

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE
CAMPUS BAGÉ

LUCAS AMADEU MÜLLER

**CONCENTRADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA
A TEMPERATURAS UTILIZADAS NO CHIMARRÃO E CAFÉ**

Bagé

2012

Lucas Amadeu Müller

**CONCENTRADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA
A TEMPERATURAS UTILIZADAS NO CHIMARRÃO E CAFÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel.

Orientador: Fabio Luis Tomm

Bagé

2012

Müller, Lucas Amadeu

Concentrador solar de baixo custo para aquecimento de água a temperaturas utilizadas no chimarrão e café / Lucas Amadeu Müller. Janeiro de 2012.

Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pampa, Dezembro de 2011. Orientação: Fabio Luis Tomm.

1. Concentrador Solar. 2. Aquecimento de água. I. Tomm, Fábio. II Concentrador solar de baixo custo para aquecimento de água a temperaturas utilizadas no chimarrão e café.

Lucas Amadeu Müller

**CONCENTRADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA A TEMPERATURAS UTILIZADAS NO
CHIMARRÃO E CAFÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:
Banca examinadora:

Prof. Dr. Jocemar Parizzi

Prof. Dr. Carlos Guilherme da Costa Neves

Prof. Dr. Fábio Luis Tomm

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, pelo amparo e apoio incondicional. Aos meus colegas e amigos que sempre me ajudaram quando precisei, principalmente ao Adilson, Martim, Gabriel, Igor, Ronaldo e Sérgio. A minha namorada Marcela. Aos meus professores por todo aprendizado que me foi passado e, principalmente, ao meu orientador, Fabio Luis Tomm.

RESUMO

Este projeto tem por objetivo montar um dispositivo capaz de aquecer uma quantidade determinada de água a níveis de temperatura ideais para uso no chimarrão e café dos alunos, professores e funcionários da UNIPAMPA. O método consiste no aquecimento por concentrador solar, onde uma grande área de refletores reflete a radiação solar, fazendo com que os raios converjam para o coletor solar onde a água estará contida. Para que a mesma aumente sua temperatura, utilizar-se-á o processo de refluxo do fluido passante pela tubulação, possibilitando que a água atinja temperaturas em torno de 70°C – 80°C, ideais para a finalidade. Além de ajudar a suprir a demanda de água quente para alunos, professores e técnicos, tem-se por objetivo aproximar as fontes renováveis e alternativas, principalmente de baixo custo, a sociedade acadêmica e população em geral, incentivando seu uso e mostrando que estas “tecnologias” estão próximas e são absolutamente possíveis de ser implementadas. Ainda com este projeto, visa-se divulgar o curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente pela aplicação dos conhecimentos adquiridos.

Palavras-chave: Radiação Solar. Concentrador Solar. Aquecimento de Água.

ABSTRACT

This project aims to build a device capable of heating a certain amount of water at temperature levels ideal for use in mate tea and coffee from students, faculty and staff UNIPAMPA. The method consists of heating by solar concentrator, where a large area reflectors reflect solar radiation, causing the rays converge to the solar collector where the water will be contained. For it to increase its temperature, it will use the reflow process of the fluid passing through the pipe, allowing the water to temperatures around 70 ° C - 80 ° C, ideal for the purpose. In addition to helping meet the demand of hot water for students, teachers and technicians, has been designed to approximate the renewable and alternative sources, especially low-cost, academic society and the general public, encouraging its use and showing that these "technologies" are close and are absolutely possible to be implemented. Even with this project aims to disseminate the course of Renewable Energy Engineering and Environment for the application of acquired knowledge.

Keywords: Solar Radiation. Solar Concentrator. Water Heating.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Distribuição espectral da intensidade de radiação de um corpo negro.....	13
FIGURA 2 - Distribuição espectral desde o ultravioleta até o infravermelho	14
FIGURA 3 - Espectro e respectiva cor para comprimentos de onda da região do visível	14
FIGURA 4 - Movimento da Terra em relação ao Sol durante o ano.....	18
FIGURA 5 - a) Solstício de Verão no H. N. b) Solstício de Verão no H. S.....	19
FIGURA 6 - Ângulo Zenital em dois horários distintos	20
FIGURA 7 – Representação do Ciclo	24
FIGURA 8 - Esquema de Concentrador Cilíndrico	25
FIGURA 9 - Esquema de Concentrador de receptor central	26
FIGURA 10 - Imagem de satélite da localização exata do concentrador.....	27
FIGURA 11 - Localização do coletor num panorama mundial	27
FIGURA 12 - Radiação que atinge a atmosfera e a superfície terrestre.....	28
FIGURA 13 - Valores de radiação que atingem o solo em Bagé – RS.....	29
FIGURA 14 - Atlas Solarimétrico Brasileira para Janeiro.....	29
FIGURA 15 - Índices de radiação direta para a América do Sul	30
FIGURA 16 - Configuração de um espelho côncavo.....	32
FIGURA 17 - Características de reflexão de um espelho côncavo	32
FIGURA 18 – Base de tonel cortado.....	38
FIGURA 19 - Chapa de alumínio.....	38
FIGURA 20 - Chapa de alumínio presa a base de latão	39
FIGURA 21 - Espelhos cortados	39
FIGURA 22 - Espelhos colados ao suporte.....	40
FIGURA 23 - Esboço no SolidWorks para determinação do raio	40
FIGURA 24 - Concentrados já com as hastes de suporte do tubo absorvedor.....	41
FIGURA 25 - Hastes de sustentação do lado Norte	41
FIGURA 26 - Tubo de cobre pronto	42
FIGURA 27 - Apoio de sustentação para inclinação variável.....	42
FIGURA 28 - Haste responsável pela variação de inclinação.....	43
FIGURA 29 - Reservatório térmico com as adaptações	43
FIGURA 30 - Suporte para o reservatório térmico	44
FIGURA 31 - Suportes fixos instalados	45
FIGURA 32 - Tubos e algumas conexões	45
FIGURA 33 - Aparato montado e instalado, sem o invólucro de vidro no tubo absorvedor ...	46
FIGURA 34 - Tubo de cobre com invólucro de vidro	46
FIGURA 35 - Inclinação pequena	47
FIGURA 36 – Inclinação grande.....	47
FIGURA 37 - Gráfico do resultado de testes sem invólucro.....	49
FIGURA 38 - Gráfico do teste com invólucro	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	Origem da Energia Solar	12
2.2	Geometria Terra-Sol	16
2.2.1	Periélio e Afélio	16
2.2.2	Distância Terra-Sol	16
2.2.3	Orientação da Terra e as estações do ano	17
2.2.4	Equinócio	18
2.2.5	Solstício	18
2.3	Valores de Radiação	19
2.4	Energia Solar Concentrada	21
2.4.1	Como funcionam as tecnologias	24
2.4.1.1	Parabólicos Cilíndricos.....	25
2.4.1.2	Receptor Central ou Torre Solar	26
2.5	Localização do Coletor	26
2.6	Índices de Radiação	27
2.7	Dimensionamento	30
2.8	Geometria do Concentrador.....	31
2.8.1	Orientação do Coletor.....	33
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Materiais Utilizados	35
3.2	Preparação dos Materiais	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5	CONCLUSÃO	51
	BIBLIOGRAFIA	53

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda energética, da preocupação com as conseqüências no meio ambiente que são causadas pela poluição e também pela busca de diversificação de fontes, o mundo volta os olhos para novas tecnologias de geração de energia. As que prevalecem são as que se mostram mais viáveis economicamente e, principalmente, não afetem de maneira destrutiva o lugar onde vivemos.

O Sol é a maior e principal fonte de energia que existe. Dele derivam quase todas as demais fontes energéticas que se conhece. As reações, que em seu interior ocorrem, geram ondas eletromagnéticas, que transportam toda esta energia. Chegando até a Terra, esta radiação propicia aquecimento, movimentos de massas de ar e água, desenvolvimento de plantas que geram biomassa e os hidrocarbonetos fósseis, calor para reações de formação destes últimos, provoca o efeito fotoelétrico, entre tantas outras transformações que podem nos fornecer energia direta ou indiretamente.

Durante o ano o sol irradia sobre a atmosfera aproximadamente $1,5125 \times 10^{18}$ kWh de energia [1], o que representa cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período [2]. Deste consumo, apenas uma pequena parte provém do aproveitamento direto da energia solar, dentre os quais podemos citar os coletores solares que usam a radiação solar para o aquecimento direto da água para aproveitamento em residências, hotéis, etc; o aproveitamento direto na chamada arquitetura ou edificação sustentável – refere-se a construção de prédios que aproveitam a luz e o calor do sol para reduzir o consumo de energia elétrica; através do desenvolvimento da eletrônica, é utilizada pelas células fotovoltaicas que transformam diretamente a energia solar em energia elétrica; e ainda pelo uso de concentradores em usinas termelétricas solares, principal aplicação do tema do estudo que será apresentado.

Com o presente trabalho pretende-se projetar, construir, operar e estudar o comportamento de um sistema de aquecimento solar de água a altas temperaturas, totalmente independente de outra forma de energia, com a finalidade de uso da água quente para consumo no chimarrão e café de toda sociedade acadêmica da UNIPAMPA - Campus Bagé, inclusive durante o inverno.

Além disso, este projeto visa aproximar o curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente à comunidade, bem como as fontes de energias renováveis e alternativas, de baixo custo e que realmente trazem benefícios e comodidade ao nosso cotidiano, sem causar nenhum tipo de dano ao meio ambiente.

Vários são os estímulos, dentre eles:

- Demanda por água quente para consumo de chimarrão, café e chá na UNIPAMPA, principalmente em estações frias do ano.

- Independência do fornecimento de energia elétrica e gás liquefeito de petróleo, GLP (gás de cozinha).

- A não necessidade de utilização de nenhum equipamento auxiliar por parte do usuário, como o ebulidor (resistor) elétrico de água, ou um forno microondas, ou o fogão a gás e a chaleira, entre outros.

O método consiste num sistema baseado na concentração da radiação solar em um determinado foco, para que através desta concentração o fluido de trabalho, no caso a água, circulando pela tubulação localizada no foco, possa receber uma quantidade maior de radiação e, assim, atingir temperaturas mais elevadas.

O princípio é o mesmo de fogões solares, uma área refletora converge a radiação e consegue fornecer tanta energia quanto um alimento necessita para ser preparado.

Neste caso, a concentração se dará por meio de coletores solares parabólicos espelhados de forma semi-cilíndrica côncava, comumente chamados pela literatura de Concentradores Cilíndricos Parabólicos (CCP).

O armazenamento da água já aquecida é feito em um reservatório bem isolado termicamente, com capacidade para cerca de 10 litros, de onde será retirada para consumo pelo usuário. Caso a oferta seja maior que a demanda, em momentos de pouco consumo, a água poderá passar novamente, através de refluxo, devido a convecção natural, pela tubulação dos coletores para ser reaquecida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Origem da Energia Solar

No interior do Sol, através de reações termonucleares, dois núcleos de hidrogênio se reúnem formando um átomo de hélio, liberando uma grande quantidade de energia. Isso se deve ao fato de uma pequena quantidade de massa que durante o processo se converte em uma grande quantidade de energia.

