

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COLETORES CONCENTRADORES CILINDRO PARABÓLICOS DA INSTALAÇÃO SOLAR DO CEFET-MG/CEMIG-MG

Eliézer Basílio Borges – bborgeseli@yahoo.com.br

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

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Programa Mestrado em Engenharia da Energia - Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho apresenta a metodologia utilizada e os resultados obtidos de dois testes experimentais realizados nos coletores solares de uma das linhas da instalação solar de 30 kW do CEFET-MG/CEMIG, constituída por concentradores do tipo cilindro parabólico. Os testes foram realizados sete anos após o início da operação da instalação servindo, não apenas para investigação científica, mas também para verificação da eficiência da instalação. Para atender os critérios estabelecidos pelas normas ANSI/ASHRAE 93-2010 e EUROPEAN STANDARD EN 12975-1:2006 foi necessário realizar intervenção na instalação existente, com inserção de novos equipamentos e instrumentos. Desta forma a instalação serviu como uma bancada de testes compatível para realização de testes em condições controladas. Os métodos e procedimentos das Normas também tiveram que ser adaptados devido às particularidades da instalação e dos coletores concentradores visando determinar a constante de tempo e a curva de eficiência térmica do coletor. Uma plataforma foi construída e instalada no ponto mais alto do campo solar onde foram colocados radiômetros que possibilitaram medições das radiações solares global no plano horizontal, direta normal e difusa no plano horizontal. Outro suporte montado no plano de abertura de um dos coletores serviu para instalação de outro radiômetro para medição da radiação solar global incidente no plano de abertura do coletor. As medições apresentaram um valor da constante de tempo inferior a um minuto e um valor médio da eficiência térmica de 30%. Os baixos valores da eficiência ótica podem ser atribuídos à degradação das superfícies refletoras e absorvedor.

Palavras-chave: Coletor Solar, Concentrador Cilindro Parabólico, Teste de Eficiência Térmica, Constante de Tempo.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia solar para aplicação em processos térmicos nas faixas de médias e altas temperaturas, e para geração de potencia mecânica e elétrica requer a utilização de coletores concentradores de diferentes tecnologias que possibilitam a operação em faixas de temperatura diferenciadas. Os sistemas de concentração solar para geração de potencia elétrica são denominados CSP (Concentrating Solar Power) e utilizam diferentes tecnologias de captação, conforme ilustra a Fig. 1. Dentre as tecnologias mais importantes estão os coletores do tipo cilindro parabólico (Parabolic Through), os espelhos heliostatos com torre central denominado sistema de torre central (Tower), os espelhos lineares de Fresnel (Linear Fresnel) e coletor prato (paraboloide) com motor operando no ciclo Stirling (Dish Stirling).

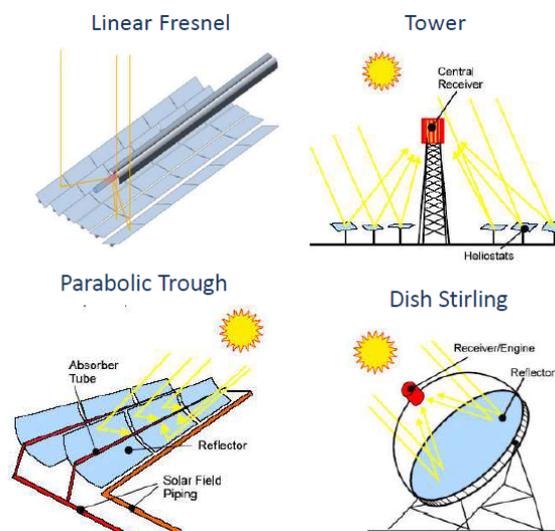


Figura 1- Tecnologias CSP e tipos de coletores concentradores.

Os sistemas formados por coletores do tipo cilindro parabólicos e linear de Fresnel são indicados para temperaturas de até 400°C. A tecnologia do coletor cilindro parabólico é comprovada e utilizada em varias usinas comerciais instaladas em diferentes partes do mundo (Duffie e Beckman, 2006). O conceito denominado “torre central” consiste no segundo sistema mais utilizado nas plantas comerciais instaladas. Este sistema apresenta como vantagem principal o fato da operação do ciclo termodinâmico ser em altas temperaturas devido às altas concentrações, o que possibilita aumento da eficiência do ciclo termodinâmico. O sistema de “torre central” é constituído por vários espelhos (i.e., heliostatos) espalhados em volta de uma torre onde está localizado no seu ponto mais alto o foco da paraboloide. Um sistema de concentração mais novo, promissor e ainda pouco utilizada nas plantas comerciais é o sistema formado por espelhos lineares de Fresnel cuja tendência é de se tornar competitivo com a tecnologia do coletor cilindro parabólico. O sistema de Fresnel consiste de espelhos planos de pequena curvatura que são instalados num plano horizontal, apresentando algumas vantagens em relação ao coletor cilindro parabólico, por requererem menor espaço de solo para produzir a mesma potencia elétrica, estruturas mais simples para suporte dos espelhos, manutenção mais simples além de custos inferiores. A principal desvantagem dos coletores do tipo Fresnel é a sua menor eficiência ótica quando comparada aquela do coletor cilindro parabólico.

Recentemente o governo Brasileiro tem acenado no sentido de motivar e promover a inserção na matriz energética nacional das tecnologias CSP (Concentrating Solar Power) e uma primeira Usina Solar do tipo está sendo construída na região nordeste do país (Vieira et al, 20122). A diversidade quanto à utilização de diferentes fontes energéticas e tecnologias para geração de eletricidade se constitui num fator importante para definição de políticas seguras de expansão energética dos países (Domingos, 2010).

