

TESTE DA PERDA DE CALOR EM UM ELEMENTO DE CALOR DE UM CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO

Samira Fontes Domingos – samirafisica@yahoo.com.br

José Henrique Martins Neto – henrique@des.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Mestrado em Engenharia de Energia

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliação em laboratório (sem a presença da radiação solar) das perdas térmicas dos elementos de calor, que são utilizados como elemento de absorção da radiação solar de coletores concentradores do tipo cilíndrico parabólico. As perdas térmicas podem ser utilizadas para calcular de forma indireta a eficiência térmica dos coletores solares, sendo uma maneira mais viável para avaliação dos coletores concentradores devido às particularidades e as demandas desses tipos de coletores. Uma amostra do elemento de calor utilizado nos concentradores cilíndricos parabólicos instalados no CEFET-MG foi avaliada experimentalmente para determinação das suas perdas térmicas considerando diferentes temperaturas da superfície absorvedora do elemento de calor. Adicionalmente, os valores medidos das perdas de calor foram introduzidos em um cálculo simplificado para avaliação preliminar da eficiência térmica dos concentradores instalados no CEFET-MG. Os valores das perdas de calor obtidos no laboratório do CEFET-MG foram comparados com valores de perdas de calor obtidas no laboratório do NREL (Estados Unidos) para testes realizados em um elemento de calor utilizado no sistema solar denominado Solar Energy Generating Systems (SEGS), localizado também nos Estados Unidos. As perdas de calor obtidas no elemento de calor testado no laboratório do CEFET-MG mostraram valores superiores àquelas obtidas para o elemento de calor testado no laboratório do NREL, o que implicou em perda de eficiência térmica dos coletores do CEFET-MG quando comparada aos valores calculados para os coletores, cujos elementos de calor foram testados pelo NREL.

Palavras-chave: Concentrador cilíndrico-parabólico, perdas térmicas, eficiência térmica.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho consistiu em realizar testes internos em laboratório para avaliação das perdas térmicas de uma amostra do elemento de calor que é utilizado nos coletores cilíndricos parabólicos da usina solar localizada no Campus II do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Para simular a radiação solar absorvida pelo elemento de calor foram inseridas no interior deste, cinco resistências elétricas visando promover o aquecimento da superfície absorvedora. As perdas térmicas desse elemento de calor foram determinadas e comparadas com as perdas térmicas obtidas e divulgadas pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos Estados Unidos. O laboratório do NREL avaliou experimentalmente o elemento de calor que é utilizado nos coletores cilíndricos parabólicos da maior usina solar existente atualmente, a SEGS. Adicionalmente foi possível utilizar as perdas térmicas obtidas experimentalmente para realização de um cálculo preliminar simplificado sobre possíveis valores da eficiência térmica dos coletores do CEFET-MG considerando-se, entretanto, que o rendimento ótico dos coletores solares testados em ambos os laboratórios tivessem valores iguais.

2. CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO

Os coletores concentradores cilíndricos parabólicos têm sua superfície refletora formada por uma parábola espelhada contínua (i.e., espelhos ou chapas de aço inoxidável ou de alumínio) que tem por objetivo refletir e direcionar a radiação solar para uma linha localizada no foco da parábola, denominado elemento de calor, como esquematizado na Fig. 1. Assim como outros concentradores, os coletores cilíndricos parabólicos podem ser utilizados para aplicações em processos térmicos industriais, embora as aplicações mais nobres estejam na geração de potência utilizando ciclos termodinâmicos que requerem altas temperaturas para operarem com elevados rendimentos térmicos.

O elemento de calor é constituído por um tubo de vidro localizado externamente ao tubo absorvedor, sendo que a configuração desses dois tubos é do tipo concêntrico. Um fluido térmico circula no interior do tubo absorvedor do elemento de calor, sendo responsável pela extração da energia que será utilizada no processo.

Os concentradores cilíndricos parabólicos ou concentradores lineares atuam na faixa de 60°C a 400°C, que correspondem à faixa de concentração (i.e., razão entre a área de abertura do coletor e a área de absorção de radiação solar) variando de 10 a 85, respectivamente, conforme descrito por (Kalogirou, 2009), sendo a razão máxima teórica de concentração igual a 216. Esses coletores utilizam apenas a radiação direta que é colimada para a linha focal da

parábola, o elemento de calor. O elemento de calor das usinas solares construídas na Califórnia SEGS alcança temperaturas de aproximadamente 450°C, enquanto que no Brasil o sistema alcança temperaturas de aproximadamente 250°C. Ao considerar a temperatura ambiente média de 25°C pode-se ter uma idéia da ordem de grandeza das perdas térmicas que podem ocorrer no elemento de calor pelos mecanismos de transferência de calor de radiação infravermelha e convecção. Portanto, o tubo absorvedor do elemento de calor precisa ser projetado não apenas para absorver grande parte da radiação solar incidente, mas também para reduzir as perdas de energia devido à grande diferença de temperatura existente entre o tubo absorvedor, o ar ambiente e a temperatura do céu. Desta forma o tubo de vidro, instalado externamente ao tubo absorvedor, tem uma importante tarefa quanto à redução das perdas térmicas neste tipo de coletor solar.

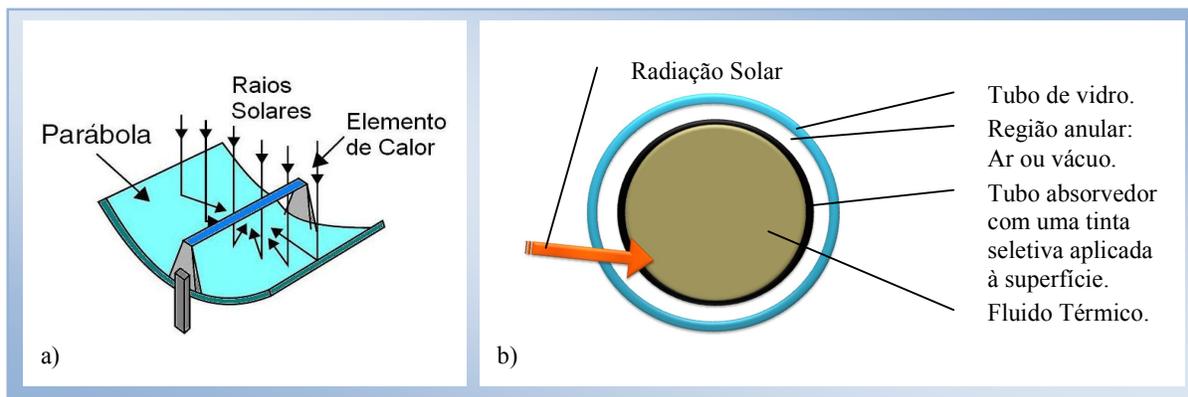


Figura 1: a) Esquema da montagem de um concentrador cilíndrico parabólico.