Devido a campos gravitacionais e magnéticos, existem regiões com densidades e temperaturas diferentes, isto faz com que o Sol emita radiação eletromagnética que varia desde raios-x, com comprimento de onda de poucos nanômetros e altas frequências; até ondas de rádio com comprimentos de onda da ordem de quilômetros e frequência de alguns quilohertz, conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1
Limites do Espectro de Radiação Eletromagnética

Região	Comprimento de Onda (nm)	Frequência (Hz)
Raios-x	$1 \times 10^{-1} - 10$	$3 \times 10^{18} - 3 \times 10^{16}$
Ultravioleta	10 – 400	$3 \times 10^{16} - 7.5 \times 10^{14}$
Luz visível	400 – 800	$7.5 \times 10^{14} - 3.75 \times 10^{14}$
Infravermelho	800 – 1×10^6	$3.75 \times 10^{14} - 3 \times 10^{11}$
Microondas	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^9$	$3 \times 10^{11} - 3 \times 10^8$
Ondas de rádio	$1 \times 10^9 - 1 \times 10^{13}$	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^4$

Fonte: Livro Solar energy; renewable energy and the environment. Robert Foster et al, 2010

O valor do comprimento de onda de máxima emissão também é diretamente influenciado pela temperatura. A figura 1 mostra a relação da intensidade de radiação com a temperatura que o corpo se encontra e o comprimento de onda emitido, nesse caso considerando um corpo negro. Por simplicidade, o Sol é dito como um corpo negro a uma temperatura de 6000 K.[3]

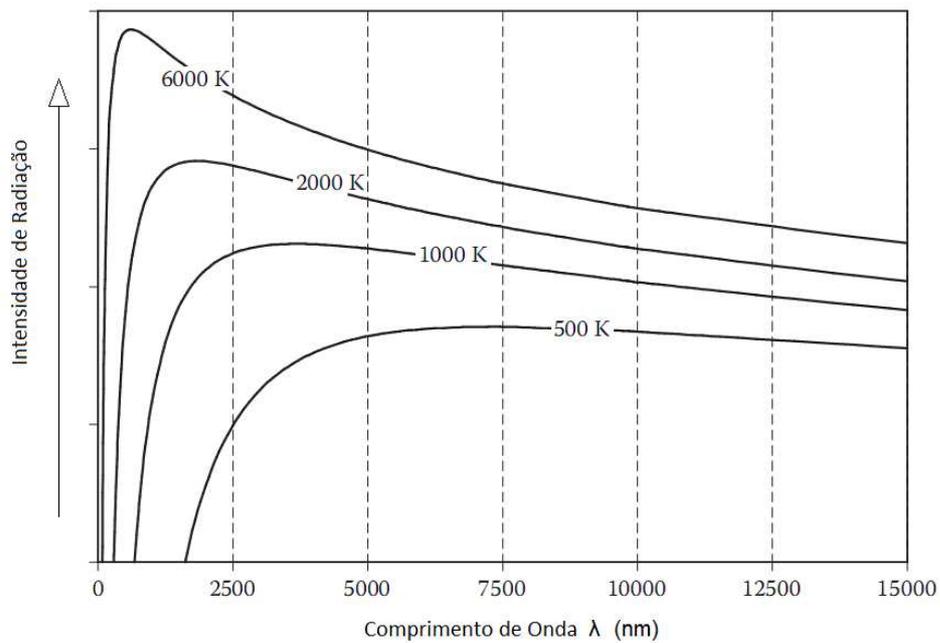


FIGURA 1 - Distribuição espectral da intensidade de radiação de um corpo negro
 Fonte: Livro Solar energy; renewable energy and the environment. Robert Foster et al, 2010

A figura 2 ilustra o espectro solar em uma faixa mais estreita e mais característica do Sol, abrangendo a região desde o ultravioleta, luz visível, até o infravermelho. Observa-se que a maior parte da radiação cai sobre a região do visível, com um pico próximo ao comprimento de onda de aproximadamente 480 nm. Obedecendo a relação imposta pela Lei de Wien (equação 1), que nos indica qual é o comprimento de onda de máxima emissão ($\lambda_{m\acute{a}x}$) para uma dada temperatura (T, em Kelvin) da fonte emissora (corpo negro). A região sob a curva do gráfico representa quase 94% da energia irradiada pelo Sol. A curva é comparada a radiação de um corpo negro a 5800 K.[3]

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,897\ 768 \times 10^6 \text{ (nmK)}}{T \text{ (K)}} \quad (1)$$

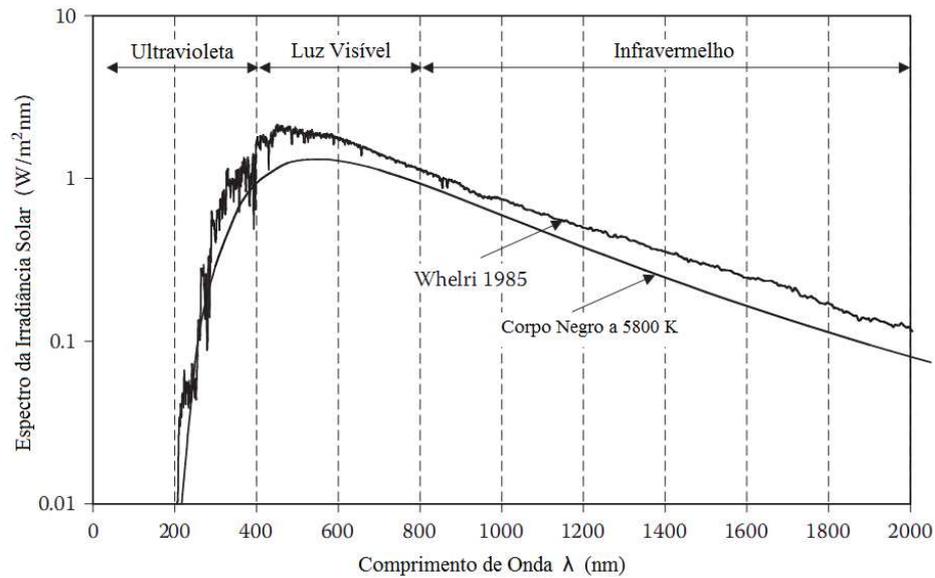


FIGURA 2 - Distribuição espectral desde o ultravioleta até o infravermelho
 Fonte: Livro Solar energy; renewable energy and the environment. Robert Foster et al, 2010

A Tabela 2 mostra o valor da fração da irradiância solar emitida para comprimentos de onda abaixo do respectivo valor.

Como a temperatura do Sol é estimada em torno de 5800 – 6000 K, considerado um corpo negro, resulta num comprimento de onda de máxima emissão por volta de 480 – 500 nm, que coincide com a região da luz azul e anil, vide figura 3. A luz do Sol nos aparenta amarela devido ao fato da atmosfera filtrar os comprimentos de onda menores do espectro visível, deixando passar apenas o verde, amarelo, laranja e vermelho, que resultam numa cor amarelada.

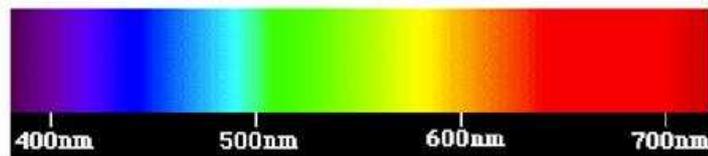


FIGURA 3 - Espectro e respectiva cor para comprimentos de onda da região do visível
 Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/rad/rad.htm>. Acessado em 20 de outubro de 2011.

TABELA 2
Frações da Irradiância Solar desde Ultravioleta até Infravermelho

λ (nm)	$f_{0-\lambda}$	λ (nm)	$f_{0-\lambda}$	λ (nm)	$f_{0-\lambda}$
200	0.012	1150	0.74963	2100	0.93041
250	0.00149	1200	0.76828	2137	0.93328
300	0.01112	1250	0.78622	2200	0.93615
350	0.03982	1300	0.802	2250	0.93902
400	0.07854	1350	0.81706	2302	0.94188
450	0.14117	1400	0.82998	2342	0.94332
500	0.2124	1450	0.84217	2402	0.94619
550	0.27962	1500	0.85293	2442	0.94762
600	0.34511	1550	0.86369	2517	0.95049
650	0.40709	1600	0.87302	3025	0.96269
700	0.46068	1650	0.88163	3575	0.96986
750	0.50659	1700	0.88952	4085	0.97345
800	0.54963	1750	0.89669	5085	0.97704
850	0.58815	1800	0.90315	5925	0.97847
900	0.62259	1850	0.90889	7785	0.9799
950	0.65265	1900	0.91391	10075	0.98062
1000	0.68084	1950	0.91821	∞	1.00000
1050	0.7063	2000	0.92323		
1100	0.72883	2050	0.92682		

Fonte: Livro Solar energy; renewable energy and the environment. Robert Foster et al, 2010

Analisando a Tabela 2 e o Quadro 1, percebe-se que as ondas na região do ultravioleta (10 – 400 nm) representam 7,7% da irradiação emitida pelo Sol, enquanto que 47,1% localiza-se na região da luz visível (400 – 800 nm) e 43,1% na região do infravermelho (sendo 30,3% no infravermelho próximo, ou seja, de 800 até 1500 nm, e 12,8% na região do infravermelho, acima de 1500 nm). Porém, a quantidade de energia de uma onda é maior para frequências maiores, sendo assim, a radiação ultravioleta é mais energética que a visível, que por sua vez, é mais energética que a infravermelha. Essa característica pode ser comprovada com observância na Lei e no Postulado de Planck, esboçado na equação 2.

$$E = h f \quad (2)$$

Onde E é a energia do quanta, h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ joule.sec) e f é a frequência da onda.

2.2 Geometria Terra-Sol

A quantidade e intensidade da radiação emitida pelo Sol que chega a Terra depende da diferentes geometrias entre ambos. A órbita que a Terra realiza ao entorno do Sol configura uma forma elíptica, muito próxima de um círculo, com excentricidade de 0,0167, porém, o centro desta elipse não se localiza no mesmo ponto do centro do Sol. [3]

2.2.1 Periélio e Afélio

A partir desta diferença surge o periélio e o afélio. Durante o periélio, datado nos dias 4 de janeiro de cada ano, que é a menor distância Sol-Terra (147 milhões de km), existe um maior índice de radiação chegando à superfície terrestre. Ao passo que, durante o afélio, nos dias 4 de julho, tem-se a maior distância para o sistema (152 milhões de km), e essa radiação é a menor possível.[3]

2.2.2 Distância Terra-Sol

A equação 3 nos mostra a distância Terra-Sol real (E_0), dada em Unidades Astronômicas (1 UA \approx 150 milhões de quilômetros), desenvolvida através de séries de Fourier, para o dia específico do ano que se deseja. [3]

$$E_0 = 1,000110 + 0,03422\cos\Gamma + 0,00128\sin\Gamma + 0,000719\cos2\Gamma + 0,000077\sin2\Gamma \quad (3)$$

Onde Γ representa o ângulo diário, sendo calculado pela equação 4.

$$\Gamma = 2\pi \frac{n-1}{365} \quad (4)$$

Sendo n igual ao número do dia do ano, ou dia Juliano, ($1 \leq n \leq 365$), que pode ser obtido por meio da Tabela 3.

TABELA 3
Fórmula de cálculo do n para cada mês

Exemplo de dia do mês (<i>i</i>)	Mês	Fórmula de n para cada mês	Resultado de n
17	Janeiro	i	17
16	Fevereiro	$31 + i$	47
16	Março	$59 + i$	75
15	Abril	$90 + i$	105
15	Mai	$120 + i$	135
11	Junho	$151 + i$	162
17	Julho	$181 + i$	198
16	Agosto	$212 + i$	228
15	Setembro	$243 + i$	258
15	Outubro	$273 + i$	288
14	Novembro	$304 + i$	318
10	Dezembro	$334 + i$	344

Fonte: Livro Solar energy; renewable energy and the environment. Robert Foster et al, 2010

Uma outra equação que também calcula E_0 , menos complexa e com resultado próximo da Equação 3, é a equação 5. [3]

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \quad (5)$$

A máxima variação de distância fica abaixo de 3,5% de aumento no afélio em relação à média, e abaixo de 3,5% de diminuição para o periélio em relação à média, devido à característica do comportamento da energia irradiada de uma fonte emissora diminuir numa proporção inversa ao quadrado da distância, a diferença de energia que chega durante esses dois períodos à Terra é relevante.

2.2.3 Orientação da Terra e as estações do ano

A Terra gira em torno de seu próprio eixo na direção Leste, dando a sensação que o Sol se move na direção oeste, levando em média 24 horas para completar uma volta. Este eixo está inclinado $23,45^\circ$ do plano perpendicular ao plano da elíptica e permanece constante durante toda trajetória, conforme mostra a Figura 4. Essa inclinação - e não as diferentes distâncias entre Sol-Terra - é a responsável pelas diferentes estações que temos durante o ano.