A instalação solar do CEFET-MG/CEMIG, descrita por Poluceno (2010), é fruto de dois projetos P&D tendo a sua construção concluída em 20026. O sistema apresenta um campo solar construído com potencia térmica aproximada de 30 kWt, sendo formado por três linhas de coletores do tipo cilindro parabólico com concentração de 77X de cerca de 20m de comprimento cada. A partir de 2008 a instalação solar foi modificada e adequada de forma a possibilitar a realização de pesquisas e testes em condições controladas.

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada e resultados dos testes para avaliação da constante de tempo e do desempenho térmico dos coletores concentradores de uma das linhas, sendo realizada uma intervenção na instalação com instalação de novos equipamentos e instrumentos.

2. INSTALAÇÃO SOLAR

Para realização dos testes em condições controladas, conforme estabelece as normas (ANSI/ASHRAE 93-2010) e (EUROPEAN STANDARD EN 12975-1:2006) foi necessário realizar uma intervenção na instalação existente. Os equipamentos e instrumentos novos instalados são descritos a seguir.

Aquecedor elétrico: Equipamento instalado a montante dos coletores, sendo utilizado para aumentar e manter fixa a temperatura do óleo térmico na entrada dos coletores, sendo capaz de reproduzir temperatura de 40°C a 230°C. O equipamento, conforme mostrado na Figura 2, é cilíndrico possuindo diâmetro externo de 0,4 m e comprimento igual a 1,200 m. O aquecedor possui três resistências elétricas de 10 kW instaladas internamente, sensor de temperatura PT-100 de três fios para medir a temperatura de saída do fluido térmico, termômetro analógico bimetálico para medição da temperatura do fluido no tanque, válvulas de dreno e suspiro alem de válvulas de entrada e saída.

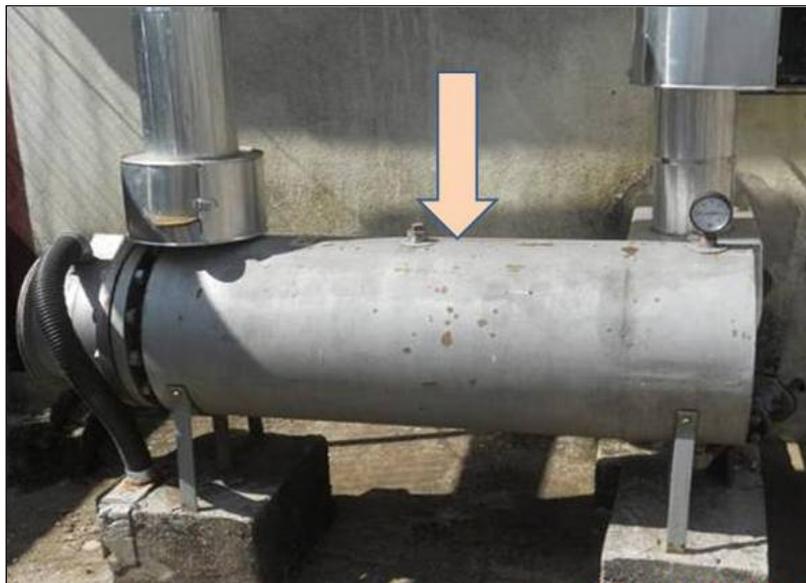


Figura 2 – Aquecedor elétrico.

Controlador de temperatura: O equipamento mostrado na Fig. 3 é instalado dentro num quadro elétrico (3a) consistindo de três módulos controladores de potencia tirestorizados mostrados na parte superior da (3b), sendo um controlador para cada resistência elétrica. O controle permite que a potência elétrica de cada resistência elétrica varie automaticamente em resposta a variação da temperatura do óleo na saída do aquecedor. Um sinal elétrico de 0 a 10 V permite variação da potencia elétrica de 0 a 10 kW. O sinal da temperatura é realizado pelo controlador indicador de temperatura da marca Eurotron, modelo 2408, mostrado na Fig. 3c, sendo a temperatura medida com um Pt-100 de três fios. O equipamento tem varias funções e a temperatura é ajustada através da função “set point” do mesmo.



(3a)



(3b)



(3c)

Figura 3 – Controlador de temperatura.

Trocador de calor: Este equipamento está instalado a jusante do coletor solar sendo responsável pela rejeição do calor útil ganho pelo óleo térmico ao escoar através do elemento de calor (i.e., tubo absorvedor) do coletor solar. O óleo térmico circula através da serpentina do trocador de calor sendo resfriado pela água que circula do lado externo da mesma (Fig. 4a). Uma intervenção foi realizada no sentido de permitir o escoamento da água, visto que inicialmente o equipamento tinha sido projetado para trabalhar com a água estática evaporando a 100°C.



(4a)



(4b)

Figura 4 – Trocador de calor.

Plataforma dos radiômetros: Uma estrutura de 6m^2 de área de piso foi montada numa altura de 6 m em relação ao nível do chão (Fig. 5a). Uma pequena plataforma foi montada 1,5m acima da plataforma base, onde foi colocada a estação de medição de radiação solar, composta por um rastreador Solys da Kipp Zonen e dois piranômetros para medição da radiação global no plano horizontal, radiação difusa no plano horizontal e um pireliômetro para medição da radiação direta no plano normal. Os dois piranômetros (Fig. 5 C) são o modelo CMP 21 da Kipp &Zonen, com incerteza de medição de 1% e 2%, em quanto que, o pireliômetro é o modelo CH1 da Kipp &Zonen.



(5a)



(5b)



(5c)



(5d)

Figura 5- Plataforma e instrumentos de medição solar.

Radiômetro da radiação no plano do coletor: Um piranômetro modelo CMP 22 da Kipp &Zonen foi instalado, conforme mostra a Fig. 6, num pequeno suporte soldado no plano de abertura dos coletores da linha dois para medição da radiação solar global incidente no plano de abertura do coletor.