Fonte adaptada: (Kalogirou, 2009)

b) Detalhe dos componentes de um elemento de calor em corte.

3. ESTAÇÕES SOLARES TÉRMICAS NO MUNDO

As maiores usinas solares do mundo que utilizam energia solar térmica para geração de potência elétrica são constituídas por concentradores cilíndricos parabólicos, sendo que as seis maiores usinas solares que utilizam concentradores cilíndricos parabólicos são listadas conforme mostra a Tab. 1.

Tabela 1: Sistemas solar térmicos que utilizam concentradores cilíndricos parabólicos operantes no mundo

Fonte adaptada: (Wikipedia, 2010)

Capacidade (MW)	Nome	País	Localização	Ano da entrada de operação
354	<i>Solar Energy Generating Systems (SEGS)</i>	USA	Deserto Mojave, Califórnia	1990
100	<i>Andasol Solar Power Station 1 e 2</i>	Espanha	Granada	2011
64	<i>Nevada Solar One</i>	USA	Boulder City, Nevada	2010
50	<i>Energia Solar De Puertollano</i>	Espanha	Puertollano, Cidade Real	2009
50	<i>Alvarado 1</i>	Espanha	Badajoz	2007
1	<i>Saguaro Solar Power Station</i>	USA	Red Rock Arizona	2005

O maior sistema solar térmico formado por concentradores do tipo linear ou cilíndrico parabólico instalado no mundo é a SEGS, que contém nove usinas distintas, numeradas e denominadas SEGS I a SEGS IX. Essas instalações, apresentadas nas Fig. 2 e 3, têm uma capacidade total instalada de 354 MW e foram construídas no período de 1985 a 1991, no deserto de Mojave ao sul da Califórnia, nos Estados Unidos.



Figura 2: *Solar Energy Generating Systems* (SEGS): o maior sistema solar térmico instalado no mundo em uma foto aérea e uma foto em detalhe de um dos coletores.

A segunda maior usina solar do mundo em operação, formada por concentradores do tipo cilíndrico parabólico, é a *Andasol Solar Power Station*, sendo esta a primeira usina solar térmica instalada na Europa e está localizada em Granada, na Espanha. A Andasol é constituída por duas plantas, Andasol 1 e 2, conforme apresentado na Fig. 3, que já se encontram em operação, e uma terceira planta, Andasol 3, que está em fase de construção. Cada planta solar produz 50 MW de potência elétrica nominal, sendo que o término da construção de Andasol 3 está previsto para o ano de 2011.



Figura 3: Andasol: O segundo maior sistema solar térmico instalado no mundo.

A instalação do CEFET-MG única no país, composta por três linhas de coletores cilíndricos parabólicos. A construção desta instalação faz parte de dois projetos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), tendo início no ano de 2002 com participação do CEFET-MG.

4. EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM CONCENTRADOR SOLAR

A norma americana ASHRAE, (Ashrae, 1991) “*Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors*” recomenda os seguintes três testes para avaliação de coletores do tipo plano e do tipo concentrador: (i) teste da constante de tempo do coletor; (ii) teste de eficiência térmica; (iii) teste do ângulo de incidência modificado. Esses testes podem ser realizados em ambiente externo (*outdoors*) para todos os tipos de coletores e em ambiente interno (*indoors*) para coletores planos, utilizando-se neste caso simuladores solares constituídos por lâmpadas especiais que apresentam espectro de radiação similar à da radiação solar. A realização de testes internos (*indoors*) em coletores do

tipo concentrador geralmente não é viável devido aos problemas de colimação da radiação emitida pelas lâmpadas. Os raios emitidos por essas lâmpadas não são perfeitamente paralelos, conseqüentemente, após os mesmos serem refletidos pela superfície refletora podem se desviar de forma significativa do foco ou da linha focal comprometendo a simulação, conforme mencionado por um fabricante de simuladores internos solares. Outro motivo deve-se às grandes dimensões dos coletores concentradores quando comparadas aos coletores planos o que requereria grandes áreas internas de laboratório e muitas lâmpadas. A construção de protótipos em escala menor poderia contrabalançar este problema, entretanto, não garantiria com exatidão as deficiências óticas que poderiam ser encontradas nas superfícies refletoras dos coletores com o seu tamanho real. Por outro lado, a realização de testes externos (em campo) em coletores do tipo concentrador também podem se tornar complexas em sistemas de grande porte, tais como, os sistemas da Califórnia (SEGS), Espanha (Andasol) e até para o sistema instalado no Brasil por demandarem um controle preciso das variáveis envolvidas, como a radiação direta, que depende das condições meteorológicas locais. Entretanto, algumas modificações podem ser realizadas nas usinas solares que utilizam coletores concentradores visando controlar algumas variáveis, tais como a temperatura e vazão do fluido térmico na entrada do coletor. Atualmente essas adaptações vêm sendo providenciadas nas instalações do CEFET-MG, visando possibilitar a realização de testes conforme determinado pelas normas americanas e européias.

A norma nacional ABNT NBR 10184:1988 está cancelada e foi substituída por outras duas novas normas em 2009: ABNT NBR 15747-1:2009 e ABNT NBR 15747-2:2009. As novas normas do Brasil baseiam-se na norma Americana (ASHRAE, 1991) e descrevem os métodos de ensaio para determinação do rendimento térmico de coletores planos de baixa temperatura (cerca de 60°C) que são utilizados freqüentemente para aquecimento de água de banho e água de piscinas. Desta forma torna-se necessário a investigação de novas metodologias para elaboração de testes mais aplicáveis, viáveis e mais aceitáveis para avaliação de coletores do tipo concentrador. A metodologia apresentada neste artigo é relacionada à elaboração de um teste para determinação das perdas térmicas do elemento de calor de coletores do tipo concentrador, podendo este teste ser considerado viável e aceitável para a qualificação desses tipos de coletores.

5. TESTE DE PERDA DE CALOR DO NREL

A metodologia para elaboração e realização de testes das perdas térmicas em coletores solares objetiva identificar as perdas de calor dos elementos de calor de coletores do tipo concentrador, especificamente coletores do tipo cilíndrico parabólico. Esse teste pode ser utilizado para comparar as eficiências térmicas de coletores do mesmo tipo operando em condições idênticas, de forma a se avaliar e até comparar os mesmos principalmente quanto ao seu desempenho térmico.