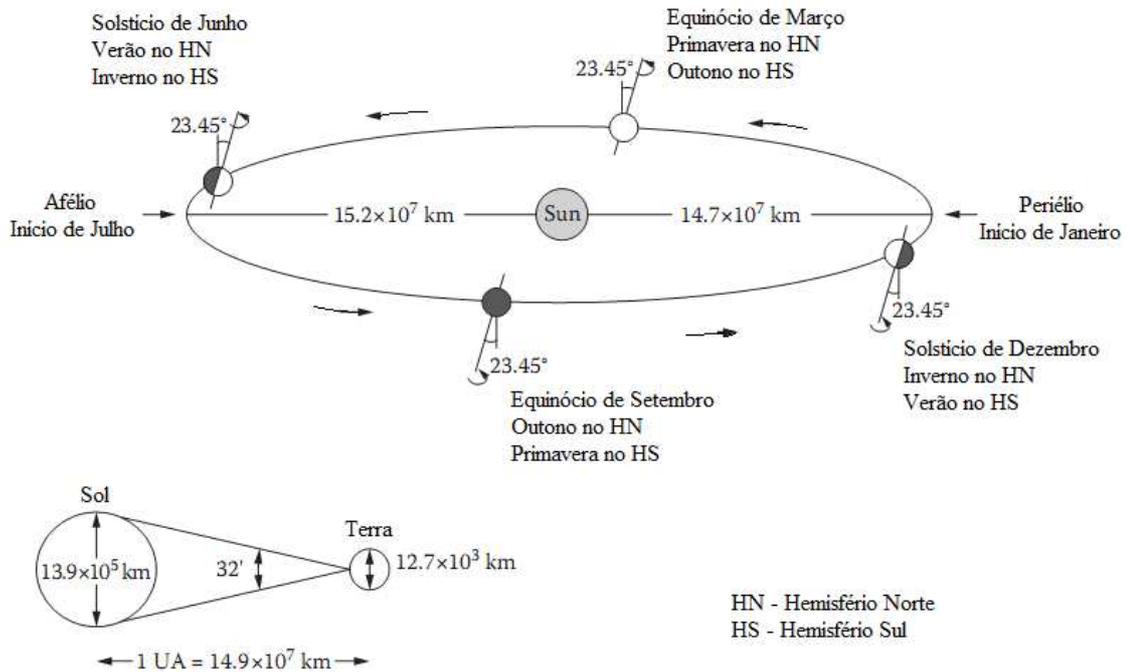


FIGURA 4 - Movimento da Terra em relação ao Sol durante o ano
Fonte: Livro Solar energy; renewable energy and the environment. Robert Foster et al, 2010

2.2.4 Equinócio

Durante os equinócios o eixo está perfeitamente perpendicular ao plano da elíptica, porém inclinado $23,45^\circ$ na direção do deslocamento translacional. Isso acarreta numa equivalência de intensidade de radiação chegando aos dois hemisférios ao mesmo tempo. Provocando os equinócios, ou seja, o dia e a noite tem a mesma duração em todos os lugares do planeta. Os equinócios ocorrem nos meses de março e setembro, quando definem mudanças de estação. Em março, o equinócio marca o início da primavera no hemisfério norte e o outono no hemisfério sul. Em setembro, ocorre o inverso, o equinócio marca o início do outono no hemisfério norte e da primavera no hemisfério sul.

2.2.5 Solstício

No solstício, esta inclinação se dá na direção Terra-Sol. O solstício de junho ocorre quando o pólo norte geográfico da Terra se encontra mais próximo do Sol, e o pólo Sul se localiza mais afastado (Figura 5.a). Esta configuração faz com que o pólo Norte receba mais radiação aqueça mais, resultando no verão no Hemisfério Norte e inverno Hemisfério Sul. Em dezembro esta inclinação se inverte (Figura 5.b), fica ainda na direção Terra-Sol, porém o

pólo Sul fica mais próximo ao Sol que o Norte, como consequência, tem-se o verão no Hemisfério Sul e inverno no Hemisfério Norte.



FIGURA 5 - a) Solstício de Verão no H. N. b) Solstício de Verão no H. S.
Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>. Acessado em 20 de outubro de 2011.

Como o solstício de dezembro ocorre próximo ao periélio, o verão do Hemisfério Sul é mais rigoroso que o verão do Norte. O mesmo ocorre com o solstício de junho, que ocorre no afélio, causando um inverno mais intenso no Hemisfério Sul em relação ao inverno do Norte.

O cálculo da declinação solar (δ) é feito através da equação 5, onde através da entrada de número do dia do ano, descobre-se este ângulo, que pode variar no intervalo de $-23,45^\circ$, para $n = 355$, representando o solstício de 21 de dezembro e $+23,45^\circ$, para $n = 172$, durante o solstício de 21 de junho. A configuração de $\delta=0^\circ$ ocorre nos equinócios, onde $n = 81$ no equinócio de 22 de março e $n = 264$ quando for o equinócio de 21 de setembro.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365}(n + 284)\right) \quad (6)$$

2.3 Valores de Radiação

O valor da irradiância média que chega à Terra, em uma superfície plana e perpendicular aos raios solares, no topo da atmosfera terrestre, é igual a 1367 W/m^2 , a chamada Constante Solar (I_0), que é calculada com base a uma distância média Terra-Sol ($1 \text{ UA} \approx 149$ milhões de km), não variando, com o passar dos anos, mais do que 4 W/m^2 para mais ou menos. [3]

Caso a Terra esteja a uma distância do Sol diferente da distância média, a irradiância solar extraterrestre (I_0') irá aumentar, se ela estiver mais perto, ou diminuir, se estiver mais

longe, de acordo com a Lei do Inverso do Quadrado da Distância, é o que nos mostra a equação 7.

$$I_0' = I_0 \times E_0 \quad (7)$$

Onde E_0 é dado pela equação 5.

Sendo assim os valores de irradiância Solar podem variar de 1322 W/m² para o afélio até 1412 W/m² para o periélio.

Porém, a irradiância solar que chega a superfície terrestre varia principalmente com o ângulo de incidência dos raios solares. Esse ângulo é determinado pelo ângulo zenital, formado pelo Zênite local e os raios solares. O zênite local é o vetor normal à superfície terrestre. Representado na figura 6.

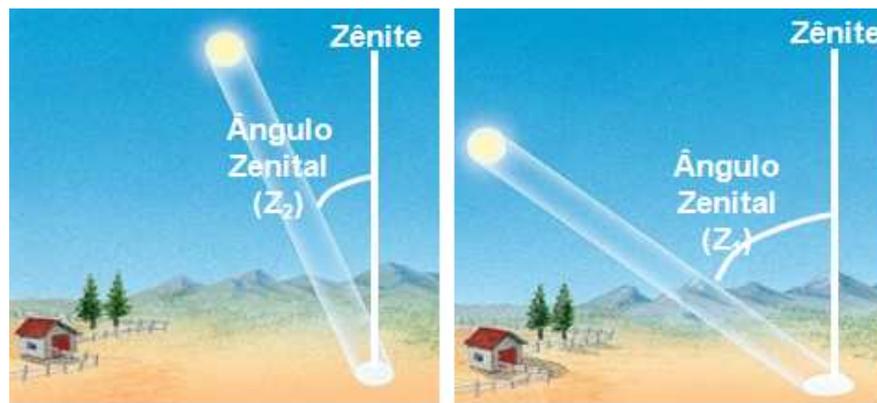


FIGURA 6 - Ângulo Zenital em dois horários distintos

Fonte: ce.esalq.usp.br/aulas/lce630/Conceitos_tempo_clima.pps. Acessado em 28 de outubro de 2011

Com a Lei do Cosseno de Lambert (Equação 8), relaciona-se a irradiância solar e o ângulo zenital de cada instante (Z_h)

$$I = I_0' \times \cos Z_h \quad (8)$$

O cálculo de Z_h segue na equação 9.

$$\cos Z_h = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(h) \quad (9)$$

Onde ϕ representa a latitude do local, variando de 0 até $\pm 90^\circ$, e h o ângulo horário, obtido pela equação 10.

$$h = (\text{Hora Local} - 12) \times 15 \quad (10)$$

A Hora Local é dada em termos de 24 horas.

2.4 Energia Solar Concentrada

Sistemas CSP (energia solar concentrada) produzem calor ou eletricidade usando centenas de espelhos para concentrar os raios de sol a uma temperatura tipicamente entre 400 e 1000 °C. Há uma variedade de formas de espelho, métodos que orientam os painéis e formas de fornecer energia útil, mas todos eles trabalhar sob o mesmo princípio. Plantas CSP individuais variam de 50 a 280MW em tamanho, mas podem ser muito maiores.[7]

Os princípios da concentração da radiação solar para criar altas temperaturas e convertê-la em energia elétrica são conhecidos há mais de um século, mas foram apenas explorados comercialmente desde meados dos anos 1980. A primeira estação de energia solar concentrada (CSP) em larga escala foi construída na Califórnia, no Deserto de Mojave. Em um tempo muito curto, este processo tem demonstrado grande promessa tecnológica e econômica. Tem uma grande vantagem - um maciço recurso renovável, o sol - e muito poucas desvantagens. Para as regiões com características semelhantes aos regimes de sol da Califórnia, concentradores de energia solar oferecem a mesma oportunidade como os grandes parques eólicos offshore na Europa. A concentração de energia solar para gerar eletricidade em grande escala é uma das tecnologias mais adequadas para mitigar mudanças climáticas de forma acessível, bem como reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Pode operar tanto por armazenamento de calor ou pela combinação com geração a partir de combustíveis fósseis, fornecendo energia nos momentos em que não há sol.[7]

O principal benefício de sistemas CSP está na substituição da energia gerada por combustíveis fósseis e, portanto, redução nas emissões de gases de efeito estufa, causadores de mudanças climáticas. Cada metro quadrado de superfície de concentrador, por exemplo, é suficiente para evitar 200-300 quilogramas (kg) de CO₂ a cada ano, podendo variar um pouco de acordo com sua configuração [7]. Usinas de energia típicas são compostas de centenas de concentradores dispostos superficialmente em uma vasta área. A avaliação do ciclo de vida dos componentes é bem favorável, estudos demonstram que podem durar muito mais de 40 anos, como demonstrado nas plantas Mojave, além disso, a maioria dos materiais pode ser reciclado. [4]

O custo da energia solar térmica está caindo. Experiência nos EUA mostra que os custos atuais de geração são de cerca de 15 centavos de dólar por kWh de eletricidade solar gerada em locais com bons índices de radiação, com custos previstos baixando para 8 centavos de dólar por kWh em algumas circunstâncias [7]. O desenvolvimento da tecnologia está em uma curva ascendente de aprendizagem, e os fatores que reduzirão os custos são melhorias de tecnologia, produção em massa, economias de escala e melhorias no processo como um todo e na operação que virão acompanhando a popularização e difusão desta forma de geração. A CSP está se tornando competitiva com a energia elétrica convencional, e adicionando mais sistemas CSP para a rede pode ajudar a manter os custos da eletricidade estável, evitando aumento drásticos de preços com a escassez de combustível ou por efeito dos custos de carbono na mitigação da poluição causada.

Plantas híbridas podem usar energia solar concentrada e combustíveis fósseis (ou biocombustíveis) juntos. Algumas, que fazem uso de esquemas de financiamento especial, já podem fornecer eletricidade a preços bem competitivos em pequena escala na geração de energia desconectada da rede, como em ilhas ou no interior rural dos países, em contraposição aos geradores de motor a diesel, que são barulhentos, sujos e sua operação depende do fornecimento do combustível.

Vários fatores estão aumentando a viabilidade econômica de projetos CSP, incluindo a reforma do setor elétrico, a demanda crescente de “energia verde”, e o desenvolvimento de mercados globais de carbono para a geração de energia livre de poluição. Regimes de apoio direto também dão um forte impulso, como feed-in em leis ou criação de novas normas, específicas para o apoio e auxílio na forma de benefícios para energias renováveis

Ainda, com o aumento dos preços dos combustíveis fósseis se elevando, e o preço da energia solar caindo, tem-se a tendência dos preços se cruzarem e inverter o cenário atual. Embora seja necessário um investimento inicial elevado para novas usinas CSP, ao longo do seu ciclo de vida, 80% dos custos estão na construção e na dívida associada, e apenas 20% na operação. Isto significa que, uma vez que a planta tenha sido paga, ao longo de aproximadamente 20 anos, apenas os custos operacionais permanecem, que são atualmente cerca de 3 centavos de dólar por kWh. [7]

A Energia solar térmica concentrada usa apenas a radiação solar direta. Ou seja, é a luz do sol que não é desviada por nuvens, fumaça ou poeira na atmosfera e que atinge a superfície da Terra em feixes paralelos para a concentração. Locais adequados são aqueles que obtem uma boa quantidade deste sol diretamente - pelo menos 2.000 kilowatt hora (kWh) de radiação solar por metro quadrado anualmente. Os melhores lugares recebem mais de

2.800 kWh/m² por ano. Regiões típicas para CSP são aquelas sem grandes quantidades de umidade atmosférica, poeira e fumaça, onde incluem-se estepes, arbustos, savanas, semi-desertos e desertos, idealmente localizado a menos de 40 graus de latitude norte ou sul. Portanto, as áreas mais promissoras do mundo incluem a região sudoeste dos Estados Unidos, América do Sul e Central, Norte e Sul da África, os países europeus da região do Mediterrâneo, Oriente Médio, o Irã e as planícies do deserto da Índia, Paquistão, ex-União Soviética, China e Austrália.

