

# USINA TÉRMICA SOLAR PARA MÉDIAS E ALTAS TEMPERATURAS UTILIZANDO CONCENTRADORES CILÍNDRICO-PARABÓLICOS - ANÁLISE DE COMPONENTES

**José Poluceno Pires Vieira Braga** - e-mail: jp.engemarc@uol.com.br  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET-MG  
**Alexandre Heringer Lisboa** – e-mail: ahlisboa@cemig.com.br  
Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig

## 2- Conversão Térmica de Energia Solar

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma análise dos principais componentes de um sistema de concentração solar, utilizando calhas parabólicas. Aborda considerações sobre condições requeridas do local para implantação de uma usina térmica solar, preparo do terreno, locação, fundações e bases, tipos de estrutura de sustentação dos espelhos; superfície refletora de concentração e elemento coletor da energia solar na forma térmica, acionamento mecânico e rastreamento da trajetória solar. Representa parte da pesquisa desenvolvida na Usina Térmica Solar Experimental construída no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Belo Horizonte, em convênio de P&D com a Cemig e Fundação Cefetminas, aprovado pela ANEEL.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Concentrador cilíndrico-parabólico, Concentrador solar, Usina Termelétrica Solar.

## 1. INTRODUÇÃO

O alto nível de incidência de radiação solar no Brasil faz dessa forma de energia um significativo potencial de energia renovável a completar outras fontes dessa natureza (Tiba, 2000).

Com o desenvolvimento da tecnologia de concentração solar, essa forma de energia, antes usada apenas em pequenas potências, representa, hoje, grande expectativa em alta escala (Lisboa, 2000).

As primeiras usinas surgiram por volta de 1986, utilizando espelhos concentradores no formato cilíndrico-parabólico, e passaram por sucessivos estágios de desenvolvimento, elevando potências pouco acima de 10 MW para usinas de 200MW ou mais, utilizando Fluido Térmico intermediário entre a captação solar e o gerador de vapor, trabalhando a 390°C, temperatura limite para fluido sintético utilizado. Para uso de sal derretido, a temperatura do fluido intermediário pode ser bem mais elevada, acima de 500°C. Essas condições permitem levar às turbinas vapor superaquecido a pressões da ordem de 100bar.

Sabemos que o Ciclo de Rankine, utilizado no circuito, água-vapor-turbina-condensador, apresenta melhor eficiência trabalhando com vapor em alta pressão e temperatura, contra alto vácuo na descarga das turbinas. Por essa razão, é desejável concentração solar para altas temperaturas (Braga, 2002).

## 2. USINAS TÉRMICAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

Existem quatro modalidades de Usinas Térmicas de Concentração Solar para altas temperaturas:

**Calhas Parabólicas** – Trata-se de concentração solar de foco linear que apresenta uma montagem de calhas parabólicas, que formam a superfície refletora de concentração, em linhas paralelas, com espaçamento adequado para se evitar o efeito de sombreamento e requer áreas planas para sua implantação (Figura 1).

Este processo pode ser projetado como um sistema híbrido, operando com o campo solar durante o dia e uma caldeira a gás natural, ou outro combustível, para operação noturna.

Outra opção híbrida é a de utilização de um campo solar suplementar utilizando sal derretido com armazenagem para trabalho durante a noite.

Neste trabalho, abordamos esta modalidade de concentração solar, que é o modelo de grande aceitação em escala comercial no momento. As outras opções existentes, entretanto, devem ser analisadas dentro de suas respectivas especificidades.

A captação solar, da ordem de 60% da radiação direta local, permite uma eficiência total para geração de energia elétrica de 20%, aproximadamente.

$$\eta = \frac{E_g}{E_s} \quad (1)$$

$E_g$  = Energia elétrica gerada

$E_s$  = Energia solar captada



Figura 1 – Concentradores Parabólicos montados em Linha -

**Fresnell** – Modalidade de concentração solar que utiliza espelhos planos de pequena abertura, com a vantagem de ocupar menor espaço e estar menos sujeitos aos efeitos indesejáveis de sombreamento e ventos.

Apresenta maior facilidade para vaporização direta da água, produzindo vapor de processo, ou para geração termoelétrica no ciclo de Rankine. Trata-se de modelo de desenvolvimento mais recente para a escala comercial (Figura 2).