A caracterização de coletores concentradores, ou seja, o levantamento das curvas de eficiência térmica dos coletores, de acordo com (Duffie e Beckman, 2006), pode ser realizada determinando-se três diferentes parâmetros: (i) o coeficiente global de transferência de calor (i.e., coeficiente global de perdas térmicas do coletor) " U_L "; (ii) os fatores de remoção de calor " F_R " (i.e., razão entre a energia útil real e a energia útil ideal máxima se toda a superfície do absorvedor estivesse numa temperatura igual à temperatura de entrada do fluido operante); (iii) o rendimento ótico do coletor (i.e., razão entre a radiação absorvida pelo tubo absorvedor do elemento de calor e a radiação normal incidente na abertura do coletor). O ângulo de incidência modificado é outro parâmetro que pode ser utilizado para caracterização do rendimento ótico dos concentradores, sendo útil para avaliar os efeitos da refletividade da superfície refletora, da transmissividade do tubo de vidro, e da absorvidade do tubo absorvedor quando a radiação incidente desvia-se da posição normal (ângulo de incidência igual a zero). Equações desenvolvidas por (Duffie e Beckman, 2006) correlacionam " F_R " com variáveis, tais como, a vazão mássica do fluido operante, o coeficiente global das perdas de calor " U_L ", os parâmetros geométricos do tubo absorvedor e os coeficientes convectivos de transferência de calor do lado do fluido operante. As perdas térmicas representadas por " U_L " estão presentes pelos mecanismos de radiação de longo comprimento de onda e por convecção devido às variações temporais da velocidade do vento e da temperatura do ar ambiente, além de convecção livre interna na ausência de vácuo.

Um modelo numérico para o cálculo das perdas de calor de elemento de calor de coletores cilíndricos parabólicos foi apresentado por (Forristall, 2003), objetivando o cálculo da performance de coletores cilíndricos parabólicos para os coletores do *Sandia National Laboratories* (SNL). Forristall desenvolveu e implementou o seu modelo utilizando a plataforma "*Engineering Equation Solver*" (EES) e também validou o seu modelo teórico com alguns experimentos (Forristall, 2003) e (Price, Forristall *et al.*, 2006).

Um trabalho experimental foi realizado por (Price, Forristall *et al.*, 2006) para avaliação das perdas térmicas dos elementos de calor utilizados em uma das usinas do SEGS objetivando detectar as perdas térmicas do elemento de calor quando da perda de vácuo entre o tubo de vidro e tubo absorvedor. O modelo de Forristall foi utilizado para esta análise e os resultados do modelo foram comparados com resultados experimentais para diferentes temperaturas do fluido operante. Os trabalhos de Forristall e Price enfatizam que a velocidade do vento influencia de forma significativa as perdas térmicas no elemento de calor e que a temperatura do vidro está fortemente relacionada com as perdas provenientes do tubo absorvedor.

Testes experimentais foram conduzidos por (Burkholder e Kutscher, 2008) no NREL e, posteriormente, aprimorados e repetidos por (Burkholder e Kutscher, 2009) considerando algumas amostras de elementos de calor, similares àqueles instalados nas usinas das SEGS. Os testes experimentais em laboratório determinaram as perdas de

calor nesses elementos de calor, que foram utilizadas posteriormente para avaliação do desempenho térmico dos coletores concentradores utilizando-se também softwares específicos.

O elemento de calor utilizado nos testes experimentais do NREL foi do tipo evacuado (i.e. possui vácuo na região anular localizada entre o tubo de vidro e o tubo absorvedor). A metodologia do teste consistiu na construção e montagem de um dispositivo conforme ilustrado na Fig.4, para simulação das perdas térmicas do elemento de calor. O dispositivo consistiu basicamente de um tubo de cobre equalizador de temperatura que foi inserido dentro do tubo absorvedor. Duas resistências elétricas de comprimento aproximadamente igual ao da metade do tubo absorvedor foram instaladas também dentro do tubo absorvedor para geração de potência térmica pelo efeito Joule visando simular a energia térmica dissipada pelo elemento de calor. Adicionalmente, duas resistências elétricas foram instaladas nas extremidades do tubo absorvedor para contrabalançar as perdas de calor das extremidades do tubo absorvedor. Sensores de temperatura foram instalados nas superfícies do tubo absorvedor e tubo de vidro do elemento de calor. As perdas térmicas foram determinadas através de balanços de energia realizados no elemento de calor, medindo-se as temperaturas em diferentes pontos do elemento de calor e a potência térmica gerada pelas resistências elétricas.

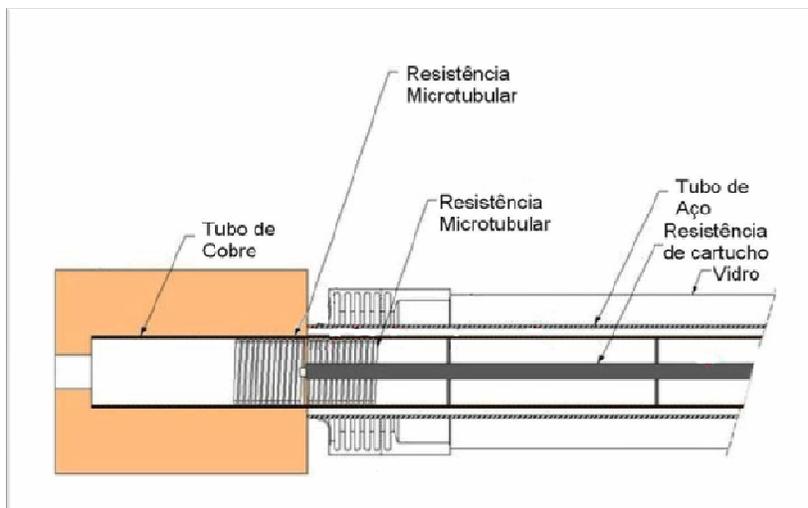


Figura 4: Montagem do teste de perda de calor realizado no NREL.

Os elementos de calor utilizados nos testes em ambos os laboratórios, conforme apresenta a Tab. 2, (Solar, 2009) apresentam características construtivas diferenciadas principalmente quanto à tecnologia utilizada quanto ao preenchimento da região anular localizada entre o tubo de vidro e tubo absorvedor.