Nessas regiões, 1 km quadrado de superfície terrestre é suficiente para gerar 100-130 gigawatts hora (GWh) de energia elétrica solar por ano, utilizando a tecnologia térmica solar. Isto é o mesmo que a energia produzida por uma usina convencional de carvão ou gás de 50 MW. [7]

Ao longo de todo ciclo de vida de um sistema de energia solar térmica desta configuração, sua produção seria equivalente à energia contida em mais de 5 milhões de barris de petróleo. [7]

O planeta está sofrendo mudanças climáticas. Se temperaturas médias anuais subir mais de 2 °C, o mundo inteiro irá enfrentar mais desastres naturais, secas mais prolongadas, insuficiência de áreas agrícolas e perda massiva de espécies. Essas mudanças climáticas são causadas, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis, precisamos urgentemente de uma revolução energética, a mudança de energia proveniente em sua grande maioria de fontes não-poluentes. Para evitar a perigosa mudança climática, as emissões globais devem ter pico em 2015 e começar a declinar, chegando próximo de zero quanto possível, por meados da metade do século. CSP é uma forma de geração de grande escala e comercialmente viável para fazer eletricidade. É mais adequado para as áreas do mundo com mais sol, onde muitos estão sofrendo de pico de problemas de eletricidade, apagões e custos de eletricidade subindo. CSP não contribuem para as alterações climáticas e a fonte nunca vai acabar. A tecnologia está madura suficiente para crescer de forma exponencial em todo mundo.

Nos últimos sete anos, a indústria expandiu-se rapidamente de uma tecnologia recém-introduzida para se tornar uma de produção em massa e em dos principais caminhos para a solução da geração de energia. Usinas CSP estavam fornecendo apenas 436 MW da geração mundial de eletricidade no final de 2008. No ano passado, projetos em construção, principalmente na Espanha, adicionaram pelo menos mais 1.000 MW. Nos EUA, os projetos somando mais de 7.000 MW, estão sob planejamento e desenvolvimento, e mais de 10.000 GW na Espanha, que poderiam estar conectados a rede até 2017. De acordo com o Global Outlook CSP 2009, sob um cenário de desenvolvimento avançado da indústria, com níveis

elevados de eficiência energética, CSP pode atender até 7% da potência projetada que o mundo precisa em 2030 e um quarto do total até 2050. [7]

Mesmo com um conjunto de pressupostos moderados para o futuro desenvolvimento do mercado, o mundo teria uma capacidade de energia solar de mais de 830 GW até 2050, com implementações anual de 41 GW. Isso representaria 3,0 - 3,6% da demanda global em 2030 e de 8,5 - 11,8% em 2050.

2.4.1 Como funcionam as tecnologias

Uma vasta gama de tecnologias podem ser usadas para se concentrar e coletar a energia solar e transformá-lo em calor de média a alta temperatura. Este calor é então utilizado para criar energia elétrica de uma maneira convencional, por exemplo, usando uma turbina a vapor de ciclo Rankine ou turbinas a gás ou um motor Stirling (figura 7). A energia solar coletada durante o dia também pode ser armazenada no estado líquido ou meios sólidos, tais como sais fundidos, cerâmica, concreto ou na mudança de fase de misturas de sal. À noite, pode ser extraído do meio de armazenamento para manter a turbina em operação. Usinas solar térmica que utilizam apenas energia solar trabalham bem na geração para suprir o pico do meio-dia de verão das cargas em regiões com as exigências de arrefecimento significativo, como Espanha e na Califórnia.

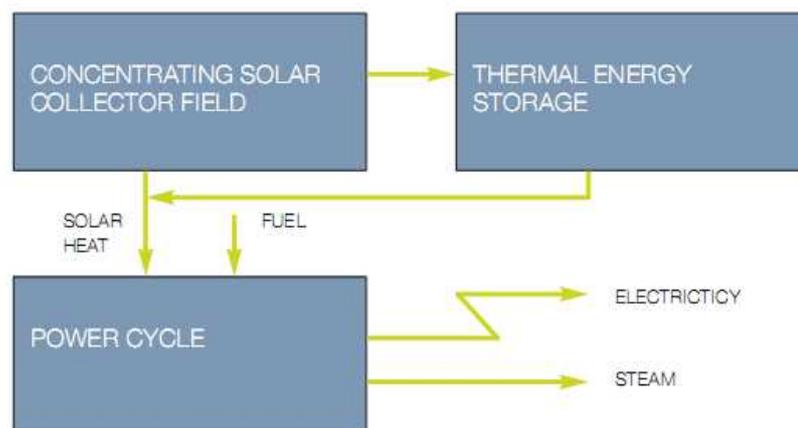


FIGURA 7 – Representação do Ciclo

Fonte: Concentrating solar power OUTLOOK 2009. Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA

Com o armazenamento de energia térmica, sistemas operam mais tempo e fornecem eletricidade até mesmo no início da noite, horário que ocorre maior demanda. Por exemplo, na Espanha, as plantas Andasol de 50 MW são projetadas para cerca de 8 horas de

armazenamento térmico, aumentando a disponibilidade anual de cerca de 1.000 para 2.500 horas de geração. [7]

O sistema de concentração por espelhos utilizado em plantas CSP, pode ser de foco linear ou de foco pontual. Sistemas de foco linear concentram a radiação cerca de 100 vezes, e conseguem temperaturas de trabalho de até 550 °C, enquanto que em focos pontuais pode-se concentrar muito mais do que 1.000 vezes e alcançar temperaturas de trabalho de mais de 1.000 °C. Há quatro tipos principais de tecnologias comerciais CSP: parabólicos (cilíndricos) e sistemas lineares fresnel, que são de concentração linear, e parabólicos pratos (esféricos) e receptores centrais que são de concentração pontual, esse último também é chamado de torre solar.

2.4.1.1 Parabólicos Cilíndricos

Refletores parabólicos cilíndricos possuem forma de calha espelhada, são usados para concentrar a radiação solar para um eficiente tubo receptor térmico colocado na linha focal da calha (figura 8). Este método é o que será usado neste projeto. Os concentradores são geralmente projetados para rastrear o Sol ao longo de um eixo, predominantemente norte-sul. Um fluido de transferência térmica, tais como óleo térmico sintético, circula nestes tubos. O líquido é aquecido até aproximadamente 400 °C pelos raios do sol concentrados e então bombeado passando através de uma série de trocadores de calor para produzir vapor superaquecido. O vapor é convertido em energia elétrica em uma turbina geradora convencional, que pode ser parte de um ciclo a vapor convencional ou integrado a um conjunto de vapor e ciclo de turbina a gás.

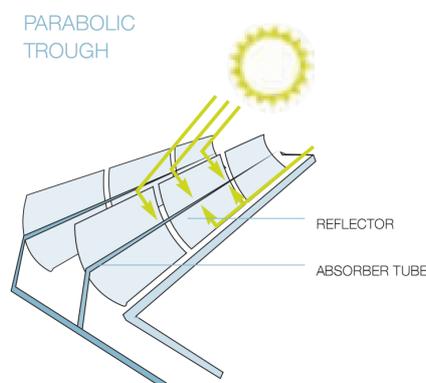


FIGURA 8 - Esquema de Concentrador Cilíndrico

Fonte: Concentrating solar power OUTLOOK 2009. Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA

2.4.1.2 Receptor Central ou Torre Solar

Composta por uma matriz circular de heliostatos (grandes espelhos planos com sun-motion tracking – sistema de rastreamento do sol) concentra a radiação solar em um receptor pontual central localizado no topo de uma torre (figura 9). A energia é absorvida e convertida em energia térmica gerando vapor superaquecido para a turbina.

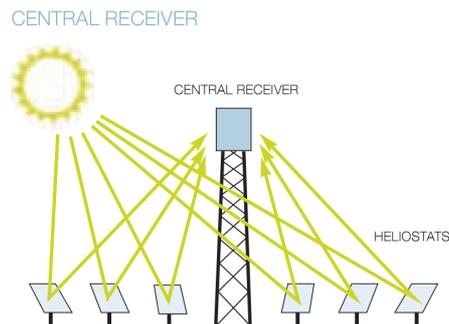


FIGURA 9 - Esquema de Concentrador de receptor central

Fonte: Concentrating solar power OUTLOOK 2009. Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA

2.5 Localização do Coletor

O aparato ficará localizado dentro do campus universitário da Universidade Federal do Pampa de Bagé – RS, em frente ao bloco 2, conforme mostra a Figura 10, uma imagem tirada de satélite do software Google Earth. Além de ser uma área aberta, sem nenhum perigo de sombreamento da insolação, sem possuir nenhum tipo de construção na direção Norte. É um lugar de fácil acesso ao usuário, onde todas as pessoas que chegam até a Universidade transitam, deixando-as, no mínimo, instigadas e, com isso, consegue-se mostrar que as energias renováveis são uma realidade e estão ao nosso alcance.

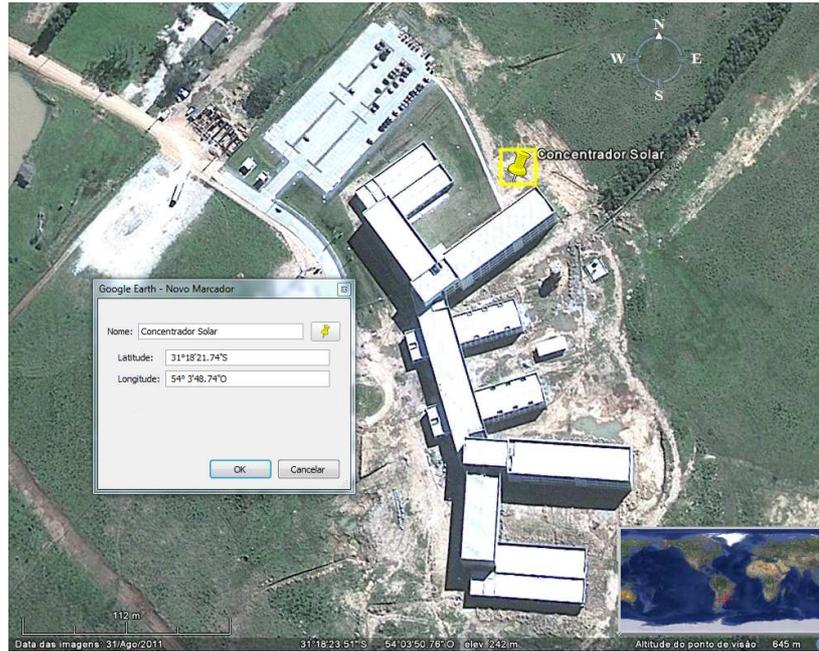


FIGURA 10 - Imagem de satélite da localização exata do concentrador
 Fonte: Google Earth. Ano da foto: 2011

O posicionamento geográfico influencia muito nos resultados, por isso, será feito todo planejamento e cálculos com base nas coordenadas exatas do ponto de instalação, que são $31,3061^\circ$ de latitude Sul e $54,06367^\circ$ de longitude Oeste, numa altitude de aproximadamente 200 metros acima do nível do mar. A figura 11 nos mostra o posicionamento de Bagé numa perspectiva global.

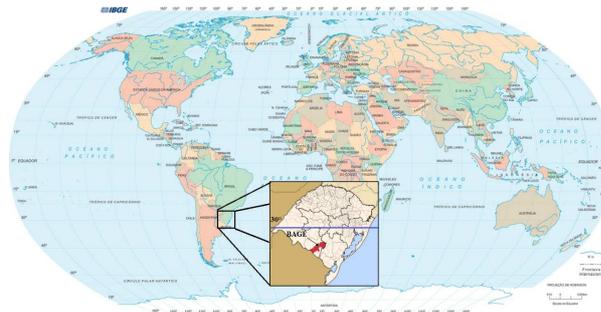


FIGURA 11 - Localização do coletor num panorama mundial
 Fonte: <http://geografiadoespaço.spaceblog.com.br/1540919/Mapa-Mundi-Politico-IBGE>. Acessado em 14 de setembro de 2011 (adaptado).

2.6 Índices de Radiação

Como já foi visto, a viabilidade - e como consequência o bom funcionamento - de um sistema de aquecedor solar para altas temperaturas, por concentração, depende dos índices de radiação no nível do solo do local onde será instalado e, mais precisamente, da radiação direta

que o atinge. De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração que atinge o solo é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa. A figura 12 nos dá uma idéia da diferença de radiação fora da atmosfera e na superfície terrestre.

