solar utilizou-se os seguintes procedimentos.

3.2.1. Projeto das dimensões e desenho do campo de espelhos

Cada heliostato é composto, de quatro segmentos de espelhos de 2,0 mm de espessura, 220,0 mm de comprimento e 150,0 mm de largura. Assim, o campo de captação da radiação solar, comportando 96 espelhos, possui uma área de captação de 3,2 m².

O campo de heliostatos foi projetado para ser composto por três fileiras de oito heliostatos. Com base na literatura dos Sistemas de Receptor Central, suas distâncias em relação à torre correspondem, 2, 3 e 4 metros, respectivamente, e o espaçamento entre os heliostatos do sistema foram definidos objetivando-se deixar espaço suficiente entre os mesmos para evitar os efeitos de sombreamento e bloqueio entre eles.

Utilizando-se a equação descrita por Simmons (1925), devido o campo de espelhos ter similaridade com a geometria de curvas planas, desenhou-se em escala, o perfil das três curvas de heliostatos cujo conjunto forma a área de captação do sistema proposto.

Pela altura dos heliostatos ao centro do foco do sistema, 2,14 m e as distâncias das fileiras dos heliostatos até a torre, 2,0; 3,0 e 4,0 metros, determinou-se as distâncias das mesmas ao foco que correspondem, respectivamente, a 2,9; 3,7 e 4,5 metros. Como também baseados na área do terreno, para instalação do protótipo estudado, deu-se valores para o eixo y, obtendo o devido espaçamento para o eixo x. Assim, determinou-se a posição de cada heliostato em relação ao seu foco, fundamentado no desenho de curvas concêntricas ao mesmo eixo, para posterior construção do campo. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, os gráficos das três fileiras de heliostatos da citada equação e o desenho do campo de heliostatos.

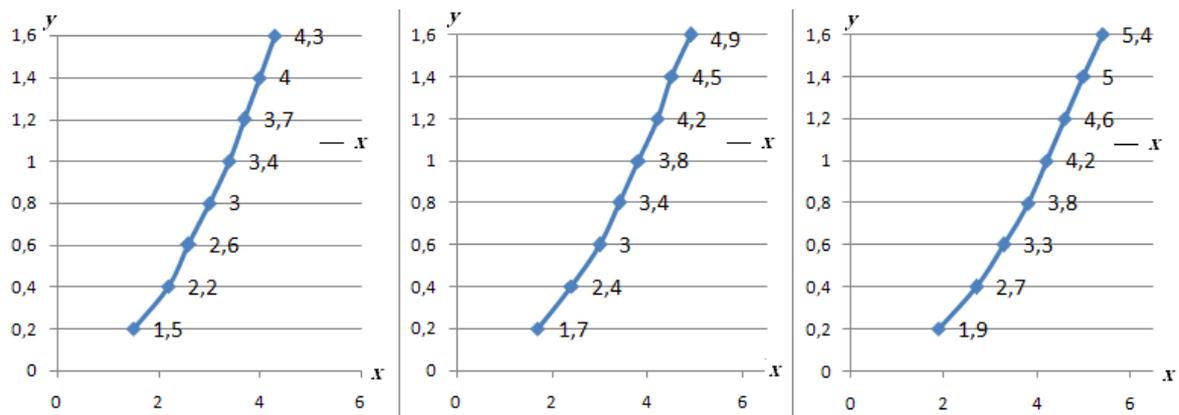


Figura 3.4. Curvas da primeira, segunda e terceira fileiras de heliostatos.

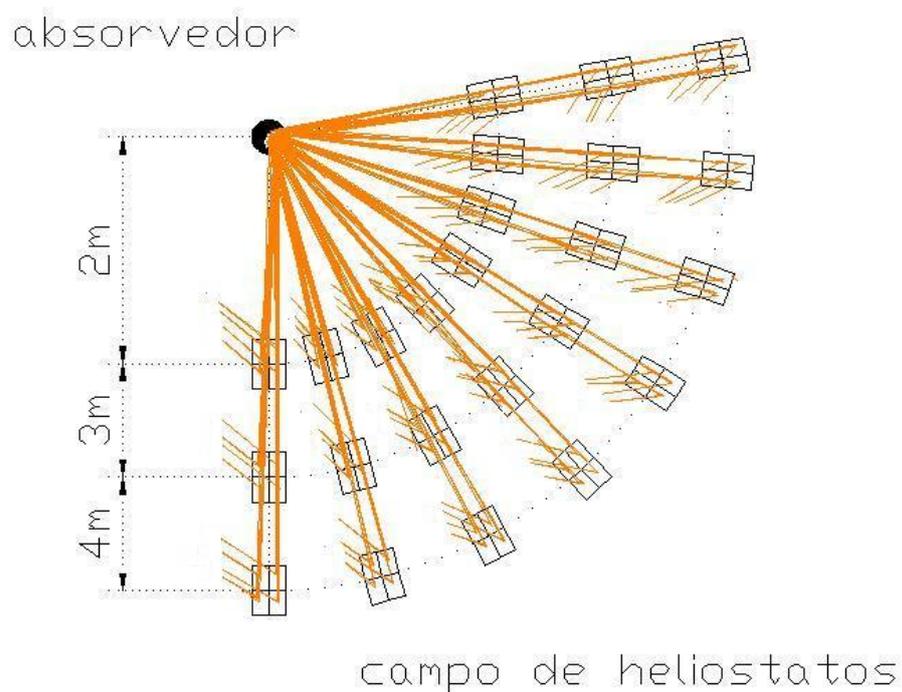


Figura 3.5. Desenho do campo de heliostatos.

3.2.2. Confeção dos heliostatos.

Os pedestais móveis, estruturas de fixação dos espelhos, foram confeccionados através da utilização de sucatas de ferro devidamente soldadas e adaptadas a permitirem as regulagens para o acompanhamento do movimento aparente do sol. As superfícies para fixar os espelhos foram construídas da mesma forma, incluindo quatro cortes para facilitar a focalização dos quatro espelhos em direção ao absorvedor. A Figura 3.6 mostra a estrutura metálica de um heliostato.



Figura 3.6. Estrutura do heliostato.

Os espelhos foram cortados empregando um cortador de vidros profissional. Utilizou-se cola de contato na fixação dos segmentos de espelho sobre as superfícies de ferro e após o tempo necessário de secagem, os espelhos foram fixados, concluindo-se, assim, a montagem das superfícies refletoras do modelo proposto. As partes metálicas das estruturas de fixação foram pintadas, buscando-se uma minimização da degradação em função de sua exposição aos fenômenos da natureza. A Figura 3.7 apresenta os quatro espelhos sendo fixados na superfície da estrutura de um heliostato e a Figura 3.8 mostra-o em seu formato final.



Figura 3.7. Fixação dos espelhos.



Figura 3.8. Heliostato montado.

3.2.3. Focalização dos heliostatos

Em seguida foi feita uma simulação das superfícies refletoras. Verificou-se que existiam desvios da reflexibilidade nos segmentos de espelhos, ocasionando o não direcionamento dos raios refletidos para o foco. O problema foi resolvido para cada heliostato individualmente pela razão de os heliostatos terem a característica de serem focalizantes. A Figura 3.9 mostra as reflexões dos raios solares nos quatro espelhos de um heliostato para um único foco.



Figura 3.9. Focalizações do heliostato.