Tabela 2: Aspectos construtivos dos elementos de calor do CEFET e do NREL. Fonte: (Solar, 2009)

Componente	Características:	Elemento de calor testado pelo CEFET MG	Elemento de calor testado pelo NREL
Elemento de calor	Comprimento do elemento de calor	0,68 m	4,06 m
	Diâmetro externo do elemento de calor (i.e., diâmetro externo tubo de vidro)	70 mm	125 mm
	Diâmetro interno elemento de calor (i.e., diâmetro interno tubo de vidro)	68 mm	114 mm
Tubo de vidro	Material do vidro	borosilicato	borosilicato
	Tratamento do vidro	Nenhum	cobertura anti-reflexo
Região anular	Preenchimento anular entre o tubo de vidro e o tubo absorvedor	ar	vácuo Pressão $\leq 10^{-3}$ mbar
	Distância da região anular entre o tubo de vidro e o tubo absorvedor	2,7 mm	6,0 mm
Tinta seletiva aplicada ao Tubo absorvedor	Tinta aplicada sobre o tubo absorvedor	Solkote -HI/SORB-II	SCHOTT PTR®70

Tubo absorvedor	Diâmetro externo do tubo absorvedor	50 mm	70 mm
	Diâmetro interno do tubo absorvedor	43 mm	66 mm
	Material do tubo absorvedor	Aço Inox Din 1 1/2"(48,3mm)	DIN 1.4541

6. TESTE DE PERDA DE CALOR NO CEFET-MG

O teste para determinação das perdas de calor do elemento de calor dos coletores concentradores instalados no Brasil foi realizado em laboratório numa bancada previamente projetada e montada similar àquele utilizada no NREL, objetivando determinar os coeficientes globais de transferência de calor do elemento de calor.

Um elemento de calor com características similares àqueles instalados nos concentradores do CEFET-MG foi estudado e analisado experimentalmente na bancada de testes instalada no laboratório. Os componentes da amostra do elemento de calor utilizada nos testes experimentais são componentes novos que estavam estocados e que faziam parte do material de reposição da instalação solar para uso em eventuais substituições de manutenção.

O elemento de calor foi preparado para teste ao se utilizar um tubo de cobre (inserido dentro do tubo absorvedor objetivando a equalização da temperatura), cinco resistências elétricas e onze termopares do tipo "K" (cromel - alumel) com isolamento mineral, previamente calibrados.

As principais vantagens em se realizar esses testes em ambiente de laboratório comparada à realização de testes de campo são as seguintes:

1. Melhor controle das variáveis envolvidas no experimento;
2. Melhor estabilidade e uniformidade das temperaturas do elemento de calor, possibilitado pelo uso de um controlador de potência elétrica;
3. Possibilidade da medição em tempo real das perdas térmicas através da medição da potência elétrica das resistências elétricas e da temperatura dos elementos da montagem.

A bancada experimental foi projetada e construída, tentando seguir o mais próximo possível as recomendações e procedimentos utilizados pelos pesquisadores do NREL, entretanto, adaptações foram realizadas durante a montagem de forma a sanar problemas práticos encontrados e também devido à necessidade de adequar os componentes às especificidades requeridas pelo elemento de calor em teste. A principal diferença entre a bancada dos dois testes pode ser considerada quanto a alguns componentes e instrumentos, visto que no NREL utilizaram-se alguns instrumentos mais sofisticados e, conseqüentemente, mais caros. Além disso, o mercado brasileiro não disponibiliza a variedade de materiais encontrados nos Estados Unidos. Entretanto, essas diferenças não representaram perda de precisão e nem de qualidade para a realização dos testes.

O elemento de calor utilizado nos concentradores cilíndricos parabólicos do CEFET-MG, conforme apresenta a Fig.5 é constituído por um tubo de vidro e um tubo absorvedor interno por onde flui um fluido térmico. A metodologia experimental utilizada neste trabalho consistiu em substituir o fluido térmico por resistências elétricas que foram instaladas no interior de um tubo de cobre, que por sua vez foi inserido dentro do tubo absorvedor. A resistência elétrica principal, do tipo cartucho, cobriu quase toda a extensão do tubo de cobre sendo responsável pela simulação das perdas térmicas. Adicionalmente, foram instaladas na superfície interna do tubo de cobre outras quatro resistências elétricas, do tipo microtubular, sendo duas em cada extremidade do mesmo. As potências elétricas dissipadas pela resistência elétrica de cartucho (principal) e pelas duas resistências micro tubulares internas (uma em cada extremidade) foram responsáveis pelo aquecimento do tubo absorvedor para simulação das perdas térmicas do elemento de calor.

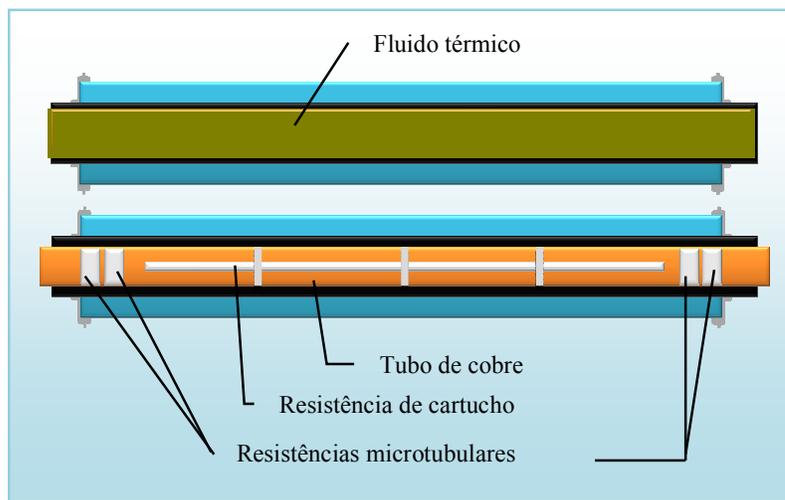


Figura 5: Elemento de calor no sistema integrado e em laboratório.

As outras duas resistências elétricas do tipo micro tubulares foram posicionadas mais externamente nas extremidades do elemento de calor sendo fixadas na parte interna do tubo de cobre de forma a promover um melhor contato entre a mesma e a superfície interna do tubo de cobre. A principal função dessas resistências foi de dificultar e mesmo anular as perdas de calor axiais pelas extremidades da amostra do elemento de calor proporcionando desta forma uma transferência de calor predominantemente radial.

A resistência de cartucho utilizada foi construída por um fabricante nacional sendo que no design da mesma as extremidades foram preenchidas com isolante elétrico, ou seja, nas extremidades não havia fios resistores internos. Este design é denominado na prática de “resistência de extremidades frias”, sendo que esta configuração é bastante comum entre os fabricantes internacionais de resistências elétricas. Neste design tentou-se seguir a tecnologia utilizada na fabricação da resistência elétrica de cartucho utilizada para teste do elemento de calor do NREL fabricada pela empresa americana “Watlow” (Watlow, 2009). As resistências micro tubulares encontradas no mercado nacional são comumente fabricadas para resistir uma temperatura máxima de 350°C diferentemente das resistências fabricadas pela “Watlow” que resistem temperaturas bem superiores. Portanto, devido a essa limitação e possibilidade de queima dessas resistências quando expostas a altas temperaturas decidiu-se pelo não posicionamento dessas resistências nas extremidades da área externa da resistência de cartucho, como foi feito na montagem do NREL, mas sim pelo seu posicionamento na superfície interna do tubo de cobre (sob pressão) de forma a protegê-las das altas temperaturas da resistência de cartucho (cerca de 400°C). O fato da resistência de cartucho apresentar suas extremidades mais frias comparadas àquelas da região central contribui também para a redução das temperaturas nas extremidades do tubo de cobre, onde as resistências micro tubulares foram posicionadas, o que garantiu certa confiabilidade quanto ao bom funcionamento e longevidade das mesmas.