Figura 2 – Fresnell com vaporização direta. Espanha – MAN Solar Millennium

**Torre Central** – Trata-se de um sistema de concentração que trabalha com um coletor de energia solar montado no topo de uma torre central, capaz de interceptar os raios refletidos por cada um dos heliostatos, que são espelhos planos instalados num campo em volta desta torre.

Este sistema trabalha com sal derretido, como fluido operante, que atinge uma temperatura de 580°C e, normalmente, possui dois reservatórios que funcionam como acumuladores de calor reservas para trabalho durante a noite, além de atuarem como um volante térmico, durante períodos de sombreamento, provocados por ocasião de passagem de nuvens. Como no caso do concentrador parabólico, este sal passa pelo sistema de geração de vapor para acionamento das turbinas do gerador de energia elétrica, trabalhando no ciclo de Rankine.

Os heliostatos também são componentes sensíveis aos efeitos de ventos (Figura 3).



Figura 3 – Torre Central e heliostatos – Sandia Laboratories, Cat.

**Disco Parabólico** – Sistema compacto, de foco pontual, que utiliza o motor Stirling para geração de energia elétrica. Esta modalidade permite um melhor rendimento de captação solar pelo fato de se movimentar em dois eixos, eliminando o efeito do  $\cos\theta$  (ângulo de inclinação dos raios solares em relação à perpendicular à superfície refletora) (Rabl, 1976). Construído em potências de 10 a 20kW por unidade. Para demandas maiores de energia elétrica, são montadas várias unidades em paralelo (Figura 4). Este sistema apresenta facilidades para transporte e instalação, maior flexibilidade para o arranjo físico dos concentradores, e não tem a mesma exigência para terrenos predominantemente planos como nos sistemas citados anteriormente.



Figura 4 – Disco Parabólico com motor Stirling – Abengoa

### 3. CONCENTRAÇÃO SOLAR COM A UTILIZAÇÃO DE CALHAS PARABÓLICAS

Um sistema de concentração solar para médias e altas temperaturas com a utilização de calhas parabólicas necessita de algumas condições pré estabelecidas para seu correto funcionamento.

**Localização.** – O local deve ter incidência de radiação solar direta, de elevada intensidade, durante grande parte do ano, o que ocorre em regiões de deserto e semi-árido, com condições atmosféricas favoráveis, sem poluição, baixa umidade do ar, céu claro e descoberto. A presença de nuvens pode inviabilizar ou reduzir significativamente a eficiência do sistema.

O terreno deve ser predominantemente plano, nivelado adequadamente, e sem a existência de montanhas na direção da nascente e do por do sol.

As Linhas dos concentradores são montadas, em paralelo, na direção Norte-Sul e com espaçamentos entre si suficientes para evitar sombreamento.

Deve haver disponibilidade de abastecimento de água situada a uma distância técnica e economicamente viável.

### Principais componentes da Usina Térmica Solar:

**Fundações e bases.** – As estruturas são, normalmente, leves, porém devem ser considerados, aqui, os efeitos de tombamento e vibrações devido à ação de ventos. No modelo experimental do Cefet-MG foi adotada a concepção de uma base em bloco de concreto armado com apoio em um ou dois tubulões conforme mostrado na Figura 8, o que representou uma construção de baixo custo, boa resistência e estabilidade comprovada durante a operação e em dias de forte tempestade.

**Superfície refletora.** – Construída com geometria no formato de uma calha parabólica para concentração da radiação solar direta ao longo da linha focal. Normalmente são utilizados espelhos de vidro ou alumínio anodizado de alta refletividade. A refletividade destes materiais pode atingir 94 - 95%.

Na Figura 5, pode-se ver a construção de um conjunto constituído por cinco Módulos Concentradores montados em Linha na Usina Térmica do CEFET-MG. Neste caso, foram utilizadas chapas de alumínio anodizado com espessura de 0,5mm e refletividade especular de 82% sem tratamento de proteção contra corrosão atmosférica. Este material foi o único disponível no mercado por ocasião da construção. Ao longo de um período de 3 anos após sua instalação, verificou-se perda na capacidade refletiva e deformações nas chapas devido à sua baixa resistência mecânica na espessura utilizada. Hoje encontramos fabricantes que ofertam este produto com tratamento contra o desgaste atmosférico e refletividade de 95% mas a espessura base da chapa deve ser de, no mínimo, 0,8mm para oferecer maior resistência. O alumínio anodizado tem a vantagem de ter custo muito inferior ao dos espelhos de vidro, mas é necessário desenvolver e testar a sua durabilidade. É importante lembrar aqui da necessidade de limpeza periódica da superfície com jatos de água, o que constitui mais um fator de desgaste.