Figura 6 – Piranômetro instalado na linha dois no plano de abertura do coletor.

Sensores de temperatura: Vários sensores de temperatura do tipo Pt-100 (Fig. 7a) de quatro fios foram instalados em diferentes locais da instalação. Os sensores de temperatura utilizados durante os testes foram aqueles localizados na entrada e saída do coletor da linha dois, entrada e saída do trocador de calor. Um novo sistema de aquisição de dados modelo 34980A da Agilent, mostrado na Fig. 7b foi utilizado, sendo composto de multiplexador, placa analógica bloco terminal. Outro sensor do tipo “T” foi responsável pela leitura da temperatura do ar ambiente sendo instalado dentro do abrigo mostrado na Fig. (7c). Todos os sensores foram calibrados em laboratório credenciado e as incertezas de medição em toda a faixa de teste ficaram em torno de 0,15°C.



Figura 7a – Termoresistência.



Figura 7b - Sistema de Aquisição.



Figura 7c – Abrigo do termopar “T”.

Circuito de teste: O fluxograma apresentado na Fig. 8 mostra os novos equipamentos, instrumentos e sensores após a ter sido realizada a intervenção para realização dos testes experimentais.

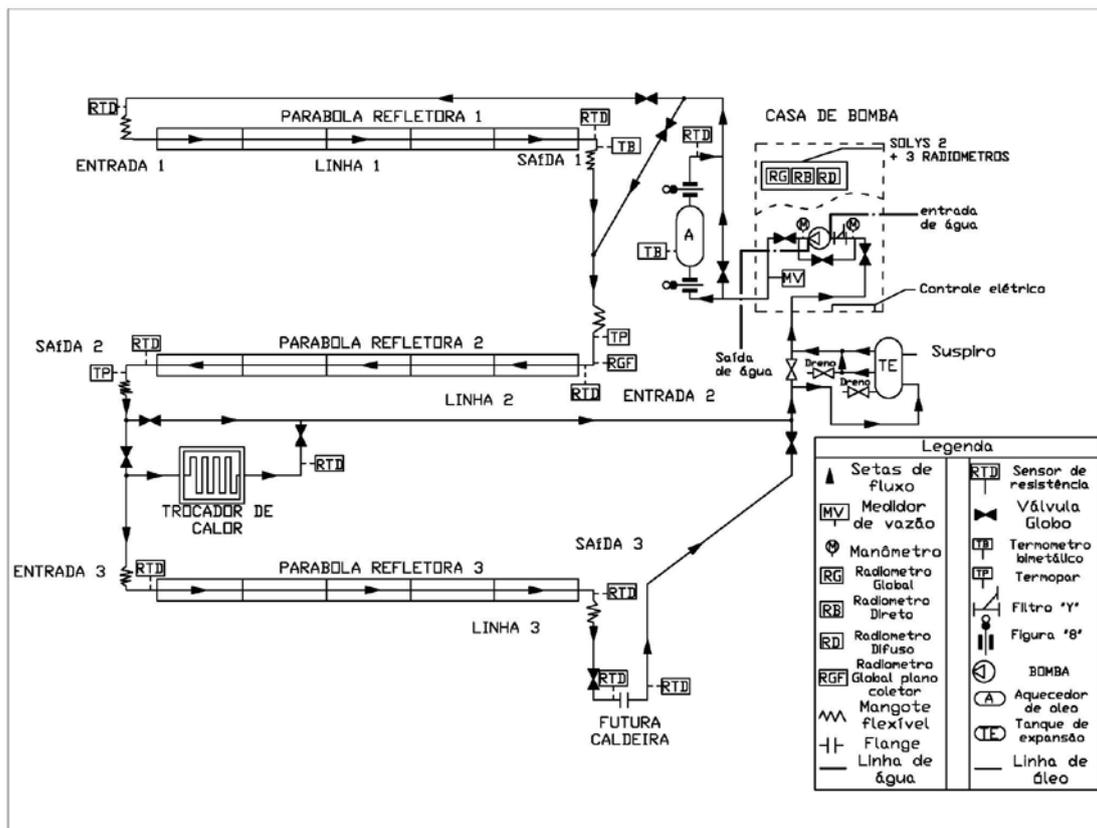


Figura 8. Fluxograma mostrando a instalação solar com os novos equipamentos e instrumentos após a intervenção.

3. TESTES EXPERIMENTAIS

As normas internacionais para testes de coletores (Europeia 12975, Partes 1 e 2 de 2006) e a norma Americana (ASHRAE 93 de 2010) e a norma Brasileira (ABNT NBR 15747- Partes 1 e 2, de 2009) apresentam no seu escopo procedimentos para testes externos de coletores solares e mencionam que esses testes devem ser aplicados também para

coletores concentradores, entretanto, se observa que essas três normas apresentam limitações quanto aos testes para coletores concentradores, sendo mais focadas para testes em coletores não concentradores, do tipo plano. Desta forma algumas adaptações e improvisações se tornam necessárias no sentido de aplicar os testes. Por exemplo, faixas de velocidades do vento são difíceis de aplicar e baixas temperaturas do fluido na entrada no coletor. Outro teste mencionado pela norma Europeia é o “método quase dinâmico” no qual se permite a variação temporal de quase todas as variáveis, exceto a temperatura do fluido na entrada do coletor e a vazão mássica através do mesmo. No caso deste trabalho procurou-se seguir o mais próximo possível a metodologia estabelecida pela Norma Americana, para realização dos testes de constante de tempo e eficiência térmica que utilizou o procedimento do regime permanente.