3.2.4. Confeção do absorvedor e da torre

O absorvedor do sistema proposto foi construído a partir de um reservatório de gás, utilizado em sistemas de refrigeração, de 240,0 mm de diâmetro e 290,0 mm de altura. Teve sua geometria cilíndrica alterada, devido a ensaios preliminares onde ficou demonstrado que o receptor, que tinha um volume de 13,0 litros de água em seu interior, permitiu a obtenção de uma temperatura máxima de 64,8°C, muito inferior a temperatura de ebulição da água.

Cortou-se o absorvedor ao meio e suas partes foram conectadas com solda de modo côncavo-convexo, para permitir um menor volume de água em seu interior e minimizar as perdas de calor por convecção, na área iluminada pelos raios solares, em função da incidência do vento, obtendo-se o resultado desejado para a temperatura da água em ebulição. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram, respectivamente, as partes do cilindro após o corte e ele sendo soldado.



Figura 3.10. Partes do cilindro após o corte.



Figura 3.11. Absorvedor em processo de soldagem.

O cilindro foi pintado de preto fosco para uma maior absorção dos raios incidentes. Colocou-se um pedaço de mangueira, num orifício feito na parte superior do mesmo, junto a

uma tampa de garrafa PET para permitir a entrada d'água por meio de um funil feito também de garrafa PET.

A área não iluminada foi isolada termicamente com um compósito produzido no LMHES/UFRN, a base de gesso, cimento, EPS triturado, raspas de pneu e água, para minimizar-se as perdas térmicas. A Figura 3.12 mostra o absorvedor do sistema com o molde para ser isolado termicamente e o absorvedor do sistema em seu formato final.



Figura 3.12. Absorvedor do sistema.

Para a construção da torre foi utilizado uma haste de ferro galvanizado de 2,37 m. A torre pode ser removida do seu tripé, estando presa por cabos de aço ajustáveis e por um parafuso com porca. Deixou-se um espaço de 4,0 cm entre a parte inferior do absorvedor e o topo da torre para evitar as perdas de calor por condução.

A altura do solo ao centro do absorvedor ficou então de 2,70 m. A estrutura da torre foi pintada para minimizar os efeitos de corrosão, em função de sua exposição aos fenômenos da natureza. A Figura 3.13 mostra o absorvedor posicionado no topo da torre em todos os seus detalhes.



Figura 3.13. Absorvedor no topo da torre.

3.3. Montagem experimental e instrumentação utilizada

3.3.1. Posicionamento dos heliostatos em relação à torre

Os heliostatos foram posicionados de modo que ficassem focados ao absorvedor e que não houvesse bloqueio nem sombreamento dos raios solares uns sobre os outros. Essa avaliação foi realizada ao longo do dia evitando-se assim perdas reflexivas. Os eixos das áreas dos heliostatos ficaram na direção norte-sul e as superfícies refletoras voltada para direção

leste-oeste para o acompanhamento do movimento aparente do Sol. O subsistema torre-absorvedor ficou ligeiramente ao Sul. A Figura 3.14 mostra o campo solar ainda com alguns sombreamentos e a Figura 3.15 o campo devidamente posicionado em seu formato final.



Figura 3.14. Campo solar com sombreamento.



Figura 3.15. Campo solar em seu formato final.

3.3.2. Abastecimento de água no absorvedor

Para o sistema ser testado na configuração com carga, ele foi alimentado, com água, através de um funil confeccionado em garrafa PET acoplado a um orifício feito na parte superior do absorvedor. Por esse funil derramava-se a água para ser vaporizada.

Primeiramente foi preenchida uma garrafa PET de 3,0 litros para encher o absorvedor e mais 6 garrafas PET de 1,0 litro cada, para os reabastecimentos posteriores.

3.3.3. Medição da temperatura

Foram usados quatro termopares de cromel-alumel, fixados a um termômetro digital, para a verificação dos dados das temperaturas. Um termopar foi acoplado na parte frontal do absorvedor, no centro da área iluminada pelos raios solares; outro, nas mediações do centro, dentro do absorvedor, onde se encontrava o fluído em análise, o terceiro na área do isolante nas mesmas mediações e o quarto para verificação da temperatura ambiente.

O termômetro digital utilizado de duas entradas tem uma resolução de $0,1^\circ$ e permite medições na faixa de -70°C a 1200°C , com erro máximo de 2%.

3.3.4. Medição da radiação

Utilizou-se um piranômetro, construído do LMHES/UFRN, o qual foi acoplado a um multímetro digital para medir a radiação global.

Esse aparelho verifica a radiação solar em função da diferença de temperatura de termalização de dois corpos cinza de diferentes emitâncias, submetidos à ação de uma mesma fonte de radiação.

3.3.5. Medição da quantidade de água vaporizada

Foi medida a quantidade de água vaporizada durante as cinco horas de operação dos testes realizados, através do volume de água de reabastecimento.

O abastecimento inicial do absorvedor foi de aproximadamente 2,5 litros com uma garrafa PET de 3,0 litros. Utilizaram-se as seis garrafas PET restantes para os reabastecimentos de 1,0 litro realizados em média a cada 40 minutos, assim mantendo sempre o nível da água e ao final do teste calculou-se a quantidade de água consumida.

3.4. Testes para avaliar a eficiência do modelo de central torre solar

Para avaliar a eficiência do modelo de central torre solar foram necessários vários dias de medição, com e sem carga. Antes de entrar em funcionamento todos os heliostatos, compostos por quatro lâminas de espelhos foram previamente regulados para obtenção de um foco pontual, ou seja, as superfícies foram manualmente posicionadas em direção ao sol, com

o absorvedor ficando posicionado no foco de todos os heliostatos. Os testes foram realizados com e sem carga.

3.4.1. Testes sem carga

Mediu-se a radiação solar global e as temperaturas do absorvedor na sua área iluminada e do ambiente, na medida em que os heliostatos eram regulados. A regulagem dos heliostatos para o seguimento do movimento aparente do sol e as medições aconteciam a cada 15 minutos e era feita manualmente para um perfeito direcionamento dos raios refletidos pelos mesmos ao receptor. A Figura 3.16 mostra a máxima temperatura verificada no momento do teste.



Figura 3.16. Máxima temperatura coletada para o absorvedor sem carga.

3.4.2. Testes com carga

Primeiramente foi preenchido o absorvedor com 2,5 litros d'água. Num intervalo de 15 minutos, regulava-se os heliostatos em direção ao sol, para um perfeito direcionamento dos raios refletidos de modo que o absorvedor ficasse iluminado pelos raios solares. Logo após verificava-se a radiação solar global e as temperaturas do absorvedor na parte central da área iluminada e a temperatura da água contida em seu interior.

Em seguida verificava a temperatura na área isolada termicamente e a temperatura ambiente. E percebia-se que a água em ebulição saía pelo orifício feito na parte frontal e superior do absorvedor, pois o fluido se expandia ao receber calor. Aproximadamente de 40 em 40 minutos reabastecia-se o receptor, mantendo o seu nível de água. A Figura 3.17 mostra todos os componentes do sistema em estudo, em teste.



Figura 3.17. Modelo central torre solar em teste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se as equações apresentadas no capítulo anterior e baseando-se na maior temperatura de vapor d'água para o teste com carga, foram determinados os parâmetros que espelham a eficiência de transformação da energia eletromagnética em energia térmica, do modelo de central torre solar estudado, cujos procedimentos e valores estão apresentados a seguir.