Figura 5 - Linha com cinco Coletores de Concentração Solar -Usina Térmica- CEFET-MG

**Coletor Térmico Solar.** – Montado ao longo da linha de foco. É um conjunto formado pelo tubo absorvedor, em aço inox, com envoltório de um tubo de vidro em borossilicato para proteção térmica com as extremidades vedadas com juntas de expansão, o que permite manter o espaço anular evacuado (Figura 6).

Com o objetivo de melhorar a eficiência deste Elemento Coletor, há necessidade de se considerar três complementos importantes:

A **Superfície seletiva** é um revestimento aplicado no tubo absorvedor para melhorar a absorção térmica e reduzir perdas devido à emissividade. Sua importância se deve ao fato de este tubo trabalhar em temperatura elevada.

A **Película anti-reflexo** é aplicada ao tubo de vidro para reduzir perdas por reflexão dos raios solares incidentes. Há uma redução da ordem de 4 a 5% neste tipo de perdas.

A **Câmara de vácuo** é o espaço anular entre o tubo absorvedor e o tubo de vidro, que, sendo evacuado, praticamente elimina as perdas por convecção entre estes dois elementos.

Com câmara de vácuo, o tubo de vidro trabalha com temperatura bem mais baixa, fato esse que permite uma melhoria da ordem de 4 a 5% na eficiência. Sua importância torna-se mais acentuada com o aumento da temperatura do fluido operante. Para se conseguir o vácuo, há necessidade de vedar as extremidades de cada Elemento Coletor, o que é feito com a instalação de juntas de expansão, em aço inox nos extremos, para compensar a dilatação diferencial entre tubo de aço e tubo de vidro.



Figura 6 - Coletor Térmico Solar-Usina Térmica Experimental- CEFET-MG

Neste trabalho, adotaremos o termo Coletor Concentrador Solar, ou simplesmente Coletor, ao conjunto citado acima com sua respectiva estrutura de sustentação. Cada coletor constitui um Módulo de unidade, que é montado em série, para formar uma linha de concentradores. Uma Usina Térmica Solar é constituída por várias linhas paralelas e cada uma delas constituída por um número definido de módulos Coletores Concentradores (Palz,1981). O espaçamento entre Linhas é dimensionado de forma a reduzir o efeito de sombreamento entre elas.

Na Usina Térmica Experimental foi utilizado o tubo absorvedor em aço inox AISI 304, sch 40 revestido com Solkote SorB II como superfície seletiva. O tubo de vidro em boro silicato, de baixo teor de Fe, não teve tratamento anti reflexo devido à falta desta tecnologia a tempo. Não foi possível fazer a câmara anular evacuada pelo mesmo motivo e também pela dificuldade de compra deste componente em pequena quantidade.

A transmissividade do tubo de vidro utilizado, com diâmetro de 75mm e  $e = 4,2\text{mm}$  varia de 90 a 91 % como se pode observar pela Figura 7, e tem as extremidades com vedação não estanque em anéis de silicone.