Todas as cinco resistências elétricas tiveram seu controle da potência elétrica realizada através do controle da tensão, sendo que a resistência de cartucho (principal) foi controlada por um variador de tensão do tipo “varivolt”. As tensões das outras quatro resistências micro tubulares foram controladas por “dimmers”, que permitiram o ajuste manual da tensão com boa precisão e estabilidade. Dessa forma foi possível a obtenção de diferentes temperaturas na superfície do tubo absorvedor utilizando as mesmas resistências elétricas.

Para o cálculo da perda de calor do tubo absorvedor, foi necessário determinar a potência elétrica entregue pela resistência de cartucho (principal) e pelas duas resistências microtubulares internas instaladas em cada extremidade do tubo de cobre, respectivamente. Transdutores de potência ativa, devidamente calibrados e fabricados pela empresa Yokogawa, foram encomendados especificamente para atender a este projeto, sendo que as potências elétricas geradas pelas três resistências elétricas foram convertidas em sinais analógicos (4 a 20 mA) e transmitidas para um sistema de aquisição de dados do fabricante HP (modelo Agilent 34980A), também devidamente calibrado. Um painel elétrico também foi projetado e construído para comandar, monitorizar e controlar as resistências elétricas.

Em cada teste foram realizadas medições de temperatura num total de dez pontos no elemento de calor, uma medição da temperatura do ar ambiente e três medições da potência elétrica referentes às três resistências elétricas.

Os testes realizados no NREL utilizaram um elemento de calor com cerca de 4 metros de comprimento e a metodologia de teste consistiu na medição de dezessete pontos de temperatura (tubo absorvedor e tubo de vidro), sendo o intervalo das medições das temperaturas no tubo absorvedor de 40°C em 40°C e uma temperatura máxima de cerca de 500°C. Por outro lado, nos testes realizados no Brasil foi utilizado um elemento de calor de menos de 1 metro de comprimento, com medições de temperatura em dez pontos com intervalo médio de 20°C, iniciando-se o teste com a temperatura da superfície externa do tubo absorvedor igual à 70°C e finalizando o mesmo com a temperatura da superfície externa do tubo absorvedor igual à 250°C.

As medições realizadas em ambos os laboratórios foram conduzidas após a estabilização temporal das temperaturas, ou seja, após o elemento de calor entrar em regime permanente. O critério utilizado para a constatação da entrada em regime permanente do elemento de calor foi analisar as temperaturas do tubo absorvedor e do tubo de vidro, verificando se as mesmas mantinham constantes dentro de uma faixa de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ durante um intervalo de tempo de 15 minutos. As medições da temperatura do tubo absorvedor, da potência elétrica das três resistências elétricas (uma principal e duas nas extremidades), da temperatura do tubo de vidro e da temperatura do ar ambiente são apresentadas na Fig. 6, para o teste em que a temperatura do tubo absorvedor foi mantida em 130°C.

Analisando a Fig. 6 pode-se observar que durante o intervalo de tempo de 15 minutos as temperaturas e potências elétricas das resistências mantiveram praticamente constantes com variações dentro da faixa permitida de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, comprovando que a condição de regime permanente foi estabelecida durante as medições deste teste. Durante a preparação dos testes verificou-se que a estabilização das variáveis e, conseqüente, entrada em regime permanente do elemento de calor demorou aproximadamente 4 horas.

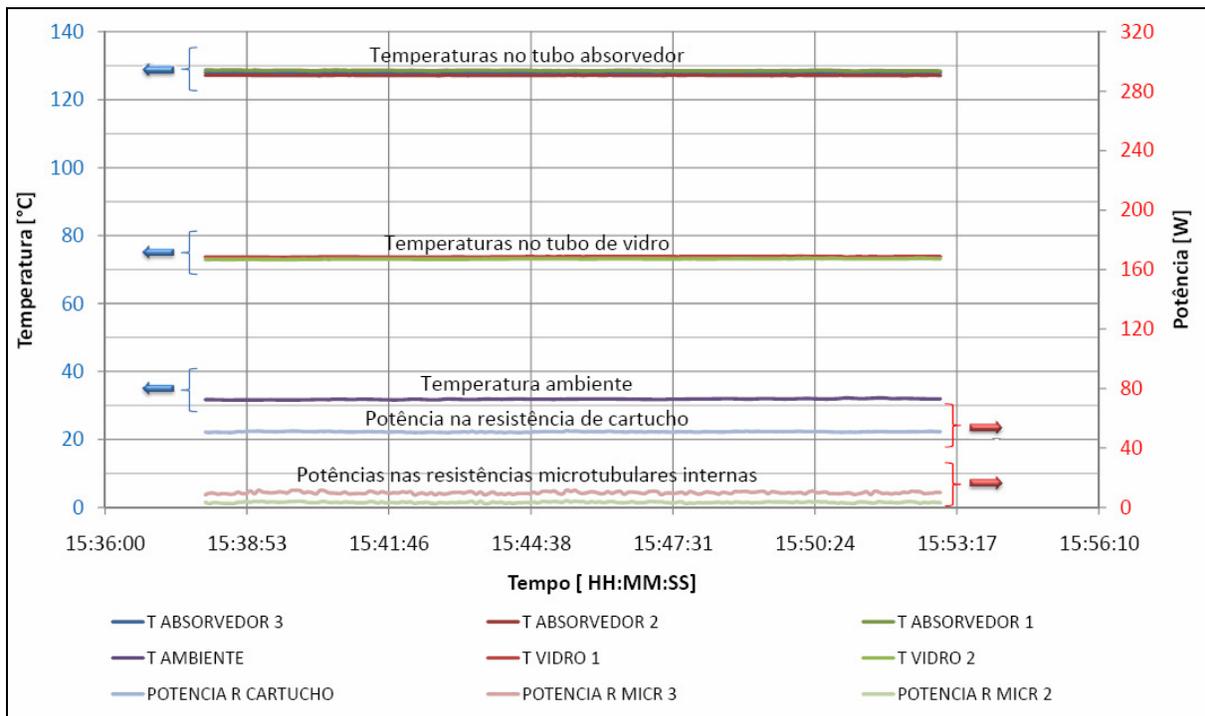


Figura. 6: Potências das resistências e temperaturas para o teste realizado no CEFET-MG para a temperatura do absorvedor de 130°C.