4.1. Análise dos resultados obtidos

4.1.1. Determinação da máxima potência térmica absorvida

Utilizando a fórmula (3.1) do balanço térmico e os dados contidos na literatura solar pode-se calcular a máxima potência obtida no absorvedor, onde:

$$I_d = 600 \text{ W/m}^2$$

$$A_u = 3,17\text{m}^2$$

$$\rho = 95\%$$

$$k_{rd} = 90\%$$

$$\alpha_t = 90\%$$

$$P_{abs} = I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t = \mathbf{1463,59W}.$$

4.1.2. Determinação da potência total perdida

Como a potência total perdida pelo absorvedor é praticamente igual à potência perdida por convecção e por radiação.

Para determinar a potência perdida por convecção é necessário o conhecimento dos números de Prantl; de Reynolds, sendo determinado pela equação (3.5); Nusselt, sendo calculado pela equação (3.6), para a determinação do coeficiente de transferência de calor convectivo que pode ser encontrado através da equação (3.7) (Incropera, 2003).

Onde:

$$r = 10^{-1} \text{ m}$$

$$R = 1,2 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$E = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$V = 3\text{m/s}^2$$

$$v = 1,681 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,706$$

$$K = 26,97 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$$

Obtendo assim Reynolds, Nusselt e por seguinte o coeficiente de transferência de calor por convecção. Seus valores respectivamente foram de:

$$Re_D = 3,57 \times 10^3$$

$$Nu_D = 3,07 \times 10$$

$$h = 41,45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Utilizando as fórmulas (3.2 e 3.3) determina-se a potência perdida por convecção e por radiação, onde:

$$r = 10^{-1} \text{ m}$$

$$R = 1,2 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$L = 2,9 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$A_i = 9 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$A_{iso} = 1,5 \times 10^{-1} \text{ m}^2$$

$$T_{iso} = 311,7 \text{ K}$$

$$T_{abs} = 413,4 \text{ K}$$

$$T_{amb} = 309,1 \text{ K}$$

$$T_{\infty} = 309,1 \text{ K}$$

$$\epsilon_i = 90\%$$

$$\epsilon_{iso} = 90\%$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Obtemos assim as potências perdidas, seus valores foram de:

$$P_{iconv} = 389,09 \text{ W}$$

$$P_{isoconv} = 16,17 \text{ W}$$

$$P_{conv} = 405,26 \text{ W}$$

$$P_{irad} = 92,20 \text{ W}$$

$$P_{isorad} = 2,38 \text{ W}$$

$$P_{rad} = 94,58 \text{ W}$$

$$(P_{perdida}) = P_{conv} + P_{rad} = \mathbf{499,84 \text{ W}}$$

4.1.3. Determinação da potência útil

A potência útil vem dada pela diferença entre a potência absorvida e a potência perdida, e pode ser determinada substituindo-se os valores na equação (3.8).

$$P_u = P_{abs} - P_{perdida} = \mathbf{963,75 \text{ W}}$$

4.1.4. Determinação da eficiência óptica

Utilizando-se a equação (3.9) obteve-se a eficiência óptica, correspondente a 77,0%.

$$\eta_o = \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t = \mathbf{0,77}$$

4.1.5. Determinação da eficiência térmica

Utilizando-se a equação (3.10) obteve-se a eficiência térmica, equivalente a 66,0%.

$$\eta_t = P_u / P_{abs} = \mathbf{963,75 / 1463,59 = 0,66}$$

4.1.6. Determinação da eficiência global

Utilizando-se a equação (3.11) obteve-se a eficiência global de 0,51, ou seja, um rendimento global de 51%.

$$\eta_g = \eta_o \times \eta_t = \mathbf{0,77 \cdot 0,66 = 0,51}$$

Os valores obtidos traduziram uma boa eficiência óptica, térmica e uma significativa eficiência global, se comparados com os valores médios de conversão de alguns sistemas termosolares em utilização no mundo, da ordem de 40% (Martínez, *et al*, 2008).

4.1.7. Cálculo do fator de concentração

O fator de concentração, obtido por meio da equação (3.12), foi de 35,22.

$$C = A_u / A_i = \mathbf{3,17 / 9 \cdot 10^{-2} = 35,22}$$

Portanto, o modelo proposto se enquadra dentro dos coletores de alta concentração, uma vez que o fator de concentração é superior a 10 (Lion, 2007). Porém é necessário levar em consideração a temperatura do fluido de trabalho utilizado.

4.2. Resultados dos testes realizados

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os dados, dos três dias de ensaios com o modelo de sistema torre solar em estudo, coletados durante o teste sem carga.

Tabela 4.1. Resultados do teste sem carga – Dia 1.

Tempo (h)	T máxima absorvedor (°C)	T média absorvedor (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
09:00 - 10:00	462,0	428,9	576,0
10:00 - 11:00	500,8	490,5	600,0
11:00 - 12:00	498,7	475,1	600,0
12:00 - 13:00	500,0	474,6	600,0
13:00 - 14:00	485,0	470,0	576,0
Média	489,3	467,8	590,4

Tabela 4.2. Resultados do teste sem carga – Dia 2.

Tempo (h)	T máxima absorvedor (°C)	T média absorvedor (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
09:00 - 10:00	450,2	420,9	568,0
10:00 - 11:00	496,5	490,1	592,0
11:00 - 12:00	500,1	470,1	600,0
12:00 - 13:00	498,4	465,6	592,0
13:00 - 14:00	480,2	458,0	568,0
Média	485,1	460,9	584,0

Tabela 4.3. Resultados do teste sem carga – Dia 3.

Tempo (h)	T máxima absorvedor (°C)	T média absorvedor (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
09:00 - 10:00	444,2	423,4	568,0
10:00 - 11:00	490,5	489,6	584,0
11:00 - 12:00	495,2	465,1	592,0
12:00 - 13:00	498,0	467,2	592,0
13:00 - 14:00	479,8	455,4	568,0
Média	481,5	460,1	580,8

Tabela 4.4. Médias dos três dias de teste sem carga do protótipo em estudo.

DIA	T máxima absorvedor (°C)	T média absorvedor (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
1	489,3	467,8	590,4
2	485,1	460,9	584,0
3	481,5	460,1	580,8
MÉDIA	485,3	462,9	585,1

Os dados apontam uma temperatura máxima de **500,8°C**, para o maior índice registrado da temperatura ambiente que foi de **34,5°C** e para uma radiação solar direta de **600,0 W/m²**.

A temperatura média correspondeu a **95,4%** da temperatura máxima, o que representa um resultado significativo, que pode ser alcançado em função das adequadas condições solarimétricas, com radiações praticamente constantes para o período ensaiado, com variação em torno de **1,0%**. Essa constância de radiação tão adequada para a utilização de sistemas de conversão da energia solar em energia elétrica utilizando o efeito da concentração, só é possível em poucas regiões do mundo, dentre as quais a região nordeste brasileira.

Os valores apontam para uma temperatura média sempre acima dos **450,0 ° C**, para uma radiação solar direta sempre a cima de **580,0 W/m²**. Percebe-se que a radiação solar direta apresentou-se praticamente constante no período de maior incidência solar. Os gráficos das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, mostram o comportamento assumido pelas temperaturas máxima e média do absorvedor.