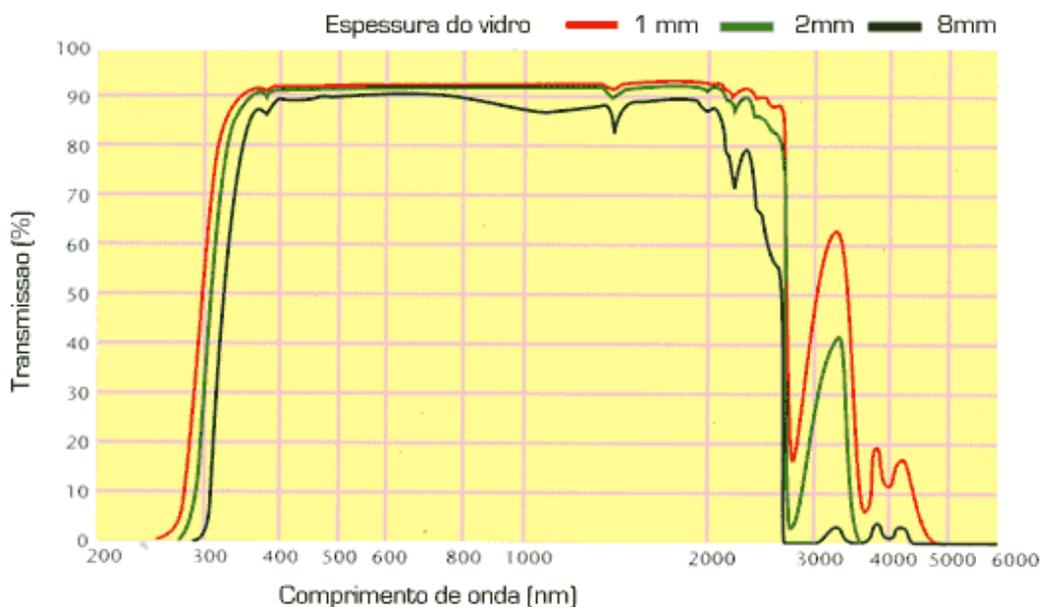


Figura 7 – Curva de transmissividade do tubo de vidro branco em boro-silicato

**Estrutura de sustentação dos espelhos.** A estrutura de sustentação deve ser leve, porém com alta resistência aos efeitos de torção, vibrações e ventos. As colunas de sustentação são constituídas por perfis de aço, viga I ou cantoneiras treliçadas; a estrutura de apoio da superfície refletora pode ser uma treliça em tubos ou perfis de alumínio, ou uma opção mais compacta na forma de uma viga T, construída em chapa fina de aço, com a alma cortada a laser, em perfil parabólico, como mostrado na Figura 8. A construção desses componentes obedeceu a um critério de alta precisão com tolerâncias mínimas, ( $< 1,0\text{mm}$ ) pois exerce grande influência no ajuste de foco. A estrutura de sustentação da superfície refletora apresentou resistência e estabilidade requeridas pelo processo durante o período de operação.

O eixo da estrutura de sustentação apresentou pequena torção devido ao acréscimo de peso com a instalação de chapas de proteção contra “chuva de pedra”. Esta deformação pode se corrigida com reforço no tubo central.



Figura 8 - Estrutura do Coletor Concentrador Solar – CEFET-MG

**Acionamento mecânico.** O acompanhamento da trajetória solar pelos coletores tem o objetivo de manter a concentração no seu Foco e é feito por meio de um conjunto moto redutor dotado de inversor de frequência e encoder para posicionamento angular (Figura 8).

As extremidades de cada Linha são interligadas à tubulação por meio de tubos metálicos flexíveis, fole super e uma malha externa em aço inox série 300, com revestimento externo, uma capa de fibra de vidro revestido com silicone, terminais pontas com flanges Padrão ANSI B16.5 classe 300.



Figura 9 - Ajuste de Foco-Usina Térmica Experimental – CEFET-MG

O sistema de acionamento, bem como os tubos flexíveis utilizados na Usina Experimental, atenderam plenamente às necessidades do processo.

**Sistema de automação e controle-rastreamento solar.** O funcionamento é automático e corrige a posição de foco a cada 40 segundos, monitorado pelo Rastreador que comunica com o CLP para comando do motor (Figura 10).

A medição e o controle de temperaturas são feitos com a utilização de PT-100 nos terminais das linhas, com uma programação que registra vazão, temperatura e energia captada em cada linha em kW e em W/m<sup>2</sup>.

O Rastreador foi um produto desenvolvido dentro do Programa de P&D citado e controla a manutenção focal com precisão. Foi instalado na Linha 2 e deverá ser conectado para controle das outras duas Linhas da Usina Experimental. Pretende-se agora desenvolver este componente para viabilizar sua transformação em um produto comercial.



Figura 10- Linha 02 com Rastreador -Usina Térmica Solar - CEFET-MG

**Sistema de fluido térmico.** Para a retirada de calor captada nos coletores, utiliza-se um óleo térmico ou sal derretido, substâncias que podem trabalhar em altas temperaturas e baixas pressões. São utilizados óleos minerais ou sintéticos.