1.1 Teste da constante de tempo

A constante de tempo é uma variável relacionada à capacitância térmica de um objeto massivo, que no caso específico deste trabalho é o coletor solar. Essa variável diz respeito ao efeito da massa em acumular ou desacumular energia quando ocorre variação temporal das condições climáticas, (e.g., irradiação e temperatura de entrada do fluido operante). Portanto, a constante de tempo tenta determinar quão rapidamente um coletor solar responde a uma mudança de irradiação, ou seja, quão rapidamente este coletor é capaz de aquecer ou de resfriar quando ocorre, por exemplo, a passagem de uma nuvem na trajetória entre o sol e o coletor.

O procedimento utilizado foi aquele estabelecido pela norma internacional (ASHRAE, 2010), que define a constante de tempo como o tempo requerido para que a diferença de temperatura do fluido de trabalho através do coletor alcance 63,2% da diferença de temperatura máxima estabilizada deste mesmo fluido em regime permanente, após o coletor ser submetido a uma variação brusca da irradiação, indo do tempo zero até um determinado valor maior que 800 W/m^2 . O tempo decorrido para que essa variação da temperatura ocorra, pode ser determinada pela Eq. (1), e se constitui na constante de tempo do coletor.

$$(T_{f,e,T} - T_{f,i}) = 0,632(T_{f,e,ss} - T_{f,i}) \therefore T_{f,e,T} = T_{f,i} + 0,632(T_{f,e,ss} - T_{f,i}) \quad (1)$$

Onde:

$T_{f,e,T}$: a temperatura do fluido de trabalho na saída do coletor, calculado pela Eq. (1), correspondente ao tempo denominado “constante de tempo”, (°C);

$T_{f,i}$: a temperatura do fluido de trabalho na entrada do coletor, sendo esta mantida fixa durante o teste, (°C);

$T_{f,e,ss}$: a temperatura do fluido de trabalho na saída do coletor quando o mesmo entrar em regime permanente, (°C).

Os seguintes procedimentos foram realizados para realização do teste: (a) O teste foi realizado em torno do meio dia solar, com céu claro, de forma que a radiação solar direta apresentasse valores superiores a 800 W/m^2 e permanesse estável durante todo o teste; (b) A linha dois foi movimentada através do painel de controle, por comando manual, de forma que inicialmente a radiação direta não incidisse sobre a linha focal (elemento de calor); (c) A bomba de circulação de óleo térmico foi ligada; (d) A vazão volumétrica do fluido de trabalho (óleo térmico) foi regulada para um valor próximo a $5,7 \text{ m}^3/\text{h}$, (valor igual a $0,02 \text{ kg/s.m}^2$) observando-se o valor da vazão instantânea no módulo eletrônico de aquisição de vazão e corrigindo a mesma através da abertura ou fechamento da válvula de controle instalada à jusante da bomba; (e) A linha dois foi então movimentada lentamente entrando-se manualmente com um valor de rotação pré-estabelecido para motor elétrico do redutor através do conversor de frequência do mesmo. Isso possibilitou verificar se a radiação direta estava incidindo sobre a linha focal (elemento de calor) e caso necessário era feita correção da rotação; (f) A constatação da incidência da radiação sobre a linha focal foi realizada de forma visual verificando se a superfície externa do tubo absorvedor do elemento de calor permanecia iluminada durante todo o período de teste; (g) A temperatura do fluido de trabalho na entrada da linha dois foi mantida o mais próximo possível da temperatura do ar ambiente durante todo o período de teste; (i) As temperaturas na entrada e saída da linha dois, a vazão volumétrica, a temperatura ambiente e as irradiações foram registradas pelo sistema de aquisição de dados. Concomitantemente essas variáveis foram supervisionadas e analisadas em tempo real através do gráfico gerado na tela do monitor do computador; (j) Após a temperatura do fluido térmico na saída da linha dois ter se estabilizado esperou-se por mais um período de tempo e então se encerrou o teste.

1.2 Teste da eficiência térmica

A eficiência térmica instantânea de um coletor solar, conforme definido pela norma (ASHRAE, 2010), é definido como sendo a quantidade de energia removida pelo fluido de transferência de calor por unidade de área bruta do coletor durante um período de tempo especificado dividido pela radiação global total incidente no plano de abertura do coletor por unidade de área durante o mesmo período de teste em condições de regime permanente ou quase permanente.

Os seguintes procedimentos foram realizados para realização do teste: (a) A vazão mássica do fluido de trabalho (i.e., óleo térmico) foi praticamente a mesma daquela usada para determinar a constante de tempo do coletor; (b) A irradiação térmica infravermelha na faixa espectral de $3,5 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$ não foi medida pela falta de um radiômetro do tipo pirgeômetro, entretanto, como todos os testes foram realizados com céu claro e com os coletores posicionados praticamente com ângulo de inclinação igual a 0° , a área da abertura dos coletores esteve sempre voltada para o céu o que minimizou em muito a absorção da radiação infravermelha emitida por objetos localizados nas proximidades; (c) Os testes foram realizados no conjunto dos cinco coletores (módulos) da linha dois instalados numa configuração em série. Desta forma se obteve uma maior diferença de temperatura do fluido de trabalho entre a saída e a entrada da linha,