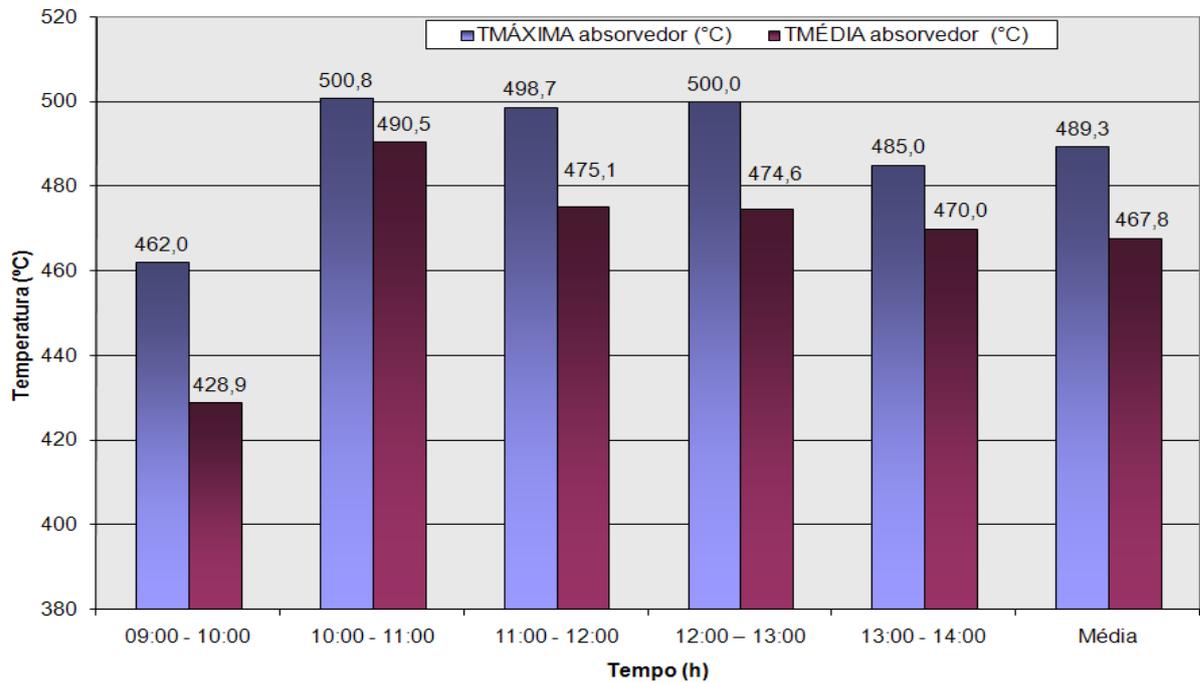


Figura 4.1. Comportamento assumido das temperaturas máximas e médias do teste sem carga-Dia 1.

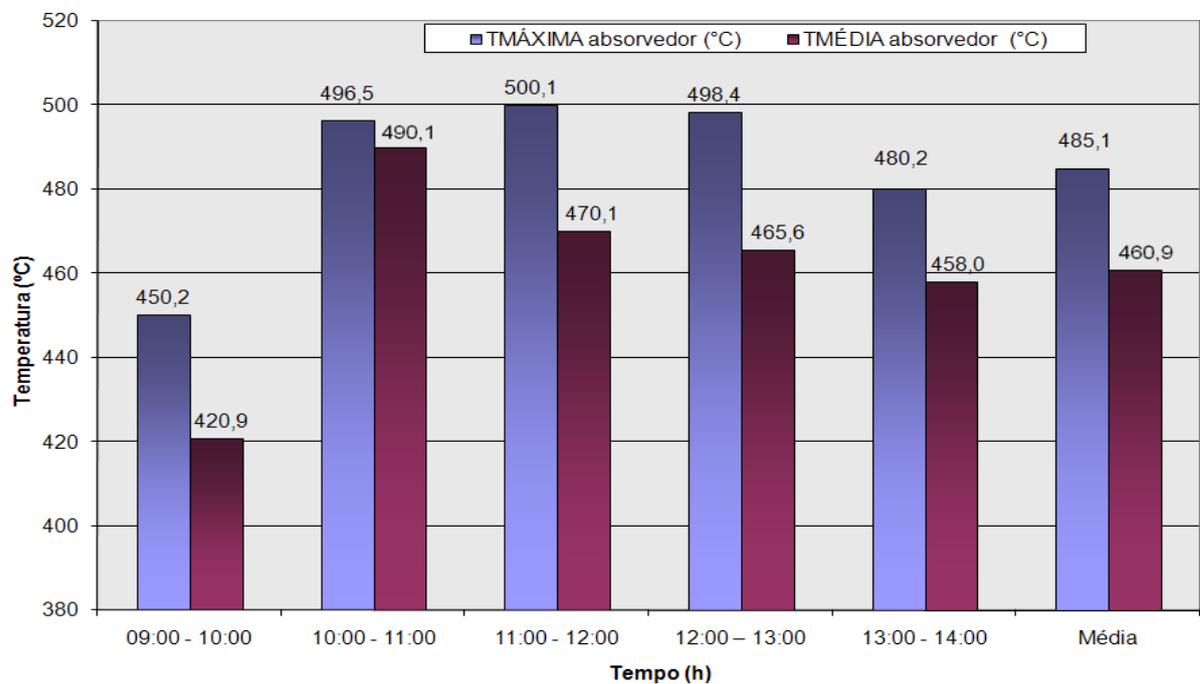


Figura 4.2. Comportamento assumido das temperaturas máximas e médias do teste sem carga-Dia 2.

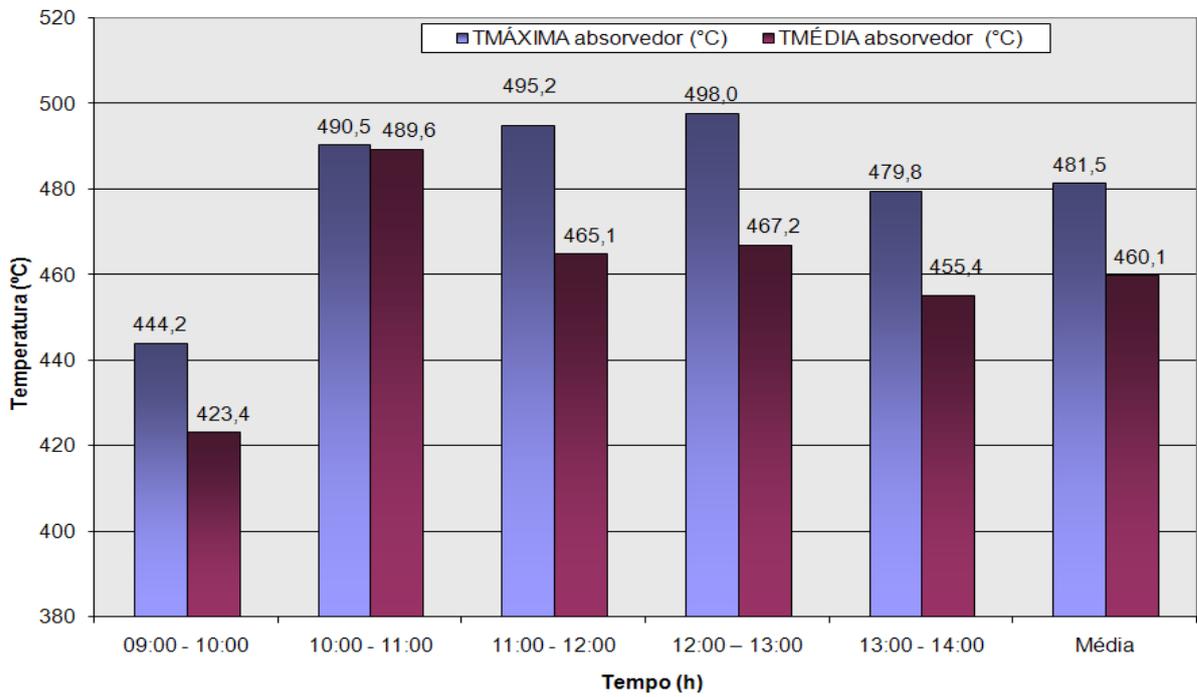


Figura 4.3. Comportamento assumido das temperaturas máximas e médias do teste sem carga-Dia 3.