Os óleos minerais são derivados de petróleo e podem trabalhar até temperaturas de 300°C. Os óleos sintéticos são produtos industrializados que trabalham em temperaturas até 400°C. A maior parte das usinas em operação atualmente trabalha com fluido sintético a 390°C.

O sal derretido é uma substância constituída por compostos de Na e K, que tem como propriedades um alto calor específico e capacidade para operar em temperaturas mais elevadas do que a dos óleos sintéticos, como, por exemplo, a 580°C. Essas características do sal derretido constituem uma grande vantagem para aplicação em usina solar porque viabilizam a utilização de tanques de armazenagem como reservatórios térmicos, para permitir a geração de energia elétrica durante períodos curtos de sombreamento e principalmente à noite.

Um sistema de bombeamento circula o fluido nos coletores, onde ele absorve a energia térmica gerada pela radiação solar, a uma determinada temperatura de trabalho, e transporta esta energia, primeiramente ao superaquecedor, em seguida, ao gerador de vapor, e, finalmente, ao preaquecedor da água de alimentação, de onde retorna ao campo solar (Stine, 1987).

Na Usina Térmica Experimental está sendo utilizado o óleo mineral devido ao seu limite de temperatura, previsto para até 280°C

Para as condições desta usina foi utilizada uma bomba com vazão para 12.000 litros /h, altura manométrica de 50mcl e selo mecânico com refrigeração a água.

**Tubulação.** Toda a tubulação de circulação do fluido térmico é constituída por tubos de aço carbono sem costura, de alta qualidade, conforme ASTM-A 106, Gr. A ou B, sch 40, que podem trabalhar até a temperatura limite de 430°C. Todas as emendas são ligações soldadas ou com flanges (Braga, 2001).

**Flexibilidade da tubulação.** Uma análise cuidadosa da flexibilidade da tubulação se fez necessária, devido às condições de trabalho em alta temperatura.

**Teste hidrostático.** Após montagem, cada trecho foi submetido a teste hidrostático para a verificação de estanqueidade (Figura 11). A pressão de teste utilizado na tubulação foi de 18 bar durante 60min.

**Limpeza da tubulação.** Em seguida, foi feita uma limpeza rigorosa na tubulação, antes do seu enchimento com o óleo térmico.

**Isolamento térmico.** Toda a tubulação foi isolada com calhas de lã de vidro ou lã de rocha, com espessura de 63,5mm dimensionada para reduzir, ao mínimo, as perdas pelas paredes.

Durante a operação observou-se que há vantagens em melhorar o isolamento térmico para reduzir ainda mais as perdas pelas paredes.

**Tanque de Expansão.** Como este sistema trabalha na fase líquida, foi instalado um tanque de expansão com o objetivo de compensar a variação de volume do fluido provocado pela dilatação térmica.

O comportamento geral do sistema de fluido térmico preencheu a necessidade do processo durante a operação.



Figura 11-Linha 1: Teste Hidrostático da Tubulação –Usina Térmica Solar- CEFET-MG

#### 4. DIMENSIONAMENTO DE UMA LINHA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

Estamos considerando, aqui, um sistema de concentração solar com a utilização de fluido térmico, na fase líquida ou água pressurizada superaquecida, em circuito fechado, para aplicação em processo industrial ou geração termelétrica.

O fluido sai em alta temperatura do campo solar e retorna com um diferencial de temperatura após ceder calor ao processo (Quaschning, 2003; Price, 1999).

A definição das temperaturas, tanto de saída como de retorno, depende da necessidade do processo.

Para o balanço térmico de uma Linha de Concentradores, há necessidade da definição de alguns dados e de se estabelecer algumas premissas para análise e posterior ajuste de dados, após algumas simulações.

##### 4.1 Dados iniciais necessários

Intensidade de radiação solar direta, local, a ser considerada para o dimensionamento:  $I$  em  $W / m^2$ .

Potência térmica da Linha:  $Q_u$  representa a energia absorvida pelo fluido térmico no Absorvedor – kW.

Temperatura do fluido no final da Linha (saída do campo solar para o processo):  $t_s$  - °C.

Temperatura do fluido à entrada da Linha (retorno do processo):  $t_e$  - °C.