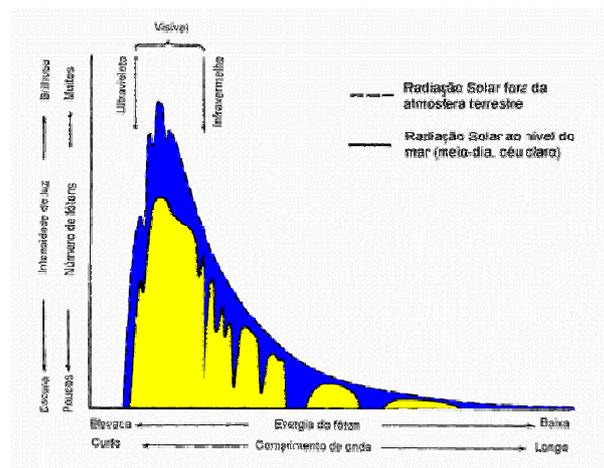


FIGURA 12 - Radiação que atinge a atmosfera e a superfície terrestre
 Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=301>

Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado "Massa de Ar" (AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas.

Assim, quanto menor a camada de ar, ou seja, menor o ângulo zenital, menos ocorrerá interações e mais radiação direta chegará ao solo.

A seguir, é mostrado um gráfico dos valores de radiação que atingem o solo na região de Bagé (figura 13), baseados nos dados do Atlas Solarimétrico do Brasil, durante todo o ano, para várias inclinações diferentes.

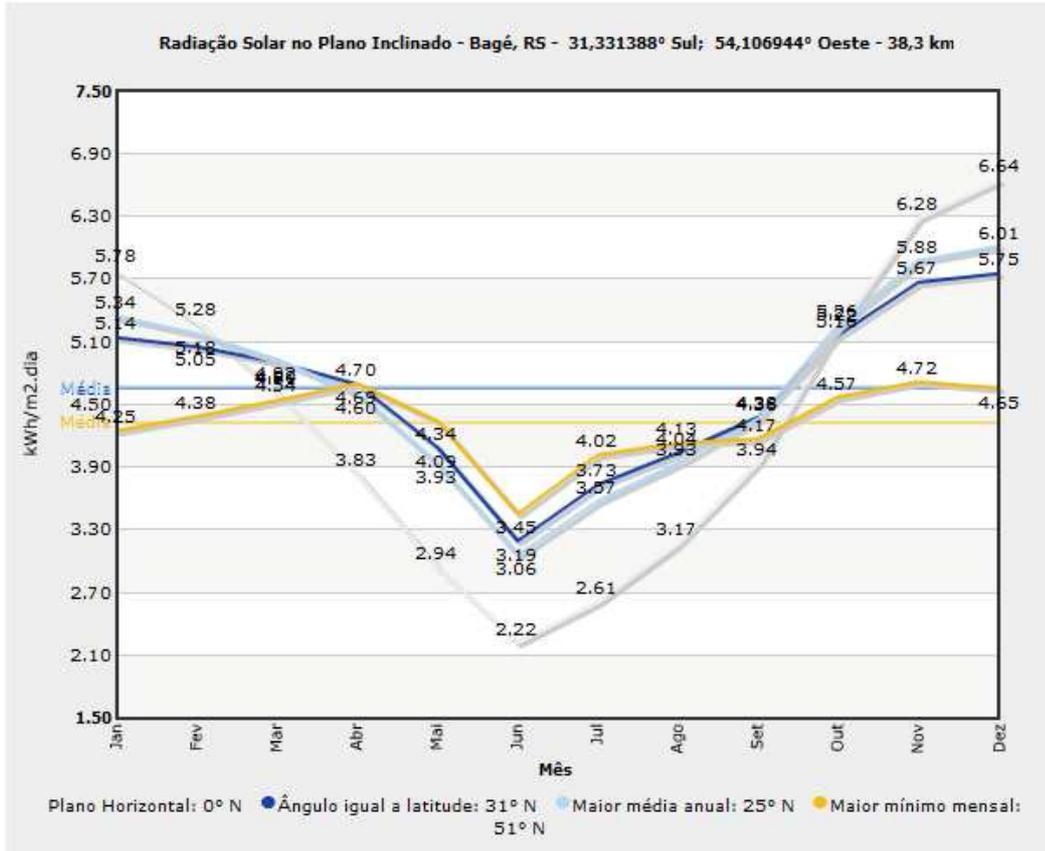


FIGURA 13 - Valores de radiação que atingem o solo em Bagé – RS
 Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>

Confirmando o esperado, para cada época do ano, existe uma inclinação diferente que consiga absorver mais radiação. Observa-se que no verão, os índices são extremamente bons, chegando a ser uma das regiões que mais recebe radiação do Brasil, conforme figura 14.

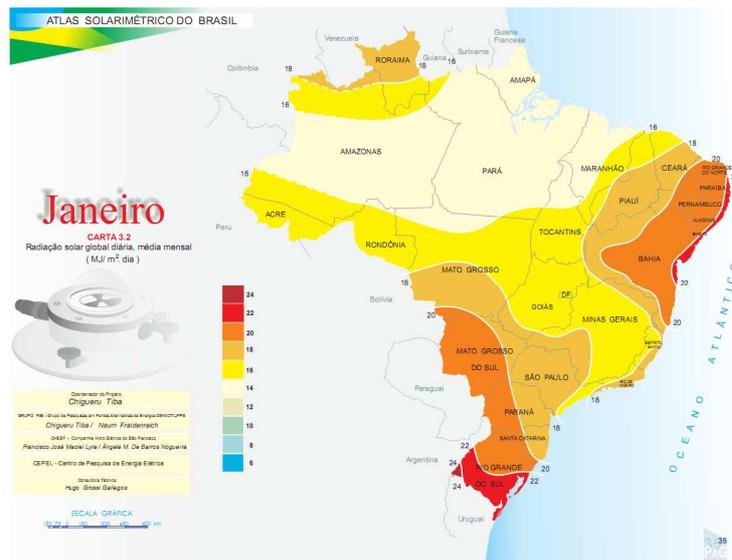


FIGURA 14 - Atlas Solarimétrico Brasileira para Janeiro
 Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>

Para cálculo do dimensionamento do concentrador, é necessário saber os índices de radiação direta para a localização do aparato. Para isso, usou-se um atlas de radiação direta para a América do Sul, mostrado na figura 15.

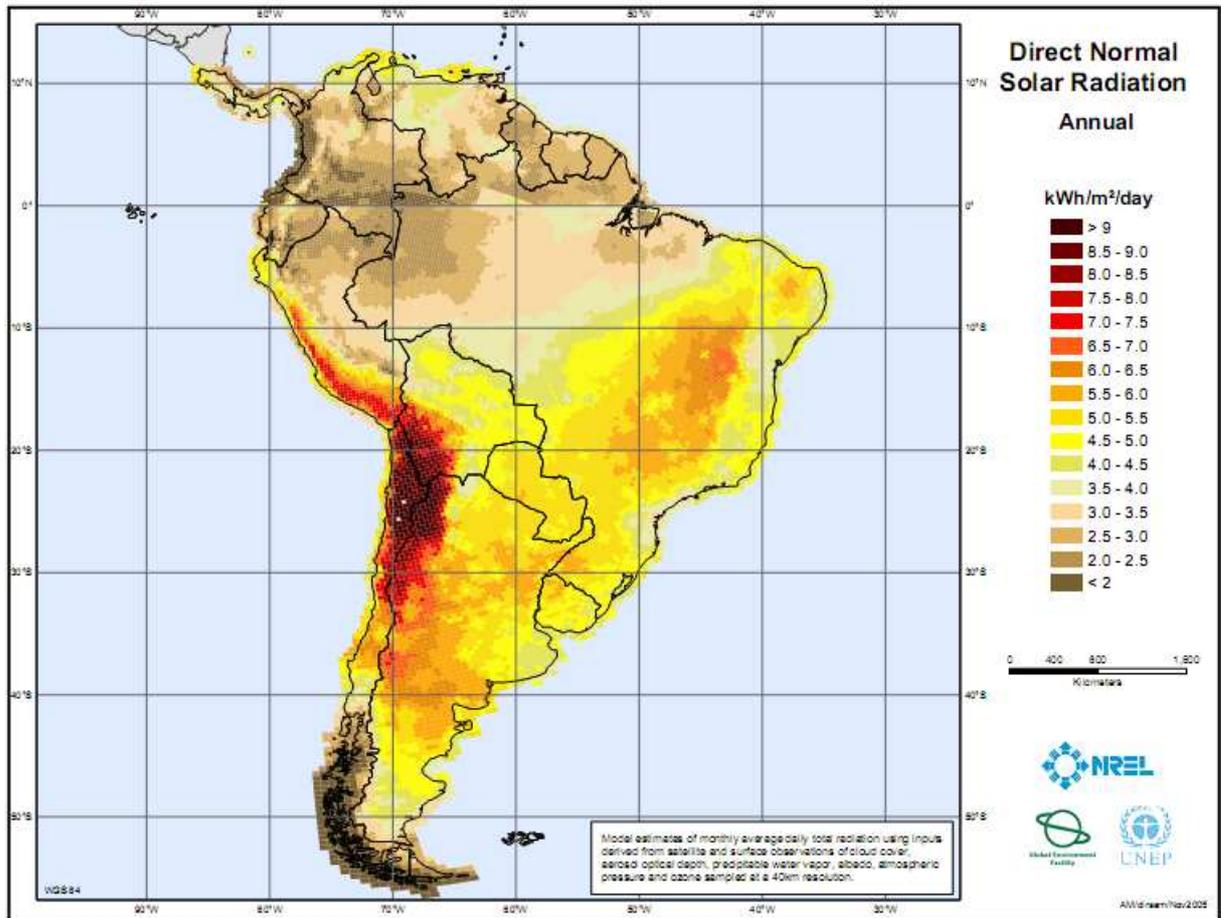


FIGURA 15 - Índices de radiação direta para a América do Sul
Fonte: <http://swera.unep.net>. Acessado em 20 de janeiro de 2012

Percebe-se que, em um dia, pegando a média anual, Bagé recebe 5 – 5,5 KWh/m².

2.7 Dimensionamento

Com base nos dados do atlas, tomou-se como energia total que Bagé recebe por dia de radiação direta, pegando uma média anual, é igual a 5 KWh/m². Como a duração dos dias tem média de 12 horas, a radiação direta que chega ao solo de Bagé é igual a 5 KWh/m² dividido por 12 horas, resultando em 416,67 W/m².

Para aquecimento de aproximadamente 10 litros de água, considerando um aumento de temperatura médio de 20 °C para 75 °C, ou seja, de ΔT de 55 °C. Utilizou-se a equação

11, com valores de 1 cal/g°C de calor específico da água (c) e 10.000 gramas de massa de água (m).[10]

$$Q = c m \Delta T \quad (11)$$

O resultado foi de uma quantidade de calor igual a 550.000 calorias, o que equivale a 2.299.000 joules.

Para cálculo da área necessária para atender os requisitos, dividiu-se o valor da energia total necessária pela quantidade de segundos estipulada para aquecimento, no caso de 3 horas (igual a 10.800 segundos)

Como a energia que chega em 1 m² é igual a 416 J/s, a energia acumulada durante os 10.800 segundos soma 4.492.800 Joules. Logo, para se determinar a área necessária, utiliza-se uma simples “regra de 3”, onde 4.492.800 J estão para 1m², mas precisa-se saber para qual área está os 2.299.000 J requeridos para o aquecimento.

Com estes cálculos mostra-se que uma área de aproximadamente 0,5 m² de coletores solar é necessária para se atingir os objetivos

2.8 Geometria do Concentrador

Os fundamentos físicos óticos envolvidos no sistema de concentração de raios solares são bem simples. O coletor cilíndrico espelhado que direciona a radiação se comporta como um espelho côncavo simples. Os raios do Sol devem realizar uma trajetória paralela ao eixo (e) que passa pelo vértice e pelo centro de curvatura do espelho ou conjunto de espelhos, assim como mostra a figura 16.

Por isso faz-se necessário a utilização de sistemas auxiliares de orientação e de inclinação dos espelhos, para que sempre, durante a variação do ângulo do sol durante o dia ou até mesmo durante o ano, os raios estejam chegando de forma paralela a este eixo e o foco permaneça sendo onde se encontra o tubo receptor que se deseja aquecer.