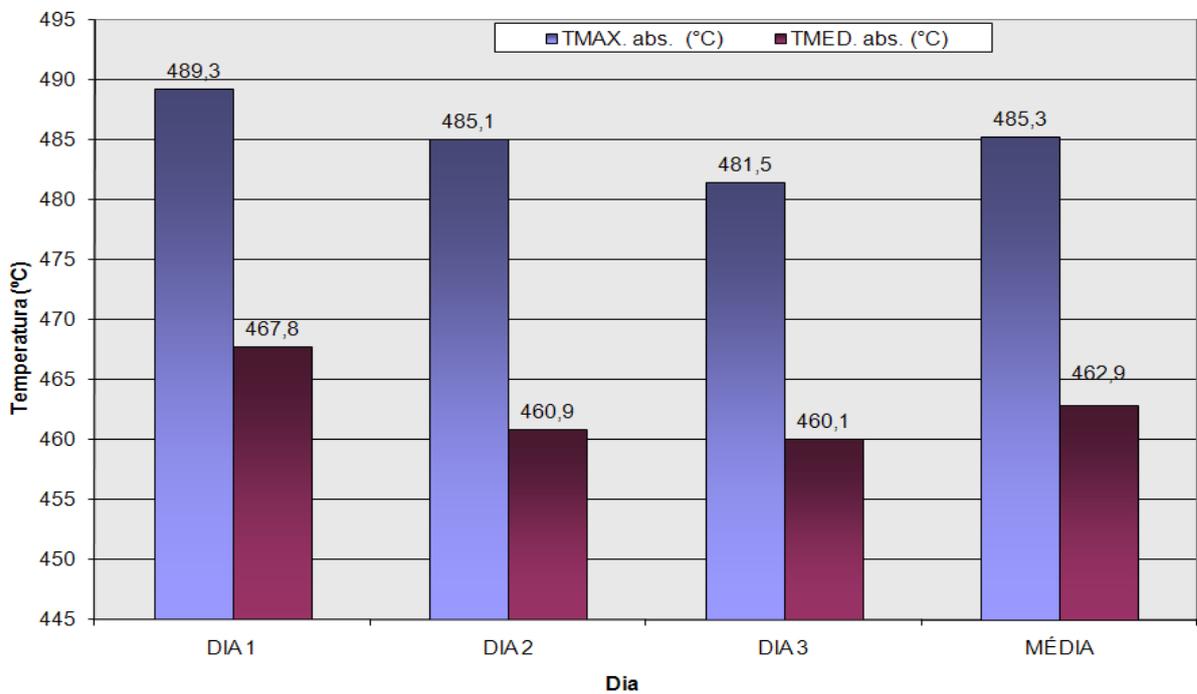


Figura 4.4. Comportamento assumido das temperaturas médias dos três dias dos testes sem carga.

Para o teste com carga os valores máximos para os parâmetros levantados foram obtidos para o período de radiação praticamente constante, entre 12h00min e 13h00min, e estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Resultados máximos obtidos para o teste com carga.

Tempo (hora)	T ambiente (°C)	T d'água (°C)	T absorvedor (°C)	T vapor (°C)	T isolante (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
12:00 - 13:00	36,1	36,5	140,4	109,4	38,7	600,0

As Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os valores médios horários dos parâmetros medidos no ensaio com carga.

Tabela 4.6. Resultados do teste com carga – Dia 1.

Tempo (hora)	T ambiente (°C)	T d'água (°C)	T absorvedor (°C)	T vapor (°C)	T isolante (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
09:00 – 10:00	32,0	32,0	121,8	104,5	37,1	576,0
10:00 – 11:00	32,5	32,0	131,2	106,3	37,4	576,0
11:00 – 12:00	33,3	33,6	138,3	107,9	38,7	600,0
12:00 – 13:00	35,8	36,1	140,0	108,4	38,5	600,0
13:00 – 14:00	34,2	34,4	135,0	107,1	36,3	576,0
Média	33,6	33,6	133,3	106,8	37,6	585,6

Tabela 4.7. Resultados do teste com carga – Dia 2.

Tempo (hora)	T ambiente (°C)	T d'água (°C)	T absorvedor (°C)	T vapor (°C)	T isolante (°C)	Radiação Solar Direta (W/m²)
09:00 – 10:00	31,5	32,0	123,8	103,5	37,0	568,0
10:00 – 11:00	32,0	32,7	132,2	106,5	37,6	576,0
11:00 – 12:00	33,1	33,8	137,3	107,1	38,0	592,0
12:00 – 13:00	35,1	36,1	139,9	108,7	36,9	600,0
13:00 – 14:00	35,0	35,5	138,7	106,1	36,0	576,0
Média	33,3	34,0	134,4	106,4	37,1	582,4

Tabela 4.8. Resultados do teste com carga – Dia 3.

Tempo (hora)	T _{ambiente} (°C)	T _{d'água} (°C)	T _{absorvedor} (°C)	T _{vapor} (°C)	T _{isolante} (°C)	Radiação Solar Direta (W/m ²)
09:00 - 10:00	31,0	32,3	124,3	105,5	37,7	568,0
10:00 - 11:00	32,3	32,9	133,2	106,9	37,3	576,0
11:00 - 12:00	32,9	34,1	138,3	107,5	38,5	600,0
12:00 - 13:00	34,5	36,0	140,1	108,8	38,2	600,0
13:00 - 14:00	35,2	35,5	136,2	106,7	36,4	576,0
Média	33,2	34,2	134,4	107,1	37,6	584,0

Tabela 4.9. Médias dos três dias de teste com carga do protótipo em estudo.

DIA	T _{ambiente} (°C)	T _{d'água} (°C)	T _{absorvedor} (°C)	T _{vapor} (°C)	T _{isolante} (°C)	Radiação Solar Direta (W/m ²)
1	33,6	33,6	133,3	106,8	37,6	585,6
2	33,3	34,0	134,4	106,4	37,1	582,4
3	33,2	34,2	134,4	107,1	37,6	584,0
Média	33,4	33,9	134,0	106,8	37,4	584,0

Os parâmetros medidos demonstram que os dias escolhidos apresentaram excelentes condições solarimétricas, praticamente constantes, conforme foi pretendido. Foram escolhidos apenas dias praticamente sem nebulosidade, ideais para a operação de uma usina solar para geração de energia térmica e posteriormente transformação em energia elétrica de baixa magnitude.