Cálculo da vazão do fluido:  $m$ .

$$\begin{aligned} Q_u &= m \cdot cpm \cdot (t_s - t_e) \text{ kW} \\ m &= Q_u / cpm \cdot (t_s - t_e) \text{ em kg/s} \\ cpm &= \text{calor específico médio do fluido} - \text{kJ / kg } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2)$$

Seleção do Módulo do Coletor Concentrador Solar – Dimensões

$A$  = abertura de cada Módulo - m

$C$  = comprimento de cada Módulo - m

$$Sa = A \cdot C \text{ em } m^2 \quad \text{Área da Abertura de cada Módulo} \quad (3)$$

$$Sa = A \cdot C \text{ em } m^2 \quad \text{Área da Abertura de cada Módulo} \quad (4)$$

Captação solar da Linha: inicialmente, selecionar o valor desejado de  $Q_u$  para a Linha

$$Q_u = \eta \cdot I \cdot \cos\theta \cdot S \text{ calor absorvido na Linha} - \text{kJ/h} \quad (5)$$

$$S = Q_u / \eta \cdot I \cdot \cos\theta \text{ em } m^2 \quad \text{Área de captação da Linha} \quad (6)$$

$I$  = radiação solar local  $W / m^2$

$\eta$  = eficiência de captação solar do coletor %

$\theta$  = ângulo de incidência solar em relação à perpendicular à Superfície Refletora

Nº de Módulos Coletores da Linha:

$$n = \frac{S}{As} \quad (7)$$

Comprimento da Linha:

$$L = n \times C - m \quad (8)$$

## 4.2 Captação solar

A energia solar incidente nos espelhos é refletida e concentrada no Coletor Térmico Solar onde é convertida em calor e absorvida pelo fluido térmico circulante, elevando sua temperatura ao valor estabelecido. Parte da energia da radiação incidente se perde por reflexão, por convecção e radiação (Stine, 1987).

Determinação da energia total incidente na superfície refletora da Linha de Concentradores parabólicos:

$$Q_t = I \cdot \cos\theta \cdot S \quad (9)$$

Cálculo da energia concentrada e captada no elemento Coletor Térmico:

$$Q_c = I \cdot \cos\theta \cdot S \cdot (\rho\tau\Phi\alpha) \quad (10)$$

Perda por convecção no Coletor Térmico:

$$Q_{con} = Sab \cdot U \cdot (Tab - Ta) \quad (11)$$

Perda por radiação do Coletor Térmico:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot Sab \cdot F \cdot (Tab^4 - Ta^4) \quad (12)$$

Calor útil absorvido ao longo da Linha de Concentradores:

$$Q_u = Q_c - (Q_{con} + Q_{rad}) \quad (13)$$

$\rho$  = refletividade da superfície refletora (espelhos)

$\tau$  = transmissividade do tubo de vidro

$\Phi$  = fator de captura

$\alpha$  = absorptividade do tubo absorvedor

$Sab$  = área do absorvedor

$F$  = fator de radiação

$U$  = coeficiente global de transferência de calor do elemento coletor para o ambiente

$Tab$  = temperatura do tubo absorvedor

$Ta$  = temperatura ambiente

### Cálculo preliminar do diâmetro do tubo absorvedor:

O diâmetro do tubo absorvedor e a vazão do fluido devem ser tais que resultem em uma velocidade de escoamento característica de regime turbulento – Número de Reynolds elevado – possibilitando uma alta taxa de transferência de calor suficiente para absorver a energia captada, sem elevar a temperatura do filme do fluido acima do seu limite permitido. Por outro lado, o diâmetro externo do tubo deve ser capaz de interceptar a imagem dos raios solares refletidos pelo espelho; um exemplo desta verificação é mostrado a seguir, em função das dimensões da abertura do Coletor, do ângulo de abertura (Rim angle) e do ângulo de dispersão máximo permitido.

### Observações importantes:

A escolha do fluido a ser utilizado deve levar em conta a temperatura e as condições de trabalho, considerando as propriedades do fluido, como massa específica, calor específico, viscosidade e condutividade térmica e suas respectivas variações com a temperatura.

Temperatura até aprox. 220°C: pode se usar água pressurizada ou óleo mineral.

Temperatura até 300°C: óleo mineral ou sintético.