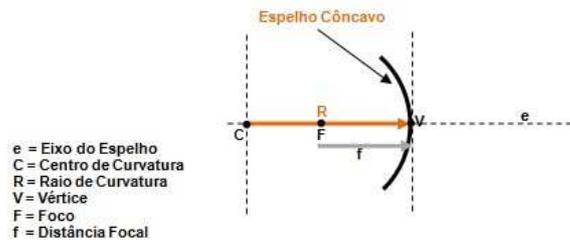


FIGURA 16 - Configuração de um espelho côncavo

Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/espelhos-concavos>. Acessado em 20 de outubro de 2011.

A medida entre o ponto focal e o vértice do espelho é a Distância Focal (f), o ponto focal fica localizado no ponto médio entre o centro de curvatura e o vértice do espelho, assim podemos afirmar que a distância focal pode ser definida como a metade da medida do raio (equação 12). [10]

$$f = R/2 \quad (12)$$

Na figura 17 é mostrada as principais características dos raios de luz ao interagirem com um espelho côncavo, onde é possível observar que a única condição que satisfaz o objetivo de concentrar os raios no foco é quando os raios chegam paralelos ao eixo e .

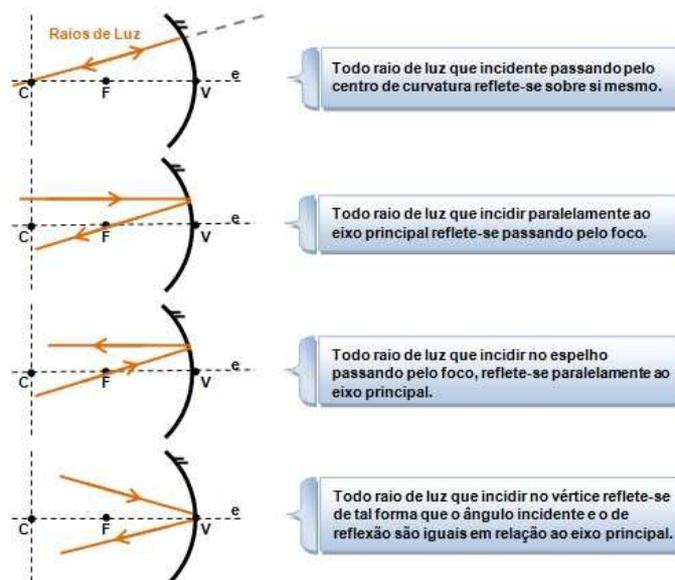


FIGURA 17 - Características de reflexão de um espelho côncavo

Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/espelhos-concavos>. Acessado em 20 de outubro de 2011

Sendo assim, deve haver um sistema capaz de fazer com que a orientação do concentrador possa mudar de inclinação. Nas plantas CSP comerciais, os espelhos se movem durante todo o dia em busca do alinhamento com sol desde o amanhecer até o anoitecer, com

uma configuração onde o eixo axial dos concentradores cilíndricos (eixo do foco tubular linear) está na direção Norte-Sul, fazendo com que o movimento de mudança de inclinação seja na direção da trajetória do sol diária, ou seja, Leste-Oeste. Mas, como a mudança deve ser feita constantemente durante o período de Sol, estes sistemas são caros e complexos, além de demandar energia elétrica para os servo-motores.

Para o presente projeto, pretende-se adotar um sistema em que não se tenha necessidade de mudanças na inclinação durante o dia, apenas ao longo do ano. Para isso, o alinhamento do eixo axial do concentrador cilíndrico se dará na direção leste-oeste, o que fará com que os raios durante o dia se mantenham paralelos ao eixo do vértice e o centro de curvatura. Porém, como a declinação solar muda com o passar dos dias, a inclinação do aparato deverá ser mudada na direção Norte-Sul várias vezes ao longo do ano.

2.8.1 Orientação do Coletor

Por simplicidade, e devido a comprovação com base em cálculos simples, o ângulo de inclinação do coletor solar para maximizar a coleta e utilização da radiação solar, pode ser obtido através da equação 13. Onde utiliza-se apenas o valor da latitude local (ϕ), no caso igual a 31° S (a equação é genérica e funciona utilizando qualquer valor de latitude do hemisfério sul, sem colocá-la com o sinal negativo) somado a declinação solar (δ), que varia de acordo com o dia do ano (já mostrada acima).

$$\theta = \phi + \delta \quad (13)$$

O quadro abaixo mostra o melhor ângulo para cada mês do ano, ou seja, adotando apenas um ajuste de inclinação do aparato por mês, de preferência no dia 1, utilizando o dia médio como referência (dia 15 para meses normais e 14 para o mês de fevereiro).

TABELA 4
Inclinação do concentrador para cada mês do ano

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
Dia	15	14	15	15	15	15
n	15	45	74	105	135	166
δ (°)	-21,27	-13,62	-2,82	9,41	18,79	23,31
θ (°)	10,03	17,68	28,48	40,71	50,09	54,61
ϕ (° S)	31	31	31	31	31	31

Mês	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Dia	15	15	15	15	15	15
n	196	227	258	288	319	349
δ (°)	21,52	13,78	2,22	-9,60	-19,15	-23,34
θ (°)	52,82	45,08	33,52	21,70	12,15	7,96
ϕ (° S)	31	31	31	31	31	31

Nota-se uma grande variação da inclinação do aparato ao longo do ano, logo, deve-se ter suporte para que seja possível fazer esta mudança de orientação do concentrador manualmente quando este estiver em funcionamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais Utilizados

Para construção do projeto, primeiramente, fez-se um esboço de todo sistema, um pré-levantamento dos principais materiais envolvidos em cada parte, desde a alimentação de água fria até a saída de água quente.

Em todo este processo, primou-se por uma escolha de materiais alternativos, que fossem de baixo custo e acessíveis, para que qualquer pessoa que tenha interesse consiga reproduzir o mesmo projeto em casa, por serem itens fáceis de serem encontrados. Buscou-se também, componentes provenientes de descartes e/ou ferro-velhos, para dar uma nova utilidade ao que já não servia para mais nada.

Para a base do concentrador, que deveria possuir uma forma parabólica cilíndrica onde o material reflexivo seria apoiado e fixado, tendo que ter uma boa rigidez, pequena espessura e dimensões compatíveis com a idéia do projeto, pensou-se e acabou sendo usado um tonel (tambor) de latão de 200 kg de impermeabilizante descartado em obras de construção civil, com 0,89 m de altura e raio de 0,29 m. Foram doados dois tonéis deste tipo pela empresa construtora das obras do Campus Bagé da UNIPAMPA. As fotos deste e dos outros materiais utilizados são mostradas no próximo subcapítulo já com algumas modificações.

Utilizou-se uma chapa de alumínio de 3 mm de espessura para colocar entre a base (tonel) e o material reflexivo afim de corrigir as ondulações do tonel. Esta chapa foi comprada nova, mas pode ser substituída por qualquer chapa de metal, nova ou usada, com aproximadamente esta espessura que possua uma boa planicidade. Podendo ser encontrada em qualquer serralheria ou empresa do ramo de alumínio.

O principal componente dos sistemas de concentradores solar é, sem dúvidas, o material reflexivo. Ele que é o responsável por refletir e fazer a radiação solar convergir para o foco e aquecer a água. Logo, a etapa de escolha deste material, teve atenção especial.

Tendo em mente a idéia de baixo custo e utilização de materiais reciclados, primeiro, buscou-se conseguir chapas de alumínio anodizado de alto brilho e de alta refletância descartadas, que são comumente utilizadas em calhas de lâmpadas fluorescentes. Como elas normalmente são dobradas na forma da calha, o achatamento destas chapas não gerou bons resultados, pois qualquer desnível na placa provoca um grande desvio do raio solar, fazendo com que este não mais atinja o foco. Algumas chapas, por não serem dobradas, pareciam mais eficazes, porém, as encontradas possuíam uma espessura muito pequena e a refletância

apresentava sinais nítidos de vulnerabilidade devido a exposição ao sol e chuva. Além disso, o comportamento parecido com papel traria transtornos quanto a fixação e acertos da orientação.

Outra opção descartada foi a de adquirir uma chapa de alumínio plana e da espessura desejada e mandar anodizar, mas, além de ser um processo extremamente caro, teria que enviar a chapa para outra cidade que tenha uma empresa que faça anodização.

Foi entrado em contato três vezes com a empresa Intral Lâmpadas e Reatores, de Caxias do Sul – RS, para ver a possibilidade de adquirir uma chapa de alumínio anodizado de alto brilho e refletância antes que ela fosse dobrada e posta na calha da lâmpada. Mas, não se obteve êxito.

Sendo assim, a opção mais viável para utilizar como material reflexivo, foi a de utilizar tiras retangulares de espelhos planos comuns de 3 mm de espessura. Buscou-se por sobras de espelhos, uma parte conseguiu-se reaproveitar e o restante foi comprado.

O material escolhido do tubo que passa pelo foco do concentrador foi cobre, devido a ser um dos melhores condutores de calor – conduzindo o calor que atinge a sua parte externa através da radiação para a água que circula no seu interior. Seu coeficiente de condutividade térmica é de 398 W/mK. Além disso, o cobre possui altos índices de absorvidade da radiação incidente e aguenta bem a altas temperaturas, tendo conexões e demais características próprias para água quente. As dimensões escolhidas foram de 28 mm de diâmetro externo e de 2 mm de espessura de parede, facilmente encontrado em lojas de material hidráulico.

Tentou-se adquirir tubos evacuados de coletor solar, que são muito eficientes, tanto em relação à absorção da radiação quanto na minimização de perdas de calor. Trata-se de um tubo de material seletivo, com boa absorção de radiação, pintado de preto fosco, com um invólucro de vidro com uma boa transmitância de radiação. Entre eles, vácuo para minimizar as perdas de calor. Mas, como só são fabricados em outros países e são extremamente frágeis para transporte, não suportando transporte via correios, além de serem um pouco mais caros, inviabilizou sua utilização. Estes tubos de vácuo para aquecimento solar são uma tecnologia nova e realmente eficiente, seu preço está caindo e logo sua utilização estará difundida e popularizada.

Para tentar “imitar” este sistema, pensou-se em utilizar o tubo de vidro de uma lâmpada fluorescente envolvendo o tubo de cobre, o que já ajudaria bastante na diminuição de perdas de calor.

Para fazer o suporte do tubo no foco do concentrador, optou-se por pequenas barras de ferro – 1 cm de largura e 3 mm de espessura – num total de 1,20 m de comprimento, e uma

porca de bitola interna igual a bitola externa do tubo de cobre (28 mm), sendo estes materiais todos descartes de serralheria e passíveis de serem soldados ao latão e uns aos outros.

Como o suporte para fazer variação da inclinação e o apoio de todo o aparato deve aguentar o peso e poder ser emendado a outras peças, tubos de ferro foram a melhor escolha. No caso, foram utilizados tubos retangulares de 40x40, 40x30 e 40x20 mm de espessura reaproveitados de uma velha grade de ferro. Aproximadamente 2,5 m no total de tubos.

O reservatório térmico utilizado foi uma caixa de poliestireno expandindo (EPS), comercialmente chamado de ISOPOR, com capacidade de 12 litros, tendo aproximadamente 23x34 cm de base e 28 cm de altura.

Papel alumínio comum foi utilizado para revestimento interno da caixa e tampa de EPS, aproximadamente 0,5 m² foram gastos no total. Fez-se uso de dois sacos de filme plástico de PVC impermeabilizante e higiênico que aguentam altas temperaturas por cima do alumínio, um para caixa e outro para a tampa.

O apoio para o reservatório, com uma altura de 80 cm, é constituído de ripas de madeira descartadas, anteriormente utilizadas em caixas para transporte de grandes cargas que iriam para o lixo.

Para as conexões precisou-se de duas flanges, tubos de Polipropileno Randômico, ou PPR, para condução da água, aproximadamente 2 metros, um joelho de PPR, um “T” de PPR e dois adaptadores de PPR para tubo de rosca. Segundo a Amanco, fabricante do produto, este tipo de material possui um coeficiente de condutividade térmica igual a 0,24 W/mK [11]. Ainda foram usados 2 mangueiras flexíveis para água quente e um adaptador redutor de cobre 3/4 para 1/2. Todos estes materiais são fáceis de serem encontrados em lojas de material hidráulico e não são muito caros, porém, é onde está o maior investimento do projeto.

3.2 Preparação dos Materiais

De posse dos materiais, foram feitos muitos ajustes e modificações afim de deixá-lo um aparelho de fácil manuseio, transporte e operação, utilizando o mínimo de material.