7. COMPARAÇÃO DAS PERDAS DE CALOR

Uma comparação das perdas de calor é apresentada na Fig. 7, para os elementos de calor testados em ambos os laboratórios. Essas perdas de calor (fluxos de calor) foram utilizadas para determinação dos fluxos de calor por unidade de área externa superficial do tubo absorvedor dos dois elementos de calor (q''). O fluxo de calor (q'') do elemento de calor do CEFET-MG foi obtido dividindo-se a taxa de calor instantânea medida experimentalmente pela área superficial externa do tubo absorvedor. As perdas térmicas por unidade de comprimento, conforme apresenta a Fig. 7, são analisadas em função da diferença de temperatura entre a temperatura média do tubo absorvedor e a temperatura do ar ambiente, visando eliminar a influência da temperatura ambiente. Entretanto, os pesquisadores do NREL observaram em trabalhos anteriores que a temperatura ambiente tem pouca influência nas perdas térmicas.

Os testes no elemento de calor do CEFET-MG limitaram-se à temperatura de 250°C no tubo absorvedor, enquanto que, os testes realizados no NREL se estenderam até a temperatura de 530°C. O motivo dessa limitação de temperatura deveu-se às resistências elétricas utilizadas na bancada possuírem um limite de temperatura inferior àquelas utilizadas na bancada dos EUA. As resistências elétricas utilizadas no Brasil foram adquiridas no mercado nacional e foram fabricadas com tecnologias diferentes daquelas utilizadas pelo NREL. Este fato impossibilitou a operação dos elementos de calor do CEFET-MG nas temperaturas compatíveis com aquelas utilizadas nos testes do NREL. Entretanto, como os testes de campo realizados nos concentradores do CEFET-MG indicaram valores máximos de diferença de temperatura entre o absorvedor e o ar ambiente de aproximadamente 250°C, conclui-se que a temperatura máxima obtida no teste de laboratório representa de forma realística às necessidades da instalação existente.

Analisando a Fig. 7 observa-se que os fluxos de calor (q'') do elemento de calor testado no laboratório do NREL apresentaram valores bem inferiores àqueles obtidos no CEFET-MG. A explicação deve-se ao em parte ao design construtivo dos elementos de calor do NREL que utilizam melhor tecnologia agregada. Outro motivo pode ser atribuído ao fato do elemento de calor testado no Brasil não ser do tipo evacuado na sua região anular, localizada entre o tubo de vidro e o tubo absorvedor, o que faz aumentar as perdas de calor pelo mecanismo de convecção livre do ar.

Verifica-se também que para a faixa de ΔT variando de 40°C até 240°C o comportamento de (q'') com ΔT é praticamente linear para ambos os elementos de calor. A partir do valor de ΔT igual a 240°C observa-se que (q'') começa a apresentar dependências aproximadamente parabólicas com o ΔT para o elemento de calor do NREL. Como não foram realizadas medições no elemento de calor do Brasil para valores superiores ao ΔT de 240°C não se pôde observar esse comportamento assintótico. O comportamento assintótico de (q'') pode ser explicado pelo fato das perdas de calor se tornarem bem mais significativas para temperaturas mais elevadas (i.e., $\Delta T > 240^\circ\text{C}$) devido principalmente as perdas de calor pelo mecanismo de radiação que depende da quarta potência da temperatura da superfície emissora. Para temperaturas inferiores ($\Delta T < 240^\circ\text{C}$) induz-se que as perdas por convecção e radiação são da mesma magnitude o que implica num perfil aproximadamente linear.