o que possibilitou aumento da precisão da medição. Além disso, a configuração testada possibilitou avaliar uma configuração próxima a real, onde as linhas de coletores são longas e constituídas por vários coletores em serie de forma a reduzir as perdas das extremidades; (d) Para determinação da curva de eficiência térmica dos coletores da linha dois optou-se por utilizar a temperatura de entrada (ASHRAE, 2010) e (Duffie e Beckman, 2006) e não a temperatura média do fluido de trabalho (EN, 2006), (ABNT, 2009); (e) A maioria dos testes foi realizada com valores de irradiação superiores a 800 W/m^2 (ASHRAE, 2010), embora, a norma (EN, 2006) e ABNT (2009) estabeleçam um valor mínimo de 700 W/m^2 ; (f) A maioria dos testes foi realizada em dias claros, sem nuvens, no período de 11h às 13h, observando-se pouca variação da irradiação; (g) Um período de pré-condicionamento dos coletores antecedendo o período de teste foi adotado procurando seguir o mais próximo possível os requisitos estabelecidos pelas normas, ou seja, um período superior a quatro constantes de tempo e não inferior a 15 minutos (caso não seja conhecido a constante de tempo) com a temperatura de entrada mantida constante durante o teste; (h) Os testes foram conduzidos num período superior a quatro constantes de tempo, seguindo a especificação das normas que requerem um período mínimo de duas constantes de tempo ou 10 minutos (caso não se conheça a constante de tempo). Observa-se que a norma Europeia requer um período de quatro constantes de tempo ou de dez minutos, o que for maior. Portanto, o tempo de teste, considerando-se a constante de tempo apenas, estabelecido pela norma Americana é inferior ao da norma Europeia; (i) A temperatura ambiente foi de aproximadamente $30 \text{ }^\circ\text{C}$; (j) A velocidade do ar (i.e., simulando o vento) não foi controlada, embora o ar tenha se mostrado estagnado durante o teste. As normas estabeleçam velocidades na faixa de 2 a 4 m/s, quando possível; (k) Os ângulos de incidência não ficaram próximos de 0° (posição do coletor normal ao sol), pois os testes foram realizados nos meses de Julho e Agosto e nessa época do ano, próximo do médio dia solar, o sol está baixo, ou seja, os ângulos das alturas solares estão em torno de 40° para acidade de Belo Horizonte. Também, os coletores possuem apenas um eixo de rastreamento (Norte - Sul) e estão posicionados num plano horizontal (i.e., paralelo ao chão), não possuindo mecanismo para compensar a variação da altura solar; (l) A radiação solar incidente no plano de abertura dos coletores " $G_{b,p}$ " foi determinada de duas formas: 1ª – Multiplicando-se a radiação direta medida no plano normal com o pircômetro, pelo cosseno do angulo de incidência. Os ângulos de incidência foram calculados para os dias e horários de cada teste utilizando-se uma função disponível na biblioteca SETP (Solar Engineering Thermal Processes) que calcula o ângulo de incidência para coletores concentradores com eixo horizontal "Norte – Sul", 2ª – Através da medição da radiação solar global incidente no plano de abertura do coletor estando o radiômetro instalado no plano de abertura do coletor. Essa radiação inclui a radiação direta e difusa, entretanto, como os testes foram realizados em dias claros os valores da radiação difusa e a sua influencia na radiação total absorvida pode ser assumida desprezível; (m) O cálculo do calor útil, " Q_u ", foi determinado instantaneamente através de balanços instantâneos de energia, considerando como volume de controle o fluido operante no tubo absorvedor do coletor, através da equação $\dot{Q}_u = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,i} - T_a)$, sendo " \dot{m}_f " a vazão instantânea do fluido de trabalho " $T_{f,i}$ " a temperatura de entrada do fluido no coletor, " T_a " a temperatura do ar ambiente e " $c_{p,f}$ " o calor específico do óleo térmico; (n) Os testes foram realizados para valores de $(T_{f,i} - T_a)$ iguais a 17%, 30%, 43% 60% e 90% da diferença máxima de temperatura $(T_{f,i,max} - T_a)$, sendo " $T_{f,i,max}$ " a temperatura máxima do fluido de trabalho na entrada do coletor considerada igual a 250°C (i.e., essa temperatura é próxima da temperatura de estagnação do coletor em teste); (o) A eficiência térmica de cada teste foi calculada dividindo-se a energia útil pela radiação solar direta incidente na área de abertura do coletor dada conforme a equação: $\eta_g = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_u \cdot dt}{A_g \cdot \int_{t_1}^{t_2} G_{b,p} \cdot dt}$; (p) simultaneamente a razão $(T_{f,i} - T_a)/G_{b,p}$ foi calculada para cada valor da eficiência; (q) os intervalos das medições para cada teste foram iguais a 15 segundos.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Após tratamento dos dados obtidos dos vários testes apresenta-se a seguir os resultados na forma gráfica dos dois testes. Observa-se que foram também realizadas análise de incertezas combinadas das variáveis obtidas nos testes.

4.1 Teste da constante de tempo

O resultado do teste da constante de tempo é apresentado na Fig. 9, onde se pode ver a variação temporal das temperaturas de entrada e saída do óleo térmico dos coletores, sendo as medições realizadas em intervalos de tempo de 15 segundos. As radiações direta e global no plano do coletor ficaram constantes durante o período de teste, sendo a radiação direta média normal igual a 9086 W/m^2 . A vazão volumétrica média do óleo térmico foi igual a $6,39 \text{ m}^3/\text{h}$, correspondendo uma vazão mássica específica igual a $0,02 \text{ kg/s.m}^2$. A temperatura do ar ambiente media foi de $25,6^\circ\text{C}$.

O inicio do teste ocorreu às 12h01min59seg, instante que a radiação solar passou a incidir sobre o elemento de calor localizado no foco das parábolas refletoras dos coletores. Nesse instante as temperaturas do óleo térmico na entrada e na saída da linha dois estavam bem próximas, ou seja, indicando valores $33,6 \text{ }^\circ\text{C}$ e $33,75^\circ\text{C}$, respectivamente, correspondendo a uma diferença de temperatura inferior a $0,5^\circ\text{C}$;

Às 12h02min57seg a temperatura de saída do óleo térmico começa a se estabilizar indicando o valor $36,58^\circ\text{C}$. Este instante pode ser interpretado como o instante que o coletor entra no regime quase estático (i.e., quase permanente).

Às 12h02min39seg a temperatura de saída do óleo térmico é igual a 35,63°C. Este valor foi calculado pela Eq. (1) e representa o ponto em que a diferença de temperatura entre saída e entrada do fluido de trabalho alcança 63,2 % da diferença da sua diferença de temperatura máxima.