A temperatura do isolante térmico esteve apenas **12,0%** acima da temperatura ambiente, o que demonstra uma boa eficiência do material utilizado para esse fim. Essa eficiência do isolante térmico propiciou a obtenção de temperaturas do vapor d'água mais elevadas. As temperaturas no absorvedor são significativas, com média de **134,0 °C**, e esteve sempre acima da temperatura de vapor do fluido..

A radiação solar direta média correspondeu em torno de **584,0 W/m²**, a qual está acima da média prevista para a região do nordeste brasileiro, entre 400,0 e 560,0 W/m².

Os dados apontam temperaturas do vapor d'água sempre acima dos 100,0°C, alcançando valor médio de **106,8°C**, correspondente a **6,8%** acima da temperatura de ebulição do fluido utilizado. O volume de água vaporizado ficou em torno de **7,5** litros obtidos em cinco horas de operação.

Os gráficos, a seguir, das figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, mostram o comportamento assumido pelos dados do teste com carga, em relação ao tempo.

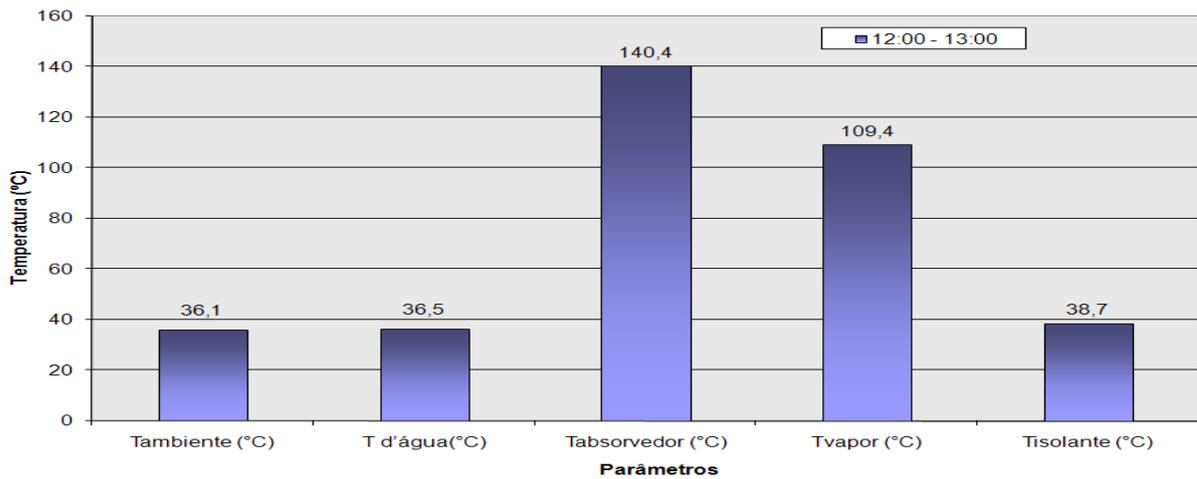


Figura 4.5. Comportamento assumido das temperaturas máximas do teste com carga.

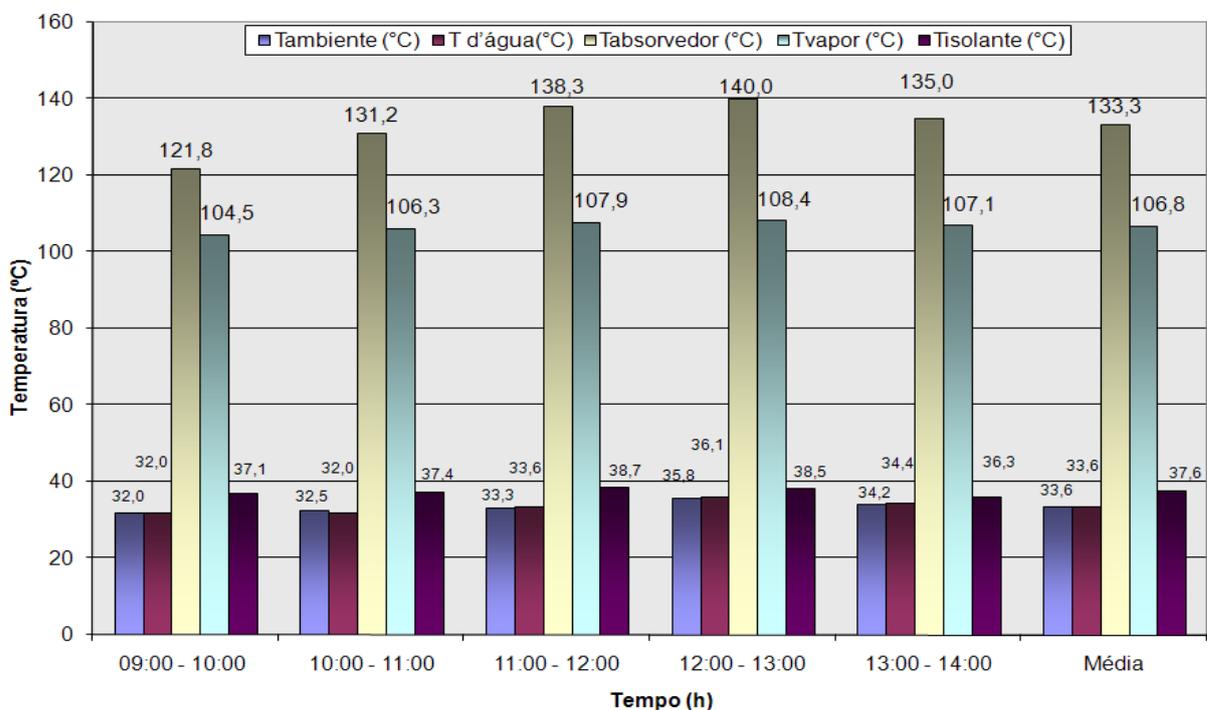


Figura 4.6. Comportamento assumido das temperaturas médias do teste com carga – Dia