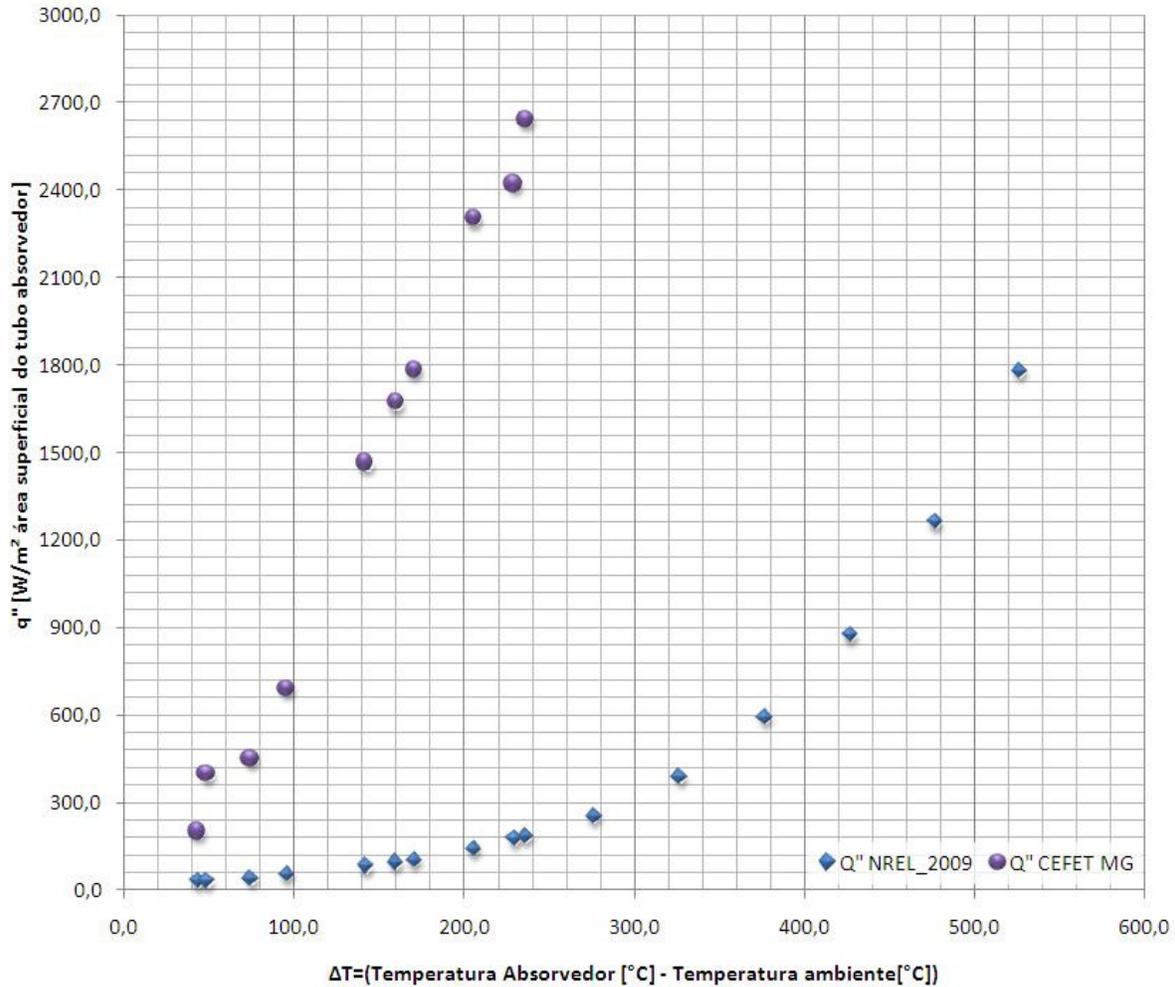


Figura 7: Comparação dos fluxos de calor por unidade de área superficial dos elementos de calor do NREL e do CEFET-MG.

8. COMPARAÇÃO PRELIMINAR DAS EFICIÊNCIAS TÉRMICAS

Uma metodologia para avaliação preliminar da eficiência térmica de coletores concentradores cilíndricos parabólicos é apresentada nesta seção e aplicada para ambas as amostras tomando como base as perdas térmicas dos elementos de calor determinadas experimentalmente nos laboratórios do CEFET-MG e do NREL.

A metodologia consiste em utilizar a Eq. (1) que define a eficiência térmica de um coletor solar (Duffie e Beckman, 2006).

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_a} \quad (1)$$

Onde: η é a eficiência térmica do coletor solar, Q_u é a taxa de calor útil, I_T é a taxa de radiação solar incidente no plano de abertura do coletor e A_a é a área de abertura do coletor. O calor útil Q_u , pode ser determinado conforme mostra a Eq. (2), realizando-se um balanço de energia no tubo absorvedor do coletor e considerando o regime permanente.

$$Q_u = S \cdot A_r - q'' \cdot A_r \quad (2)$$

Onde: S é a taxa de radiação solar absorvida por unidade de área do tubo absorvedor do coletor, q'' é a taxa de perdas de calor do tubo absorvedor do coletor por unidade de área do tubo absorvedor e A_r a área do tubo absorvedor.

O rendimento ótico de um coletor concentrador leva em conta a refletividade da superfície refletora, a transmissividade do tubo transparente e a absorvidade do tubo absorvedor podendo ser equacionado conforme mostra a Eq. (3).

$$\eta_o = \frac{S \cdot A_r}{I_T \cdot A_a} = \frac{S}{I_T \cdot C} \quad (3)$$

Onde: a razão A_a/A_r é a concentração do coletor concentrador C definida, de acordo com (Duffie e Beckman, 2006) e (Kalogirou, 2009), como sendo a razão entre a área de abertura do coletor e a área do tubo absorvedor.

Substituindo a Eq. (2) e (3) na Eq. (1) obtém-se a Eq. (4) que apresenta o rendimento térmico do concentrador em função do rendimento ótico, da radiação solar incidente na abertura do coletor e da taxa de concentração.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_a} = \frac{S \cdot A_r - q'' \cdot A_r}{I_T \cdot A_a} = \frac{S}{I_T \cdot C} - \frac{q''}{I_T \cdot C} \quad \therefore \quad \eta = \eta_o - \frac{q''}{I_T \cdot C} \quad (4)$$

Para realização da comparação das eficiências térmicas dos coletores foi necessário estimar uma radiação solar incidente no plano de abertura do coletor representativa de um dia típico de céu límpido uma vez que os testes experimentais foram realizados em laboratório sem presença de radiação solar. Um rendimento ótico foi assumido igual para ambos os coletores, embora na realidade existam diferenças entre os mesmos. Adicionalmente foram utilizadas no modelo as razões de concentração dos respectivos coletores.

O rendimento ótico dos dois concentradores foi admitido ser o mesmo, sendo este valor igual a 75% conforme relatório técnico do NREL. A radiação solar I_T foi considerada igual a 950 W/m². As áreas dos absorvedores dos elementos de calor A_r foram consideradas como sendo metade das áreas superficiais externas dos tubos absorvedores.

As predições preliminares das eficiências térmicas dos dois coletores concentradores são apresentadas na Fig. 8, considerando-se a Eq. (4), que se baseia nas perdas de calor q'' obtidas experimentalmente nos elementos de calor. Os valores das eficiências térmicas dos concentradores do CEFET-MG e do SEGS foram limitados às temperaturas máximas dos testes nos tubos absorvedores, ou seja, 250°C e 550°C, respectivamente.

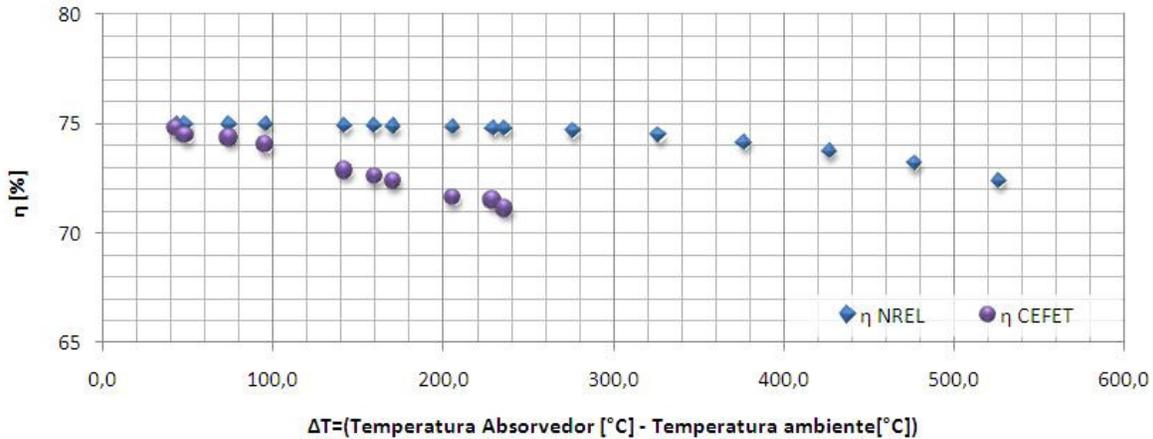


Figura 8: Gráfico das eficiências térmicas teóricas de ambos os elementos de calor.