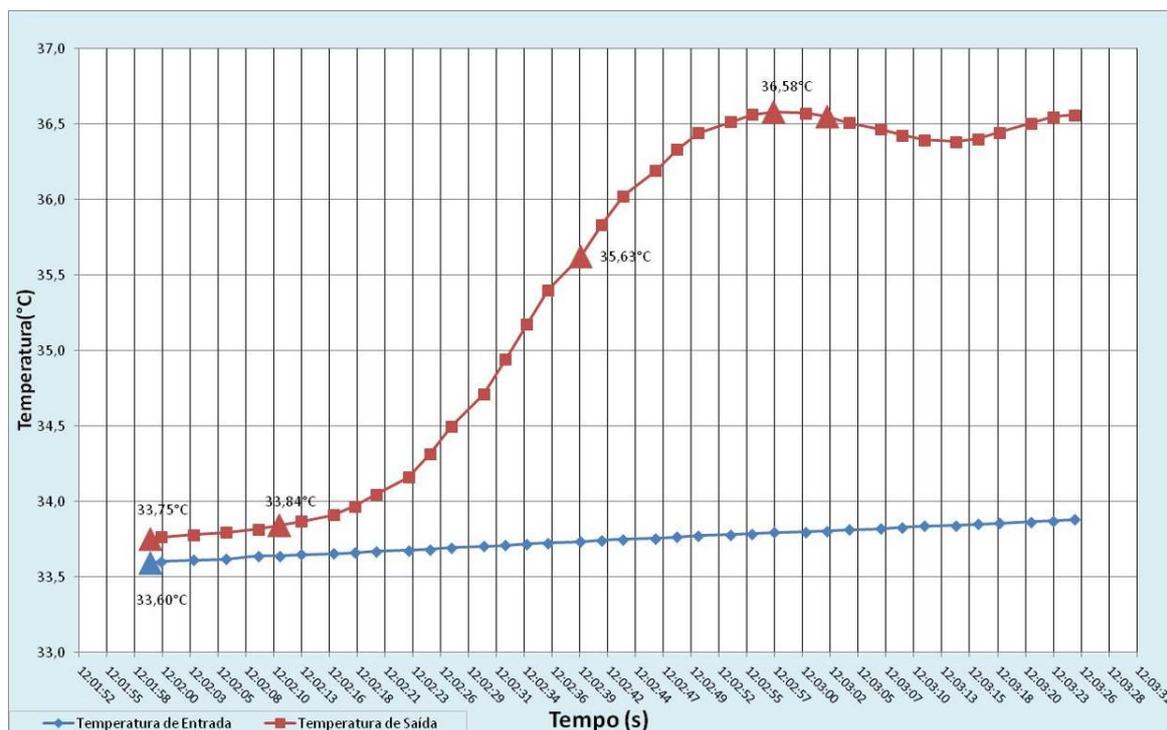


Figura 9 – Variação temporal das temperaturas de entrada e saída do fluido operante (teste da constante de tempo).

O intervalo de tempo desde o início do teste até o instante mencionado e que a temperatura de saída alcança o valor de 35,63°C foi igual a 40 segundos, sendo este valor a constante de tempo dos coletores da linha dois. Observa-se pequena variação da temperatura do óleo na entrada dos coletores, sendo essa variação de aproximadamente 0,1°C.

4.2 Teste da eficiência térmica

Os valores de " $\eta_{f,i}$ " e " $(T_{f,i}-T_a)/G_{b,p}$ ", referentes aos cinco testes realizados são apresentados na Figura 10, considerando as áreas bruta, projetada e líquida dos coletores. A área denominada "**área bruta**" é a área total da linha dois, constituída pelos cinco coletores conectados em serie mais os espaços entre esses coletores, sendo igual a 67,39m².

A área denominada "**área de projeto**" é a área real de abertura dos cinco coletores, ou seja, é a área bruta descontada das áreas referentes aos espaços entre cada coletor e também das áreas marginais, sendo essa igual a 64,50m². Essas áreas marginais correspondem às áreas das bordas dos módulos dos coletores, formadas por chapas e cantoneiras de pequena espessura, que servem para fixar os espelhos na estrutura parabólica do coletor. A área denominada "**área líquida**" é uma área calculada de forma estimada, descontando da área projetada áreas das superfícies refletoras que não contribuíram para a reflexão da radiação solar, pois apresentavam defeitos (e.g, presença de sujeiras difíceis de remoção, pequenos defeitos de amassamentos), sendo seu valor igual a 63,60m².

Analisando a Figura 10, se observa os seguintes pontos importantes: (a) Pode-se assumir com boa precisão que o comportamento da eficiência térmica é linear, conforme previsto por (Duffie e Beckman, 2006); (b) As retas representativas das curvas da eficiência térmica dependem das áreas utilizadas nos cálculos, apresentando valores menores para a área bruta, valores intermediários para a área projetada e valores maiores para a área líquida estimada; (c) Os valores máximos da eficiência variaram de 33 a 38% para a temperatura de entrada do fluido de trabalho igual a 60°C, decrescendo à medida que a temperatura aumentava e alcançando valores mínimos entre 23 e 27% para a temperatura de 230°C; (d) a incerteza máxima da eficiência térmica foi de $\pm 1,8\%$, enquanto, a incerteza da razão " $(T_{f,i}-T_a)/G_{b,T}$ " foi igual a $\pm 0,06$ podendo ser considerada desprezível.