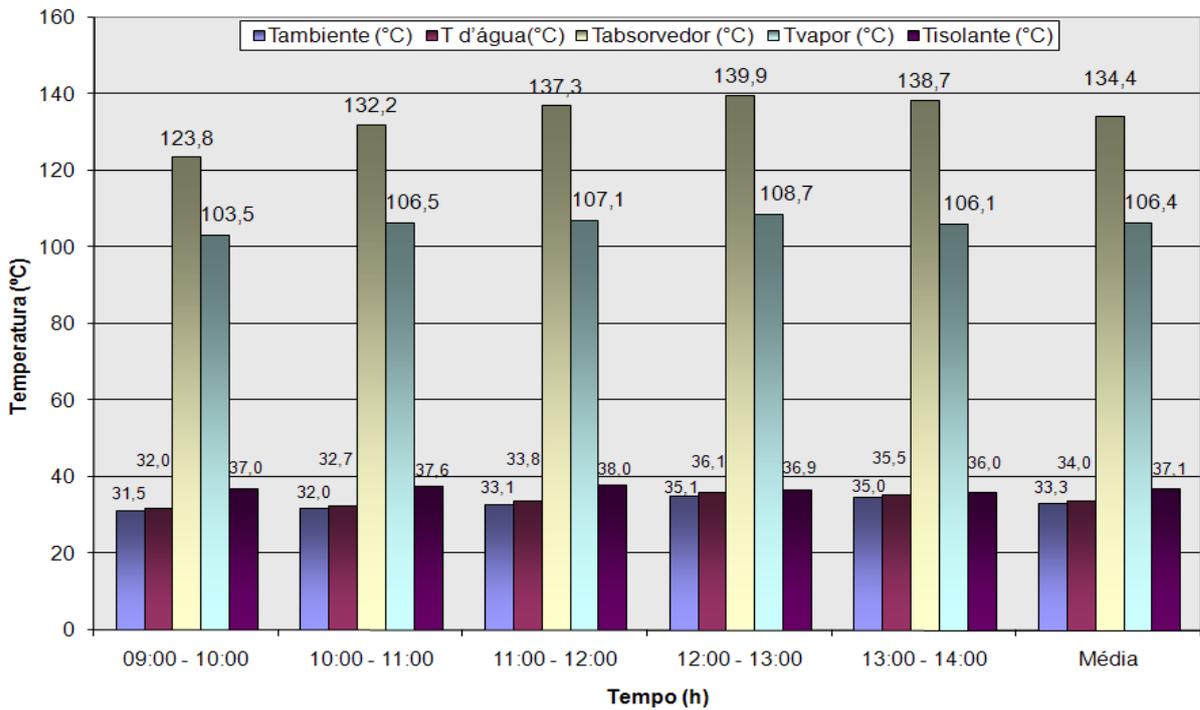


Figura 4.7. Comportamento assumido das temperaturas médias do teste com carga - Dia 2.

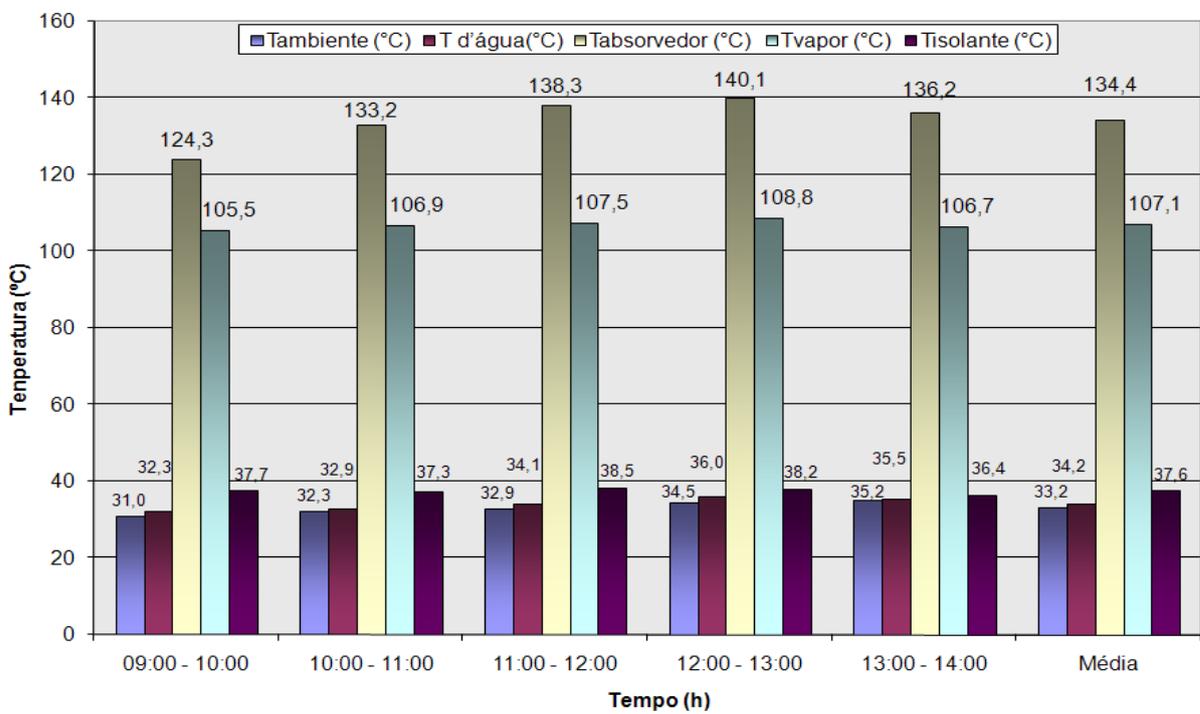


Figura 4.8. Comportamento assumido das temperaturas médias do teste com carga - Dia 3.

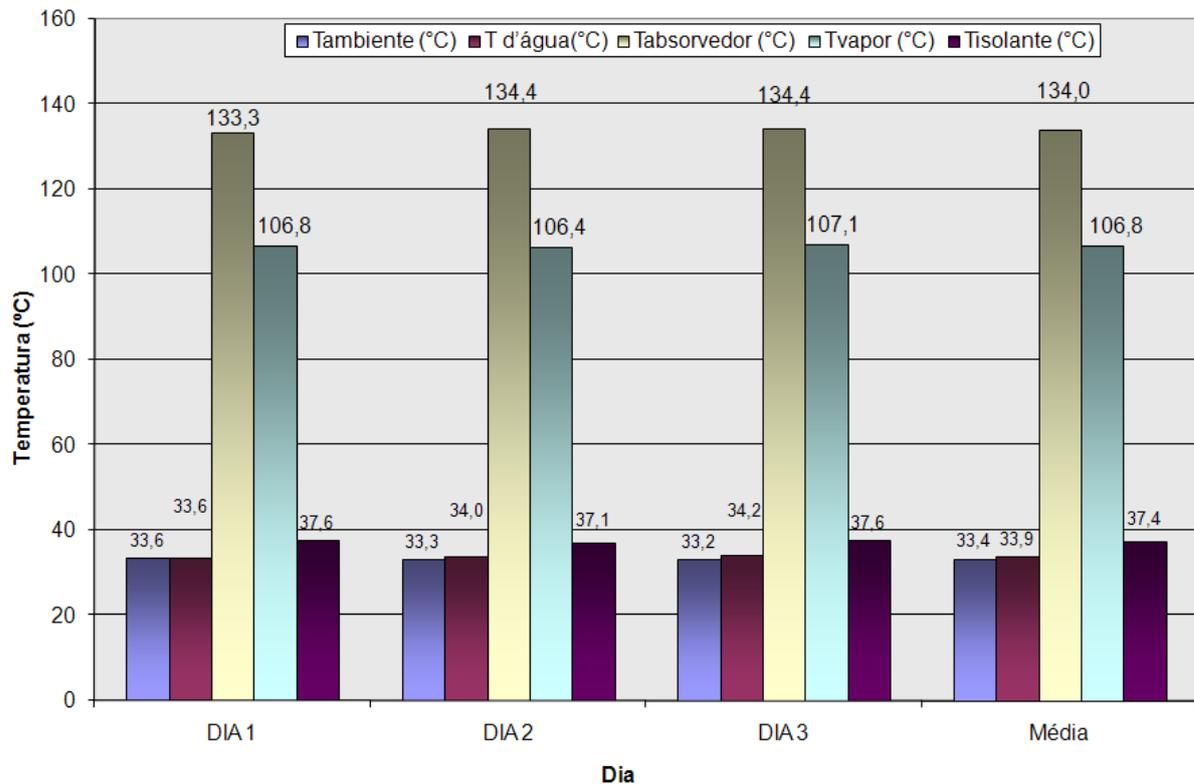


Figura 4.9. Comportamento assumido das temperaturas médias dos três dias dos testes com carga.