Para a base, estrutura que dá suporte e a forma do concentrador cilíndrico parabólico de foco linear, cortou-se o tonel em 3 partes na direção axial, de modo que cada parte ficasse com 120° (um terço de 360°) e com o mesmo comprimento de 0,89 m, vide figura 18. Foi utilizada apenas uma dessas partes, a que encontrava-se no melhor estado de conservação, outra foi deixada de reserva e a última rejeitada.



FIGURA 18 – Base de tonel cortado

Além disso, esta base teve as paredes laterais cortadas e removidas, para que se consiga um aproveitamento maior da radiação nas horas do dia em que o sol está próximo ao horizonte.

Como na sua superfície existiam elevações, o que prejudicaria o alinhamento dos espelhos, optou-se por utilizar uma chapa de alumínio preza ao latão, capaz de corrigir esse defeito e não repassá-lo para os espelhos. A chapa foi adquirida já com as dimensões requeridas (62 cm de largura e 86 cm de comprimento) e com uma inclinação de 120° de abertura no eixo da menor dimensão, como mostra a figura 19.



FIGURA 19 - Chapa de alumínio

Para prender o alumínio a base, utilizou-se rebites. Fez-se furos com uma furadeira no latão e na chapa, colocou-se algumas arruelas entre os materiais para conseguir uma planicidade perfeita e apertou-se os rebites, como mostra a figura 20.



FIGURA 20 - Chapa de alumínio presa a base de latão

Para a superfície refletora, optou-se por conveniência usar barras de espelhos de 4 cm de largura por 86 cm de comprimento (figura 21), as quais foram coladas com adesivo selante de silicone à chapa de alumínio, uma barra encaixando na outra.



FIGURA 21 - Espelhos cortados

No vértice do espelho côncavo formado pelo grupo de espelhos, foi deixado um espaço de aproximadamente 1 cm entre as barras no sentido axial. Esse espaço se deve a dois motivos. Primeiro para evitar desperdício de material, pois nesse lugar, sempre haverá sombra provocada pelo tubo quando este estiver no devido lugar, o foco. E segundo, para criar uma guia para o ajuste de inclinação do concentrador, que, justamente, funcionará com o máximo de eficiência quando a sombra do tubo for projetada em cima deste espaço sem espelhos. Figura 22.



FIGURA 22 - Espelhos colados ao suporte

Feito isso, foram feitas diversas medições para encontrar a distância do centro de curvatura (raio) do semi-círculo formado. Para isso, fez-se medições da distância entre dois espelhos simétricos em relação ao vértice, da distância reta e da semi-circunferência. A medida aparentemente mais precisa, foi de 45 cm para a distância reta e de 50,49 cm para a semi-circunferência. Com estes valores, utilizou-se o software SolidWorks para fazer o esboço do arranjo, nos mostrando automaticamente o valor do raio, figura 23, que resultou em 30,74 cm (no desenho utilizou-se valores em mm). Sabendo que a distância focal é a metade da distância do centro de curvatura (raio) do semi-círculo formado, este valor foi dividido por dois e o resultado encontrado foi de 15,37 cm.

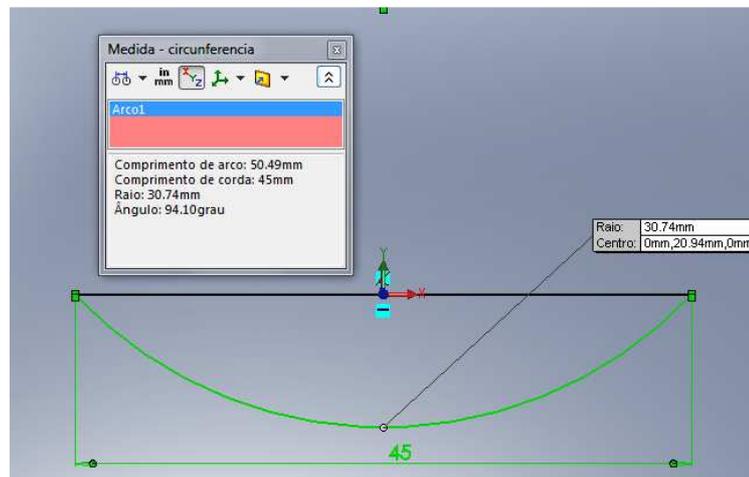


FIGURA 23 - Esboço no SolidWorks para determinação do raio

Agora que já era sabido a distância que o tubo absorvedor de radiação deveria estar em relação ao vértice, tratou-se de prender uma porca de parafuso com o diâmetro interno igual ao diâmetro externo do tubo para fazer seu suporte no foco. Foram utilizadas hastes de ferro soldadas a base do concentrador (latão) e à porca do parafuso. Neste caso foi utilizado solda MIG, um tipo de soldagem elétrica por arco com argônio como gás de proteção. A figura 24 nos mostra o resultado.



FIGURA 24 - Concentrados já com as hastes de suporte do tubo absorvedor

Nas extremidades da lateral inferior (na figura **** pode-se ver no canto esquerdo inferior), lateral está que ficará voltada para o norte, foi soldado uma outra porca com a função de prender toda esta parte ao suporte que será colocado no chão, mas, ao mesmo tempo, suportar mudança de inclinação, ou seja, elevação e diminuição da altura da outra lateral.

As hastes de sustentação e fixação com o solo deste lado (lateral voltada para o norte), foram feitas com tubos de ferro de 40x40 mm com um comprimento de 61 cm, dos quais 20 cm foram enterrados. Na parte superior destes dois tubos de sustentação, foi soldado um anel aberto para fazer o encaixe com a porca soldada na lateral do concentrador, como mostrado na figura 25. Assim, é possível fazer a variação da inclinação e retirar o concentrador da base de sustentação facilmente e ao mesmo tempo, ele se encontra bem seguro e preso quando encaixado.



FIGURA 25 - Hastes de sustentação do lado Norte

O tubo de cobre foi pintado com tinta fosca para motor, que suporta altas temperaturas. Na extremidade deste, foi soldado um adaptador de latão de 1/2" e feito a vedação com solda mesmo, para isso, fez-se uso de solda de oxigênio (vide figura 26).



FIGURA 26 - Tubo de cobre pronto

A sustentação do concentrador no outro lado (lateral Sul), necessita ser com regulação variável. Ela que é responsável pelas diferentes inclinações do coletor durante o ano, fazendo com que o foco sempre seja localizado coincidentemente com o tubo absorvedor. Para isso, levantou-se várias alternativas e dentre elas, a que se mostrou mais adequada, precisa, de fácil manuseio e que não consuma muito material, foi a de apenas um apoio no chão, com variação de altura de uma haste conectada a este apoio, e esta haste que suporta o peço e inclina o concentrador. A figura 27 mostra o esquema proposto.



FIGURA 27 - Apoio de sustentação para inclinação variável

Este aparato permite o ajuste de inclinação em dois métodos, um no “ajuste grosso”, constituído pela parte do parafuso no apoio que vai fixo no chão que encaixa nos vários furos feitos na haste regulável; e outro no “ajuste fino”, feito por um grande parafuso na

extremidade da haste, onde uma porca foi soldada e segura este parafuso, que, por sua vez, suporta o semi-cilindro com os espelhos.

Quando se fecha o parafuso (rosqueia-se no sentido horário) a inclinação aumenta, um pouco a cada volta, quando se fecha (rosqueando para o sentido anti-horário) tem-se uma pequena diminuição na inclinação do concentrador.

Na figura 28 fica mais visível e fácil o entendimento do sistema. Para fazer o ajuste fino, deve-se deixar a fina chapa de ferro, localizada na extremidade superior do parafuso, plana, para poder ser feito o giro. Feito isso apóia-se novamente o concentrador neste suporte e entorta-se novamente a chapa em forma de “C” para fazer uma trava de segurança.



FIGURA 28 - Haste responsável pela variação de inclinação

O reservatório térmico, constituído por uma caixa de isopor de 2 cm de espessura, com capacidade de 12 litros, foi forrada, primeiramente, com papel alumínio, objetivando uma diminuição nas perdas de calor da água quente por radiação, pois o alumínio as reflete de volta para a água. Em cima disto, foi colocado um filme plástico de PVC resistente a altas temperaturas, afim de fazer a impermeabilização e higienização do reservatório. A tampa sofreu o mesmo processo. Foi usada cola de silicone para altas temperaturas, mas apenas para fazer uma leve fixação, sem ter contato algum com a água. Vide figura 29.



FIGURA 29 - Reservatório térmico com as adaptações

Para sustentação e proteção do reservatório, foi construído um suporte elevado de madeira reciclada. Com 80 cm de elevação, suficientes para ocorrer a convecção natural entre o reservatório e o concentrador, foi feita uma caixa onde o reservatório térmico é inserido, com dimensões extremamente justas em relação ao reservatório térmico, para não sobrar espaço vazio entre as paredes de madeira e isopor (figura 30). Além de dar proteção, ajuda na isolamento térmica e diminui o torque causado pelas flanges no isopor quando a tubulação sofre alguma perturbação.



FIGURA 30 - Suporte para o reservatório térmico

Após, foi feito os furos para as flanges, tanto na caixa de madeira quanto na caixa de isopor. Para a madeira, utilizou-se uma furadeira, fazendo os furos nos pontos correspondentes aos furos no isopor, que, por sua vez, foram feitos com um soldador. Ambos com a mesma bitola da flange, 25 mm de diâmetro externo.

A fixação do tripé de suporte do concentrador foi feita levando em conta as medições de distância entre eles previamente calculadas. Foram enterrados cerca de 20 cm de haste de suporte no solo, como o solo é extremamente duro e seco, este comprimento é mais que suficiente. Foi feita a socagem do solo nas redondezas das hastes. Na figura 31 observa-se como ficou a disposição dos suportes.



FIGURA 31 - Suportes fixos instalados

Com a parte de sustentação fixada ao solo, encaixou-se o concentrador no seu devido lugar e foi acoplando-se as flanges (com a caixa de isopor já dentro da caixa de sustentação), mangueiras flexíveis, tubos de conexão, tubo de cobre já no foco do concentrador, joelhos, “T”, torneira e todas outras conexões. As mangueiras flexíveis para água quente, os adaptadores PPR para rosca, joelho, o tubo e o material de revestimento isolante de tubos são apresentadas na figura 32.



FIGURA 32 - Tubos e algumas conexões

As conexões que envolviam só PPR foram feitas por termofusão utilizando o termofusor. As conexões que envolviam cobre ou latão, foram feitas passando fita veda-rosca e torcidas ao máximo com chave de cano e alicate.

Ao fim de todo este trabalho de montagem, teve-se o aparato pronto para testes, como mostra a figura 33.



FIGURA 33 - Aparato montado e instalado, sem o invólucro de vidro no tubo absorvedor

Foram feitas algumas modificações no aparato para mais testes. Foi adicionado ao sistema o tubo de vidro de lâmpada envolvendo o tubo de cobre. A figura 34 ilustra essa alteração.

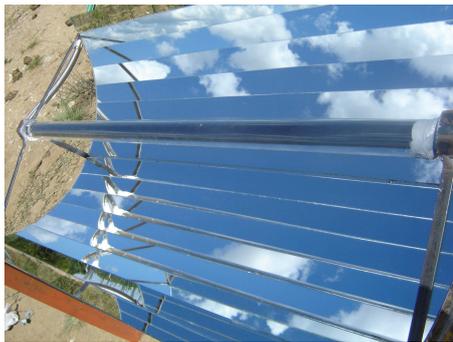


FIGURA 34 - Tubo de cobre com invólucro de vidro

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados referentes a estrutura, comportamento mecânico, variação da inclinação e alinhamento do foco com o tubo de cobre, atenderam a necessidade.

A figura 35 mostra o concentrador estabilizado numa inclinação próxima de zero em relação a horizontal.



FIGURA 35 - Inclinação pequena

Percebe-se que é possível descer ainda mais a haste de sustentação variável da esquerda, podendo atingir até inclinação negativa em relação ao norte.

A figura 36 nos mostra uma inclinação grande em relação a horizontal, configuração que permite maior captação da energia solar para dias de inverno. O sistema de mangueira flexível permite estas variações sem vazamentos ou mudanças nos encanamentos.



FIGURA 36 – Inclinação grande

Feito isso, começou a ser realizados os testes com água.

Nos primeiros testes realizados, foi verificado vazamentos em um dos locais da tubulação mais vulnerável, no encaixe do tubo de cobre com a mangueira flexível. Desfez-se a conexão, foi refeita a vedação com fita veda-rosca, desta vez em maior quantidade, e foi

colocado junto à rosca adesivo silicone para junta de motor. Teve que se esperar aproximadamente 24 horas para secagem.