Uma comparação foi realizada considerando as curvas da eficiência térmica dos coletores do CEFET-MG/CEMIG e de um módulo dos coletores da Usina Solar SEGS 2 da Califórnia (Kramer Junction), Estados Unidos, que foi testado no *Sandia Laboratory* dos Estados Unidos (DUDLEY, 1994). A Tabela 1 apresenta características dos dois coletores. Ressalta-se que existem duas definições para a razão de concentração geométrica para os coletores do tipo concentrador linear. A primeira é a concentração geométrica projetada " $C_{g,p}$ " definida como a razão entre a área de abertura do coletor (largura "W" vezes o comprimento "L") e a área externa projetada do tubo absorvedor (Diâmetro " D_{ext} " vezes o comprimento "L"). A segunda é a concentração geométrica real " $C_{g,r}$ " definida como a razão entre a área de abertura do coletor (largura "W" vezes o comprimento "L") e área da superfície externa de transferência de calor do tubo

absorvedor ($\pi \cdot D_{ext} \cdot L$). Observa-se que a concentração geométrica projetada é amplificada por π em relação à concentração geométrica. Os resultados dos testes nos coletores do CEFET-MG/CEMIG e SEGS/Sandia são apresentados na Fig. 11, sendo que a curva da eficiência térmica dos coletores do CEFET-MG é baseada na área bruta.

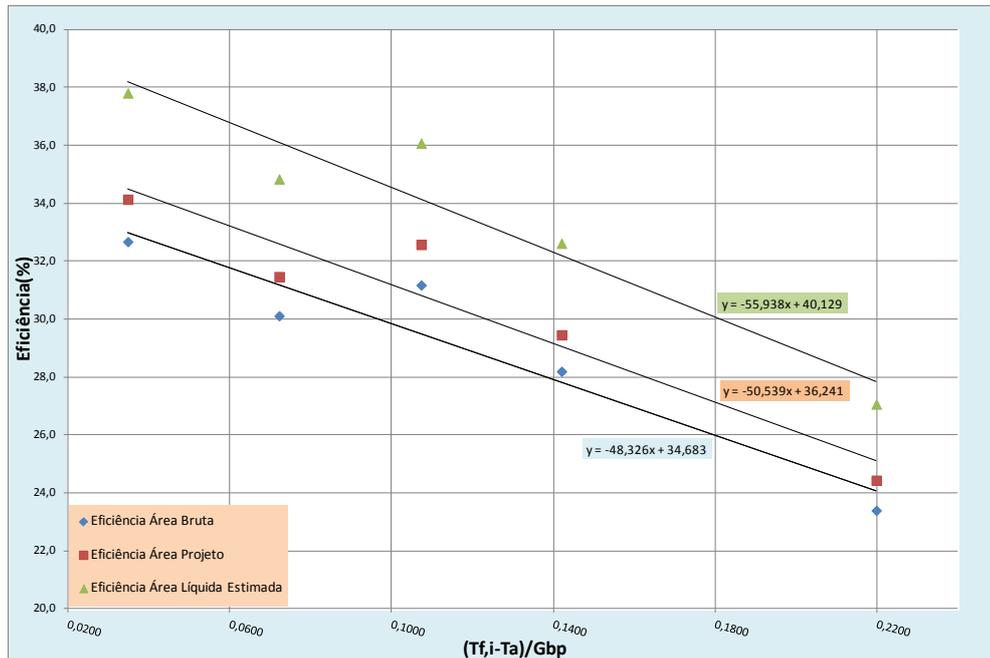


Figura 10 – Eficiência térmica dos coletores do CEFET-MG/CEMIG.

Tabela 1 - Características dos coletores do CEFET-MG/CEMIG e SEGS2/SANDIA LAB.

CARACTERÍSTICAS	SEGS2/SANDIA	CEFET-MG/CEMIG
Tipo de absorvedor	Não Evacuado	Não evacuado
Tipo da superfície do absorvedor	Seletiva	Seletiva
W (Largura da abertura) (m)	5,0	3,44
D_{ext} (Diâmetro Externo absorvedor) (m)	0,07	0,0483
Concentração Geométrica Projetada “ $C_{g,p}$ ” (adm)	71,43	71,22
Concentração Geométrica Real “ $C_{g,r}$ ” (adm)	22,74	22,67

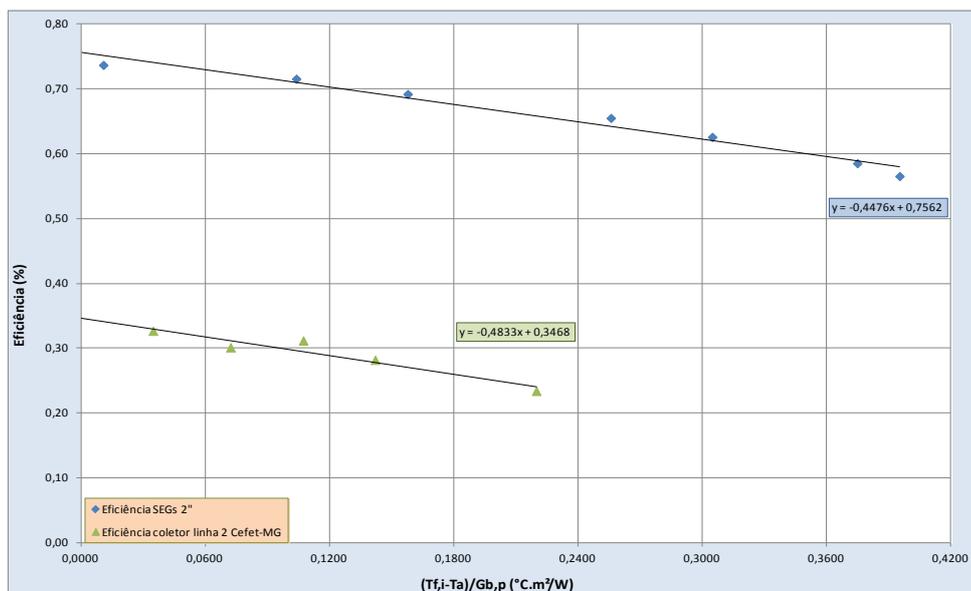


Figura 11- Curvas de eficiência dos coletores concentradores do CEFET-MG/CEMIG e SEGS/Sandia Lab.