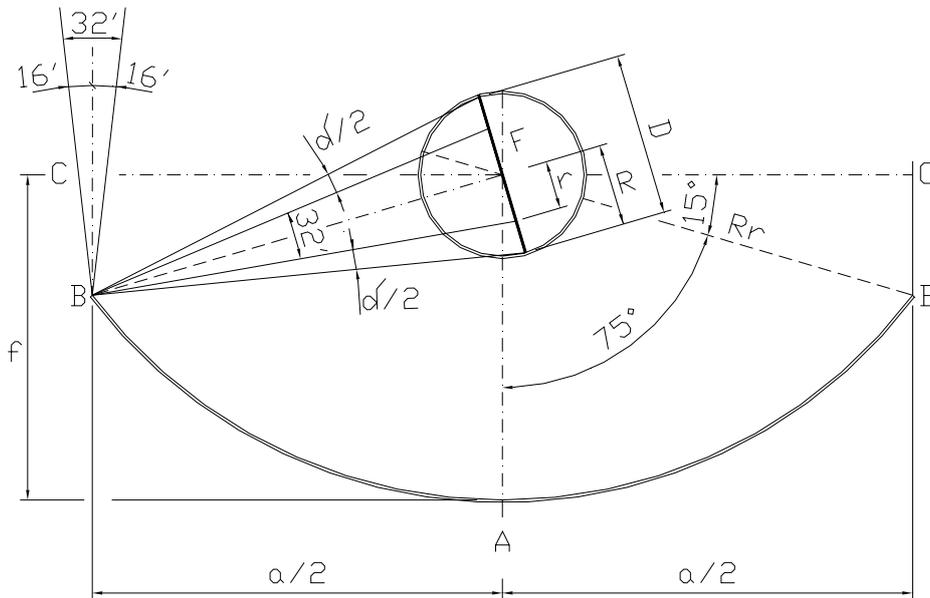
Temperatura de 300 a 400°C: óleo sintético.

Temperatura acima de 400°C: sal derretido.

Para processo industrial, é comum adotar-se um diferencial de temperatura entre 15 e 35°C. Para usinas termelétricas, este diferencial é bem maior devido à circulação em série do fluido, através do superaquecedor, gerador de vapor e pré-aquecedor da água de alimentação.

### 4.3 Verificação de diâmetro do tubo absorvedor

A Figura 12 se refere à Usina Térmica Solar Experimental do CEFET-MG



- $a = 3440\text{mm}$  – abertura do coletor
- $f = 1121\text{mm}$  – distância focal
- $Rr$  = raio máximo da parábola
- $\theta r = 75^\circ$  ângulo de abertura ( Rim Angle)
- $\delta$  = ângulo de dispersão devido a imperfeições da superfície refletora
- $D = 48,3\text{mm}$  – diâmetro externo do tubo absorvedor
- $R = 24,14\text{mm}$  – raio do tubo absorvedor

Figura 12 – Desenho do cálculo para verificação do diâmetro do Tubo Absorvedor

$$Rr = \frac{a/2}{\cos 15^\circ} = \frac{1720}{0,9659} = 1.780,67\text{mm}$$

$$\frac{r}{Rr} = \text{sen} 16' = 0,267^\circ$$

$$\frac{R}{Rr} = \text{sen}(0,267 + \delta/2) = \frac{24,15}{1780,67} = 0,01356 \quad (14)$$

$$(0,267 + \delta/2) = 0,777^\circ$$

$$\delta/2 = 0,51^\circ = 30,6' \text{ dispersão}$$

$\delta/2$  refere-se ao ângulo de dispersão máxima admissível para o caso

O diâmetro máximo  $D$  do tubo absorvedor capaz de receber a imagem projetada total pode ser calculado em função da abertura  $a$  e do ângulo de abertura  $\theta r$  (Rim angle), uma vez estabelecida a dispersão  $\delta$  (Duffie, 1991).

$$D = 2Rr \cdot \text{sen}(0,267 + \delta/2) = \frac{a \cdot \text{sen}(0,267 + \delta/2)}{\text{sen} \theta r} \quad (15)$$

## CONCLUSÃO

O projeto P&D desenvolvido em parceria entre CEFET-MG, Cemig e Fundação Cefetminas tem como objetivo o desenvolvimento de uma tecnologia com significativo índice de nacionalização.

A Usina Térmica Experimental desenvolvida dentro do escopo deste convênio tem propiciado o desenvolvimento de conhecimentos importantes, tais como:

Preparo do terreno, locação das Linhas de Concentradores, Projeto e construção das Fundações e bases

Desenvolvimento do projeto, acompanhamentos da construção, da montagem e testes das estruturas de sustentação das Linhas de Concentradores.