4.3. Viabilidade econômica

O custo de fabricação do modelo de sistema torre solar estudado foi reduzido em função da utilização de materiais alternativos e de baixo custo, como também materiais de sucata para sua construção: um cilindro de gás, ferro galvanizado e barras de ferro de sucata e garrafa PET, que contribuiu para a minimização do custo de fabricação do sistema proposto. Os materiais comprados foram: espelhos, colas, cabo de aço, tintas, varetas de solda, e outros, e correspondeu a R\$ 250,00.

De acordo com os dados obtidos, o sistema entrega ao fluido de trabalho uma energia correspondente a 0,96 kWh. Considerando às cinco horas de operação por dia, tem-se 4,80 kW/dia. O nível de potência elétrica que poderia ser gerada, se o modelo de central torre contivesse a turbina e o gerador elétrico, propiciará a iluminação de uma residência, principalmente na zona rural.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados dos ensaios efetuados, com o sistema de central torre proposto, durante o levantamento de desempenho térmico, pode-se apresentar as seguintes conclusões.

1. Demonstrou-se a viabilidade de utilização do sistema torre, para a obtenção de vapor e possível geração de energia elétrica de baixa magnitude;
2. Os resultados obtidos com o modelo de central torre solar são promissores para a construção de um sistema torre solar de médio porte para a nossa região;
3. Os heliostatos mostraram-se aptos para o acompanhamento aparente do sol;
4. Foi exigida a correção de posicionamento dos heliostatos para um curto espaço de tempo, entre 15 minutos, o que causou um trabalho exaustivo;
5. As perdas convectivas e radiativas do absorvedor foram de pequena magnitude, o que demonstra a boa eficiência do material compósito utilizado como isolante térmico;
6. A geometria do absorvedor propiciou a redução das perdas térmicas por convecção na área iluminada pelos raios solares;
7. O modelo de central torre estudado exige um mecanismo de rastreamento automatizado.

Com base nos resultados dos ensaios efetuados, com o sistema de central torre proposto, durante o levantamento de desempenho térmico, serão apresentadas a seguir, sugestões para otimizações e efetivação de futuros trabalhos com concentradores alternativos.

1. O subsistema de conversão térmica em elétrica, compreendendo uma turbina e um alternador, poderá ser do tipo convencional, assim evitando a necessidade de novas pesquisas;
2. É relevante que se façam mais ensaios, em todas as estações do ano, para uma análise mais real do modelo de central torre;
3. É preciso realizar um estudo comparativo em relação ao receptor de cavidade, por apresentar perdas convectivas e radiativas menores em relação ao receptor utilizado nesse trabalho;
4. Seria importante a utilização de um sistema de armazenamento de energia para os períodos de baixa incidência ou nenhuma incidência dos raios solares;

5. Para centrais de maior porte recomenda-se instalar os espelhos numa ladeira para reduzir o ensobrecimento entre os heliostatos;

6. Para aumentar-se o fator de concentração, proporcionando uma maior temperatura no absorvedor e em consequência no fluido de trabalho, recomenda-se a utilização de um maior número de heliostatos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILAR, J.O. *et al*, **Diseño y construcción de um colector solar de canal parabólico**. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.
2. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE. 2009.
3. BEZERRA, A.M., **Aplicações Térmica da Energia Solar**, Editora Universitária, João Pessoa, Pb, 2001.
4. CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energia Solar) **Avances em Energías Solar**, PROGNSA, Sevilla, Espana, 2001.
5. CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – UNESP, 2005.
6. CHWIEDCK, D., **Solar energy utilization**, Institute of fundamental Technological Research, Polisch Academy of Sciences 21 Swictokrzy Str., 00049 Warsaw, Poland, 2004.
7. COMETTA, E., **Energia solar utilização e empregos práticos**. São Paulo: Editora Hemus Editora Ltda.1978.
8. Congresso Ibérico y IX congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.
9. FILHO, J. R., **Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilíndrico parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 2008.
10. FRAIDENREICH, N. *et al*, **Energia solar: Fundamentos e Tecnologias de conversão heliotérmelétrica e fotovoltaica**, Ed. Universitária, Recife, 1995.
11. INCROPERA, F.P. *et al*, **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, Guanabara Koogan, 4ª edição, Rio de Janeiro, 2003.
12. KEMPER, J.P. **The plataforma solar**. Munich: M.A.N; 1981.
13. LION, C. A. P. Q., **Construção e análise de desempenho de um fogão solar à concentração utilizando dois focos para cozimento direto**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 2007.
14. M.A.N. **Advanced technology. Solar energy. IBICT**. Manual de normas do IBICT. 2 ed. Brasília, DF, 1993. 41 P.

15. MARTÍNEZ, V. *et al*, **Um concentrador solar inovador de reflector estático y foco móvil para procesos de calor**. XIV Congreso Ibérico y IX congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galícia, España, 2008.
16. MARTINS, F. R. *et al*, **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário** - o Projeto Swera, Rev. Bras. Ensino Fís. V. 26, n.2, São Paulo 2004.
17. ROLIM, M.M. *et al*, **Dimensionamento e simulação anual de uma central heliotérmica com coletores parabólicos lineares utilizando solução analítica**. XIV
18. SCHRAMEK, P. *et al*, **Multi-tower solar array**, Department of Applied Physics, University of Sydney, Australia, 2006.
19. SILVIA, C. **Mudanças Ambientais Globais: Pensar + agir na escola e na comunidade**. Brasília: Ministério da educação, Secad: Ministério do Meio ambiente, Saic, p. 24, 2008.
20. SIMMONS, F. G., **Cálculo com Geometria analítica**, Makron Books, Volume 2, São Paulo, Brasil, 1987.
21. SOUZA, L.G.M., **A importância da energia solar como fonte alternativa e o desenvolvimento de um instrumento para medir radiação solar global**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 1987.
22. SOUZA, L.G.M., **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar**, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.
23. SVEN, T., **A sustainable global energy Outlook**; Greenpeace International, European Renewable Energy Council (EREC)2008 São Paulo, SP, Brasil; 2008.
24. ODDONE, D. C., **Co-geração: uma alternativa para produção de eletricidade**, Dissertação de Mestrado do Programa Interinidades de Pós-Graduação em energia da Universidade de Energia de São Paulo – São Paulo/SP, 2001.
25. PÉREZ, M. S., **Sistemas Termosolares de Concentración**, – Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Universidad de Sevilla, Curso 2005.
26. QUEIRÓZ, W. F., **Construção de um fogão solar à concentração para cozimento direto e indireto**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 2005.
27. XIPING W. *et al*, **Nueva cocina solar de caja**. Segundo Congreso Mundial sobre Estufas Solares, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 1994.
28. [www.sciam.com.br / energia solar](http://www.sciam.com.br/energia_solar) 2008.
29. www.greenpeace.org/brasil/energia 2009.

30. www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/energia.
31. www.inpe.gov.br.
32. www.wgate.com.br/conteudo/medicinaesaude/fisioterapia/eletro/radiaçãoinfravermelha.
33. www.abae.pt/programa/EE/desafios/desafio_energia.php.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)