Da análise da Fig. 11 observa-se que: (a) O comportamento da eficiência térmica dos dois coletores pode ser representado por retas; (b) As inclinações “ $U_L \cdot F_R / C_{g,r}$ ” dos dois coletores, são praticamente idênticas, com valores de $0,4476 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ e $0,4833 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, respectivamente, para os coletores do SEGS 2 e CEFET-MG. A explicação dessa similaridade deve-se ao fato dos dois coletores serem semelhantes geometricamente tendo praticamente a mesma razão de concentração geométrica. Adicionalmente os “elementos de calor” dos dois coletores são similares do tipo

“não evacuado” e possuem superfície seletiva. A pequena diferença é devido às absorptividades e emissividades das tintas seletivas dos dois tubos absorvedores. O fator de remoção de calor “ F_R ” não foi calculado, entretanto, se admitirmos o valor próximo da unidade, concluiremos que os coeficientes globais de transferência de calor “ U_L ” devem ter valores próximos aos valores de “ $U_L.F_R$ ”; (d) O rendimento térmico no ponto “ $(T_{f,i} - T_a)/G_{bp} = 0$ ” representa o do produto do rendimento ótico pelo fator de remoção de calor “ F_R ”. Portanto, admitindo “ F_R ” unitário essa variável se torna igual ao rendimento ótico, sendo os valores extrapolados iguais a 76% e 34%, para os coletores do SEGS 2 e CEFET-MG, respectivamente. Portanto, constata-se que existe uma diferença de 40% entre as eficiências óticas dos dois coletores. Essa diferença ser atribuída à baixa refletividade das superfícies refletoras devido à degradação com o tempo, já que o sistema foi instalado sete anos atrás. Outras perdas óticas foram abaulamentos em certos locais das superfícies refletoras e redução da transmissividade do tubo de vidro do “elemento de calor”.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou metodologias e resultados dos testes da constante de tempo e eficiência térmica dos coletores concentradores do tipo cilindro parabólicos instalados no Campus do CEFET-MG. Para realização deste trabalho foi necessário primeiramente realizar uma intervenção na instalação existente modificando a mesma e instalando novos equipamentos e instrumentos para tornar possível a realização de testes em condições controladas, conforme estabelecem as normas internacionais e a norma nacional. O teste da constante de tempo apresentou um valor da constante de tempo inferior a um minuto, demonstrando que o coletor responde rapidamente as mudanças climáticas, principalmente as flutuações da radiação. Este resultado revela que o coletor tem potencial para ser instalado também em locais com alguma nebulosidade. O teste de eficiência térmica mostrou valores médios de 30%. Também, foi realizada uma comparação do coletor do CEFET-MG com um coletor similar da SEGS testado no Sandia Lab, sendo que o coletor do CEFET-MG/CEMIG apresentou eficiências menores cerca de 40% devido à perda de eficiência ótica.

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. José Poluceno Vieira Braga pela colaboração durante a realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ashrae Standard Ansi/Ashrae 93-2010. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. ISSN 1041-2356. American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta, 2010. 46p.
- Ashrae Standard Ansi/Ashrae 96-1986 (RA 89). Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Unglazed Flat-Plate Liquid-Type Solar collectors. ISSN 1041-2336. American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta, 1989. 31 p.
- European Standard EN 12975-2:2006- Thermal solar systems and components — Solar collectors — Part 2: Test methods - European Committee For Standardization. 2010.
- Domingos, Samira F., Neto, José H. M. Teste da perda de calor em um elemento de calor de um concentrador cilíndrico parabólico. III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Centro Fed. de Educ. Tec. de MG – Belo Horizonte, 2010.
- Domingos, Samira F. Avaliação térmica experimental do elemento calor dos concentradores cilindro parabólicos da instalação solar do CEFET/MG. Dissertação de mestrado. Centro Federal de educação Tecnológica de MG – Belo Horizonte, 2010. 154p.
- Dudley, Vernon E., et al. SEGS LS-2 solar collector, test results. Sandia National Laboratories. US, 1994, 140p.
- Duffie, J. Beckman W. Solar Engineering of Thermal Processes. 3ª Edition. John Wiley & Sons Inc. New York, 2006. 928 p.
- Kalogirou, Soteris. Solar energy engineering: process and systems. 1 st edition. British Library Cataloguing – in – Publication Data. 2009. 756p.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CONCENTRATOR COLLECTORS CYLINDER PARABOLIC OF THE SOLAR INSTALATION OF CEFET-MG/CEMIG-MG

Abstract. *This work presents the methodology and results obtained from two experimental tests performed in the solar collectors of the 30 kWt plant of CEFET-MG/CEMIG, constituted by parabolic through collector. The tests were conducted seven years after the initialization of the plant operation and served for scientific investigation and evaluation of the installation. In order to attend the requirements of the International Standards it was necessary to perform an intervention in the existent plant, inserting new equipment and instruments. The modified installation served like a test ring to perform tests in controlled conditions. A platform was constructed and installed in the solar field where radiometers were mounted to measure global, diffuse and normal beam radiation. Another radiometer was mounted in the plane of the collectors to measure global radiation in the tilted plane. The measurements showed time constant value lower than one minute and an average thermal efficiency value of 30%. The low value of the optical efficiency is due to the degradation of the reflective parabolic surfaces and loss of transmittance of the glass tube.*

Key words: *Solar Collector, Concentrator Cylinder Parabolic, Test of Thermal Efficiency, Time Constant.*