Dimensionamento, especificação, acompanhamento da montagem e testes do sistema de acionamento mecânico de rotação dos concentradores.

Especificação, seleção dos componentes de instrumentação, automação e controle.

Desenvolvimento do Rastreador para acompanhamento da rota solar com precisão e manutenção do ajuste focal.

Dimensionamento e Projeto da tubulação de fluido térmico e respectivo sistema de bombeamento.

Projeto conceitual de uma usina termelétrica de pequeno porte.

Medições das variáveis termo-fluodinâmicas são feitas durante os testes do sistema. Um balanço energético completo do sistema computando a carga térmica solar e a carga térmica absorvida, a cada instante, está sendo utilizado e desenvolvido e será apresentado em um futuro trabalho.

A experiência adquirida neste protótipo experimental propicia uma significativa contribuição para o projeto de uma futura usina em escala comercial

Alguns pontos-chaves precisam ser desenvolvidos em linhas diversas de pesquisa, como:

**Tecnologia para aplicação anti-reflexo** no tubo de vidro borossilicato que envolve o tubo absorvedor.

**Superfície seletiva** a ser aplicada no tubo absorvedor para trabalho em alta temperatura.

**Coletor Térmico Solar**, que é o conjunto constituído pelo tubo absorvedor e tubo de vidro envoltório, terminais com juntas de expansão para compensar dilatação diferencial entre os dois tubos concêntricos e selagem para vácuo no espaço anular entre o absorvedor e o vidro. Neste caso específico, há necessidade de se conseguir o fornecimento do tubo em vidro de alta pureza para desenvolvimento da tecnologia de selagem e vácuo, ou compra do Coletor Térmico completo.

Há necessidade de parceria entre Centros de Pesquisa, a Indústria e Empresas de Engenharia que aceitem investir em um empreendimento com o objetivo de transformar o Sistema de Concentração Solar em produto para aplicação comercial com elevado índice de nacionalização.

## REFERÊNCIAS

BRAGA, J. Poluceno V. 2002. Geradores de Vapor, CEFET-MG.

BRAGA, J. Poluceno V. 2001. Energia-Recursos e Reservas Energéticas, CEFET-MG.

DUFFIE J.A. and BECKMAN W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley Interscience, New York.

LISBOA, A.H., 2000. Radiação solar direta a partir da global para uso potencial de concentradores solar. Estudo de casos: Minas Gerais e Paraíba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.

PRICE, H. & KEARNEY, D., 1999, Parabolic Trough Technology Roadmap, Sun.Lab/NREL, CO and Kearney and Associates, CA, USA.

PALZ, Wolfgang, 1981. Energia Solar e Fontes Alternativas. Hemus-Livraria Editora Ltda. Copyright, UNESCO, Paris  
Quasching, Volker, 2003, Understanding Renewable Energy Systems, FSC, (Forest Stewardship Council) Earthcan, London – Sterling, VA.

RABL, A., 1976, Comparison of Solar Concentrators, Solar Energy, vol. 18, pp. 93.111.

STINE, W. B., 1987. Power from the Sun - Principles of High Temperature. Solar Thermal Technology, SERI (Solar Energy Research Institute), U.S. DOE.

TIBA, Chigueru, 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de Dados Terrestres. Ed. Universitária da UFPE.

### THERMAL SOLAR PLANT FOR MEDIUM AND HIGH TEMPERATURES USING PARABOLIC TROUGHS – COMPONENTS ANALYSIS

**Abstract.** *This technical work presents an analysis of a solar energy concentrator system components which uses parabolic troughs. It defines the required conditions concerning to the site for implementing the thermal solar plant, the preparing of the land, location, civil works on foundation, different types of mirrors structures sustaining, reflecting surface for concentrating the solar beams, collecting element of solar energy in the thermal way, mechanical set-up, tracking of solar trajectory and applications for medium and high temperatures. This is one of the technical works developed in the Experimental Thermal Solar Plant built in the Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, in a P&D plan with Cemig and Fundação Cefetminas, approved by ANEEL.*

**Key Words:** Solar Energy, Solar concentrator, Solar troughs, Thermal solar plant.