No teste posterior, foi verificado um vazamento próximo ao local anterior, mas, após uma análise, constatou-se que haviam furos, em torno de 0,5 mm de diâmetro, no cano de cobre e não na junção com a mangueira. Foi feita uma solda com estanho e, finalmente, foi conseguida a vedação total.

Os testes tiveram início aproximadamente as 9 h e 50 min. da manhã do dia 18 de janeiro de 2012. O dia não estava nada favorável, o sol apareceu muito pouco, estando a maioria do tempo encoberto por nuvens. Além disto, o vento era forte e constante, ainda mais se tratando de vento leste, vindo de campo aberto próximo as instalações do concentrador.

A temperatura inicial da água, quando colocada dentro do reservatório para alimentação do sistema, indicava 25°C. Foi colocado 13 litros, capacidade total do sistema. Com o luxímetro fez-se as aferições de intensidade luminosa, mas estas medidas não podem ser tomadas como base ou média, devido à grande variação da insolação provocada por um céu cheio de nuvens. Mesmo assim, foram feitas aferições nos mesmos instantes da temperatura, registrando 970 lux nesta primeira medida.

Decorridos 30 minutos, a temperatura medida no interior do reservatório havia aumentado para 33° C e o luxímetro marcou 270 lux naquele instante, com o Sol totalmente escondido atrás de uma nuvem. Passados mais 30 minutos, as aferições registraram 35°C de temperatura da água e 983 lux. A próxima medição foi realizada seguindo a meia hora de intervalo e, como o vento havia aumentado e a quantidade de nebulosidade também, a temperatura da água diminuiu, marcando novamente 33° C para uma luminosidade de 260 lux. A figura 37 esboça o gráfico das alterações de temperatura com o decorrer do tempo.

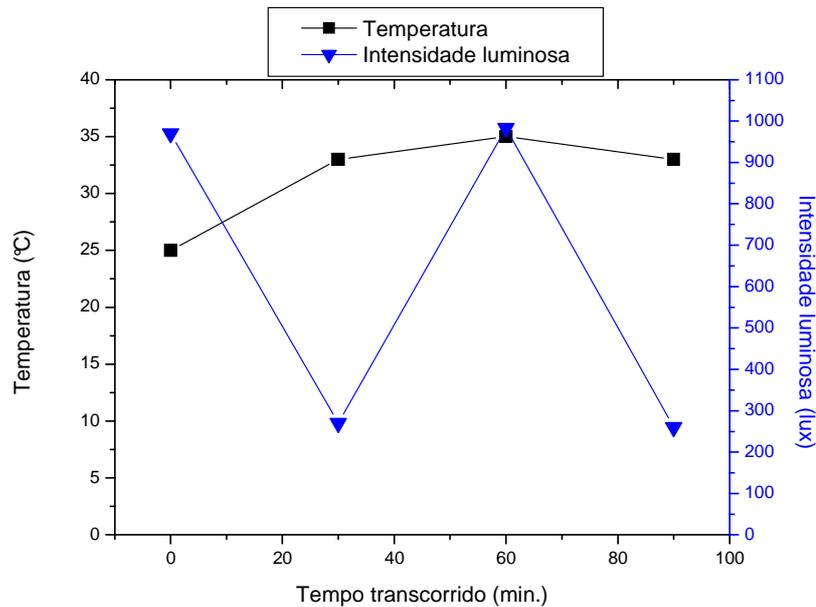


FIGURA 37 - Gráfico do resultado de testes sem invólucro

Estes resultados, longe dos esperados, porém relativamente aceitáveis para as condições do clima durante as medições, fizeram com que testes com invólucro de vidro tivessem que ser realizados.

Passados uma hora e meia da última medição, a conexão foi aberta entre o tubo de cobre e o reservatório para ser acoplado o invólucro de tubo de vidro. Quando foi feita a retirada da água do tubo de cobre, esta encontrava-se muito quente, a ponto de causar uma leve queimadura no dedo do operador com um jato de água que atingiu por instantes sua mão, estima-se que encontrava-se a uns 60 °C.

Esta enorme diferença de temperatura entre a água do reservatório e no interior do tubo pode ter sido causada pela falha no sistema de convecção natural, fazendo com que a água aquecida não suba novamente para o reservatório, impedindo que água fria entre no tubo do concentrador para aquecimento.

Foi retirada toda a água do sistema, acoplou-se o tubo de vidro ao exterior do tubo de cobre, foram feitas a vedação das extremidades entre os dois, utilizando silicone para junta de motor, esperou-se alguns minutos para secagem e foi colocada nova água até encher os tubos e o reservatório. Teve que ser feito um ajuste fino na inclinação do concentrador para alinhar o foco com o tubo de cobre.

O sol continuou sumindo e aparecendo durante o restante dos testes, e agora com menor intensidade de radiação quando aparecia devido a já estar mais próximo do horizonte.

A água apresentou uma temperatura inicial de 27 °C e chegou até 45 °C no fim dos testes. A primeira medida foi realizada as 15 h e 49 min. e a última as as 17 h e 50 min. O gráfico da figura 38 expressa o resultado.

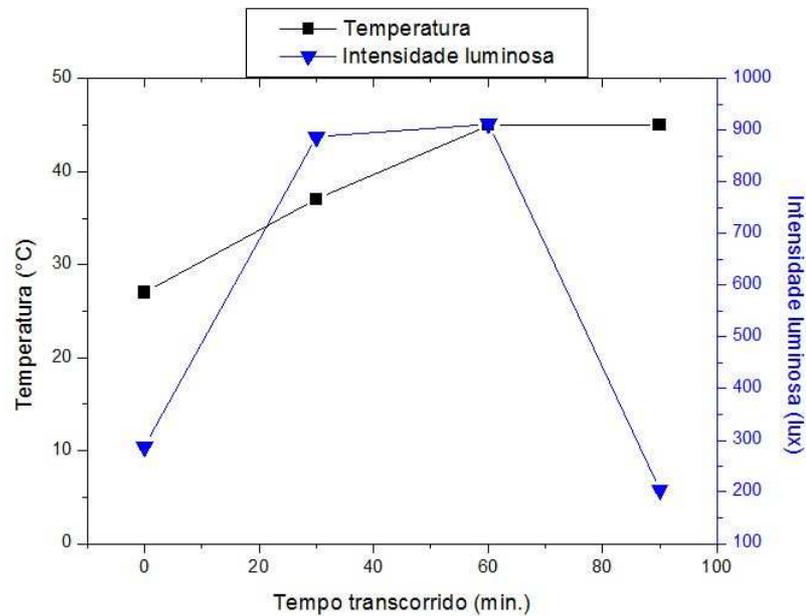


FIGURA 38 - Gráfico do teste com invólucro

Observa-se um rápido aumento de temperatura na primeira meia hora, devido a uma diminuição da nebulosidade e, conseqüentemente, do aumento da radiação direta, que provocou um maior aquecimento. Mas logo em seguida observa-se uma diminuição na taxa de variação da temperatura, estabilizando em aproximadamente 45 °C.

Sem o invólucro de vidro o cano de cobre fica exposto ao vento e se transforma num dissipador de calor quando a água já está aquecida e não há muita radiação incidente, ou seja, o fluxo de calor é inverso ao desejado, vai dá água do reservatório para o tubo e do tubo para o ambiente. Além disso, quando há radiação solar direta atingindo o tubo de cobre, radiação esta que facilmente ultrapassa o tubo de vidro, aquece o cobre que irá emitir radiação infravermelha, que quase não ultrapassa o vidro. Permanecendo a radiação em seu interior e aquecendo o sistema.

Foi detectado um equívoco na montagem do concentrador que estava impedindo resultados satisfatórios. Um “sifão” formado na mangueira flexível não estava permitindo a convecção natural e o aquecimento de toda água do reservatório térmico. Quando corrigido este problema, houve uma mudança drástica e melhoramento dos resultados.

Novos testes foram feitos e a água após 2 horas e 40 minutos sendo aquecida, atingiu os 61 °C. O melhor resultado colhido até o momento.

5 CONCLUSÃO

Este projeto mostrou ser um estudo relacionado a praticamente todas as disciplinas feitas ao longo do curso de Engenharia de Energia Renováveis e Ambiente, onde a maioria dos conhecimentos adquiridos foram colocados em prática, desde as mais específicas, como Radiação Solar, Solar Térmica e Transferência de Calor e Massa, até Geometria Analítica e Física.

O processo como um todo necessitou de muita organização, formação de planos de atividades e de uma gestão eficiente, papéis fundamentais de um engenheiro. O planejamento utilizando o software SolidWorks teve papel essencial, servindo de base para os cálculos e dimensionamentos das diversas partes, fornecendo uma previsão do que aconteceria na prática.

A utilização de materiais de baixo custo, ou reutilização de materiais descartados, constitui uma iniciativa que deve ser popularizada e posta em prática por todos, engenheiro ou não. Diminuindo o consumo de coisas novas, o que gera menos desperdício e agressões ao meio ambiente, consegue-se obter a sustentabilidade.

O tubo de vidro, teve papel fundamental no melhoramento do sistema. Além de ajudar a manter a temperatura mais constante de toda água quando não há radiação ou outra forma de calor externa chegando a ele, provocou o efeito estufa e conseguiu aquecer melhor mesmo contanto apenas com radiação difusa.

O sistema de ajuste de inclinação se mostrou confiável, simples e prático. Atendeu todas necessidades para as quais foi projetado.

Este trabalho mostrou a viabilidade da implantação e do funcionamento de um Concentrador Solar de Baixo Custo, mas que só atingirá seu funcionamento pleno quando uma gama de outros projetos se juntarem e se solidificarem em um só. O caminho ainda é longo, mas boa parte dele já foi percorrido.

Devem ser feitos muito mais testes para realmente se verificar até onde se conseguiu chegar e tirar as conclusões. A continuação deste trabalho pode prover muita pesquisa em torno do tema da Energia Solar Concentrada, que tanto vem crescendo e se mostrando promissora, pelo menos em grande escala. Os projetos de apoio a este sistema variam desde a regulação autônoma da delicada questão da orientação dos espelhos para concentrar a radiação no lugar que se pretende, até sistemas mais eficientes (e, portanto, mais complexos) de isolamento térmico e condução da água. Outro fator, caso o aquecimento atinja as

expectativas de água quente, pode-se acoplar a entrada de água a rede de abastecimento e impor um controle de temperatura e fluxo de água.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. Energia Solar: Fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. Recife, PE: Ed. Universitária da UFPE, 1995. 471 p.
- [2] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB) Tutorial: Energia solar. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/abertura.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2011.
- [3] FOSTER, F.; GHASSEMI, M. e COTA, A. Solar energy; renewable energy and the environment. CRC / Taylor & Francis , 2010
- [4] UFRGS: INSTITUTO DE FÍSICA. Disponível em <<http://astro.if.ufrgs.br/rad/rad.htm>> Acessado em 20 de outubro de 2011.
- [5] UFRGS: INSTITUTO DE FÍSICA. Disponível em <<http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>>. Acessado em 20 de outubro de 2011.
- [6] USP: ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ (ESALQ). Disponível em <ce.esalq.usp.br/aulas/lce630/Conceitos_tempo_clima.pps>. Acessado em 28 de outubro de 2011
- [7] CONCENTRATING SOLAR POWER OUTLOOK 2009. Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA, Dr. Christoph Richter, Sven Teske and Rebecca Short, 2009
- [8] IBGE: MAPA MUNDI POLÍTICO. Disponível em <<http://geografiadoespaco.spaceblog.com.br/1540919/Mapa-Mundi-Politico-IBGE>>. Acessado em 14 de setembro de 2011 (adaptado).
- [9] ATLAS DE RADIAÇÃO SOLAR NORMAL DIRETA DA AMÉRICA DO SUL. U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory (NREL) United Nations Environment Programme (UNEP) Global Environment Facility (GEF). Disponível em <<http://swera.unep.net>>. Acessado dia 20 de janeiro de 2012.

[10] BONJORNO, R.A. Física Fundamental: 2º grau: volume único. São Paulo: FTD, 1993.

[11] INFOESCOLA: TRABALHOS ACADÊMICOS. Disponível em <<http://www.infoescola.com/fisica/espelhos-concavos>>. Acessado em 20 de outubro de 2011.

[12] Manual Técnico. Linha Amanco PPR para condução de água quente e fria. Amanco Brasil Ltda, Joinville – SC, 2010