Analisando a Fig. 8 observa-se que a eficiência térmica do concentrador do SEGS apresenta um comportamento praticamente linear para a faixa de temperatura dos tubos absorvedores variando de 70 a 300°C, enquanto que, o concentrador do CEFET-MG apresenta comportamento linear para toda a faixa de temperatura, ou seja, de 70 e 250°C. Para temperaturas acima de 300°C observa-se para o concentrador do SEGS uma queda mais acentuada da eficiência térmica, coerente com o aumento não linear das perdas térmicas, verificado na Fig.7. Adicionalmente, pode-se inferir da Fig. 8 que as perdas térmicas do elemento de calor não afetam de forma relevante a eficiência térmica dos concentradores. Este fato deve-se às pequenas áreas dos tubos absorvedores comparadas às áreas de abertura do coletor por onde entra a radiação solar. As altas razões de concentração (aproximadamente 71 para os dois concentradores) conforme mostra a Eq. (4) resultam em pequenos valores das perdas térmicas, quando essas são convertidas nas perdas de calor por unidade de área de abertura do coletor. Portanto, apesar das altas perdas térmicas do elemento de calor do CEFET-MG, essas não causam queda significativa na eficiência térmica do respectivo concentrador. Porém, é necessário ressaltar que as propriedades óticas dos coletores concentradores possuem papel de destaque na eficiência térmica destes coletores. Como ainda não foram realizados testes para avaliação do rendimento ótico dos coletores do Brasil não é possível afirmar que os rendimentos térmicos são àqueles mostrados na Fig. 8, havendo necessidade de realizar tais testes para que se possa avaliar com a devida precisão o rendimento térmico desses coletores. Por outro

lado, os resultados de eficiência térmica do coletor do SEGS, apresentados na Fig. 8, estão corretos visto que o rendimento ótico desses coletores foi determinado e utilizado na Eq. (4). Esses resultados estão também coerentes com os resultados das simulações realizadas por (Burkholder e Kutscher, 2009). Neste ponto é bom ressaltar que perdas de calor maiores, ainda que não afetem o rendimento térmico dos concentradores, resultam em temperaturas de estagnação mais baixas dos elementos de calor o que afeta o rendimento térmico de sistemas de geração de potência.

9. CONCLUSÕES

Uma bancada de teste similar àquela encontrada no laboratório do NREL nos Estados Unidos foi projetada e construída, no Brasil visando avaliar as perdas de calor por unidade de área (fluxo de calor) de um elemento de calor utilizado nos concentradores solares cilíndricos parabólicos. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de testes similares realizados em outro elemento de calor utilizado em uma das usinas solares SEGS da Califórnia. O elemento de calor testado no laboratório do CEFET-MG, conforme esperado, apresentou valores da perda de calor por unidade de área do tubo absorvedor superiores àqueles obtidos nos testes realizados no laboratório do NREL. A explicação deve-se ao design do elemento de calor utilizado nos coletores do CEFET-MG não contemplar a tecnologia de vácuo na região anular. O trabalho ainda apresentou uma análise preliminar da eficiência térmica de ambos os concentradores, considerando o mesmo rendimento ótico para ambos. A metodologia baseou-se nas perdas de calor obtidas em laboratório. Os resultados mostraram que a eficiência térmica dos coletores do CEFET-MG são inferiores àquelas obtidos nos coletores utilizados no SEGS, devido as suas maiores perdas térmicas. Uma melhor análise da eficiência térmica dos coletores do Brasil é imprescindível e deverá ser realizada em breve para avaliação real do rendimento ótico desses coletores, visto que esta variável tem impacto significativo no rendimento térmico dos coletores concentradores. O trabalho revela ainda que o elemento de calor utilizado nos coletores solares do Brasil deverá ser aperfeiçoado e a indústria nacional deverá se adequar para fabricar um produto de melhor tecnologia contribuindo desta forma para melhorar a eficiência térmica do elemento de calor. O teste de perda de calor em laboratório mostra ser uma ferramenta importante e viável para avaliação dos rendimentos deste tipo de coletor, podendo também ser utilizada para diagnosticar falhas e contribuir para a solução dos erros cometidos visando aprimorar os futuros protótipos a serem fabricados.

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. José Poluceno Vieira Braga pelo auxílio técnico, sugestões e empréstimo da amostra do elemento de calor. À agência de fomento FAPEMIG pela concessão de um bolsa de mestrado que viabilizou a realização deste trabalho e ao CEFET-MG pelo apoio financeiro usado na aquisição de instrumentos, material de consumo e pagamento de serviços de terceiros.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE.,1991. Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. ANSI / ASHRAE STANDARD 93 -1986 (RA 91).
- Burkholder, F. e C. Kutscher., 2008. Heat-Loss Testing of Solel's UVAC3 Parabolic Trough receiver. January.
- _____, 2009. Heat Loss testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver. May
- Duffie, J. A. e W. A. Beckman., 2006. Solar engineering of thermal processes. New Jersey.
- Forrinstall, R., 2003. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. NREL - National Renewable Energy Laboratory. Colorado: 10/2003, p.164.
- Kalogirou, S. A., 2009. Solar energy engineering: processes and systems: Elsevier.
- Price, H., R. Forrinstall, et al., 2006. Field Survey of Parabolic Trough Receiver Thermal Performance. ASME International Solar Energy Conference. Colorado, USA. ISEC 2006: 8 p.
- Watlow., 2009 .
- Wikipedia., 2010. List of solar thermal power stations.

HEAT LOSS TESTING OF HEAT COLLECTION ELEMENTS'S PARABOLIC TROUGH RECEIVER

Abstract. *This work presents a methodology to evaluate in laboratory (without the presence of solar radiation) the heat losses of the heat elements, which are utilized as the element for absorption of the solar radiation in the collectors of the type "cylindrical parabolic". The heat losses can be used to calculate indirectly the thermal efficiency of the solar collectors, being this a more viable manner for evaluation of concentrating collectors due to the particularities and demands of these types of collectors. A sample of the heat element utilized in the concentrating cylindrical parabolic collectors installed at CEFET-MG was evaluated experimentally for determination of the thermal losses considering different temperatures of the heat element surface. Further, the measured heat losses values were input in a simplified calculation for a preliminary evaluation of the thermal efficiency of the concentrating collectors installed in CEFET-*

MG. The heat losses values obtained in the CEFET-MG laboratory were then compared against heat loss values obtained in the NREL laboratory (United States) for tests performed with in a heat element used in the solar system named Solar Energy Generating System (SEGS), located in United States. The heat losses obtained for the heat element tested in the CEFET-MG laboratory showed higher values than those obtained for the heat element tested by NREL, which implies that there is lose of thermal efficiency for the CEFET-MG collectors when compared to the values calculated for the collectors, whose heat elements were tested by NREL.

Key words: *Concentrating cylindrical parabolic collector, thermal losses, thermal efficiency.*