

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ECONÔMICA DE "CALHAS PARABÓLICAS" COM ABSORVEDOR "NÃO EVACUADO" PARA GERAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA E PRODUÇÃO DE CALOR

José Henrique Martins Neto – henrique@des.cefetmg.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG
Departamento de Engenharia Mecânica - Programa de Mestrado em Engenharia da Energia

Resumo. Este trabalho apresenta resultados de uma investigação experimental e uma análise econômica simplificada referente à utilização de módulos concentradores do tipo "calha parabólica" com tubo absorvedor "evacuado" e "não-evacuado" para atender duas aplicações distintas, ou seja, a geração de potência elétrica e a geração de calor para uso em processos de média temperatura até 250 °C. Duas metodologias experimentais foram desenvolvidas e utilizadas para avaliar os coeficientes globais de transferência de calor " U_L " de um absorvedor do tipo "não-evacuado" utilizado nas calhas parabólicas da plataforma solar de teste do CEFET-MG/CEMIG. A primeira metodologia foi usada para teste em laboratório de uma amostra do tubo absorvedor "não-evacuado" da plataforma solar, enquanto, a segunda foi utilizada para determinar em campo a curva de eficiência térmica além de caracterizar uma linha de "calhas parabólicas" de 20 m de comprimento e concentração geométrica de 77 X. Os valores médios de " U_L " obtidos nos testes realizados em laboratório e em campo foram iguais a 6 W.m⁻².K⁻¹ e 11 W.m⁻².K⁻¹, respectivamente. Os valores de " U_L " foram comparados com valores de testes realizados em laboratório e planta solar localizada no exterior verificando-se boa concordância entre os valores. Uma comparação com dados de um absorvedor evacuado também foi realizada. Adicionalmente, uma análise econômica foi realizada para verificar a diferença relativa de investimento requerida para implantação de duas plantas solares, sendo uma para produção de eletricidade e outra para geração de calor de processo utilizando absorvedor "não-evacuado". O resultado mostrou que plantas solares com absorvedor do tipo "não-evacuado" não são atrativas para geração de eletricidade, sendo atrativas apenas para geração de calor de processo desde que a temperatura máxima do fluido de trabalho no campo solar não exceda 200 °C.

Palavras-chave: Calha Parabólica, absorvedor não evacuado, CSP

1. INTRODUÇÃO

Grande parte do consumo mundial de eletricidade é proveniente da queima de combustíveis fósseis, enquanto, no Brasil a geração de energia elétrica se baseia em duas fontes principais (i.e., a hidroeletricidade com 75.9% e a geração termoeletrica com 19.3%). As outras fontes complementares são a energia nuclear, eólica e biomassa, que contribuem com 2.9%, 0.9% e 0.1%, respectivamente, sendo a contribuição da energia solar quase insignificante. Adicionalmente, plantas termoeletricas que utilizam combustíveis fósseis representam 64% da energia gerada, enquanto, a biomassa do bagaço de cana do setor sucroalcooleiro representa 31% (Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2014).

Embora a matriz de geração elétrica do país possa ser considerada limpa, nos últimos anos a geração hidroelétrica tem sido afetada pela redução dos níveis dos reservatórios causado pelo declínio dos índices pluviométricos demandando uma maior participação das usinas termelétricas que emitem poluentes e causam aumento do efeito estufa. Além disso, a geração termoeletrica é mais cara que a hidroelétrica demandando das autoridades governamentais repasse dos custos adicionais para a sociedade contribuindo para o aumento da inflação. Outro fator é a forte dependência do país numa única fonte de geração de eletricidade que pode consistir num alto risco e expor o país a desequilíbrios na geração elétrica durante períodos de instabilidades climáticas e mesmo crises mundiais.

O país por meio de sua agencia regulatória de energia elétrica (ANEEL) tem divulgado nos últimos anos leilões para geração e comercialização de energia elétrica utilizando fontes renováveis, tais como, a biomassa, eólica, PCH (i.e, Pequenas Centrais Hidroelétricas), e mais recentemente a solar fotovoltaica. A geração heliotérmica, também conhecida como CSP, (i.e., Concentrating Solar Power) ainda não foi contemplada existindo apenas alguns projetos referentes à instalação de plantas pilotos como a plataforma de demonstração e de pesquisa instalada no Campus do CEFET-MG, que é constituída por três linhas de calhas parabólicas de 20 de comprimento cada, com concentração geométrica igual à 71 X tendo uma capacidade nominal térmica de 50 kW (Braga, 2010). Um planta piloto em fase de contratação com potencia elétrica nominal de 1 MW, será construída na cidade de Petrolina, utilizando o conceito de "calhas parabólicas" (Vieira et al., 2014). Um projeto referente à construção de uma planta heliotérmica de 3 MW para geração de calor de processo e eletricidade, utilizando o conceito "torre central", será construída no Vale do Açu, estado do Rio Grande do Norte. Por ultimo está prevista a construção no Campus da USP, na cidade de Pirassununga no estado de São Paulo, uma planta para pesquisas, consistindo de duas torres centrais, de 100 kW cada, para geração de eletricidade e calor para atividades agroindustriais (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2015).

A geração heliotérmica consiste basicamente na conversão da energia solar em energia térmica e posterior conversão em energia elétrica por meio de um ciclo termodinâmico utilizando concentradores de diferentes conceitos (e.g, calhas parabólicas, espelhos lineares de Fresnel, torre central, pratos paraboloídes), conforme mostrado na Fig. 1.

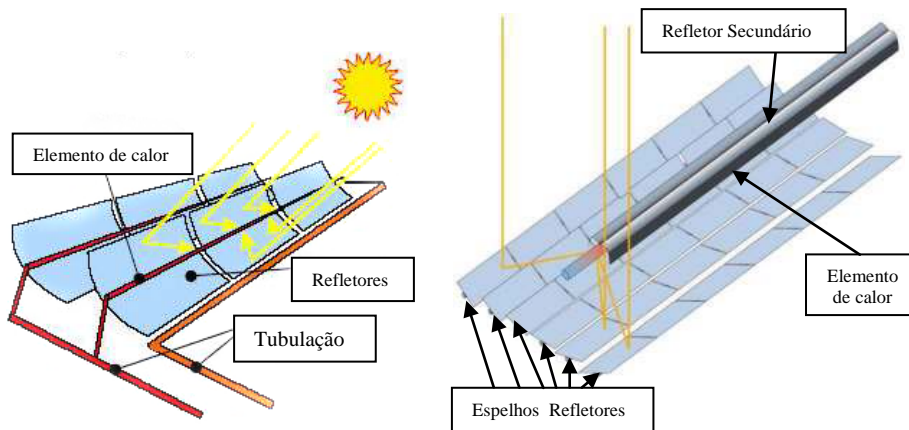


Figura 1(a) - Calha Parabólica.

Figura 1 (b) - Refletor Linear de Fresnel.

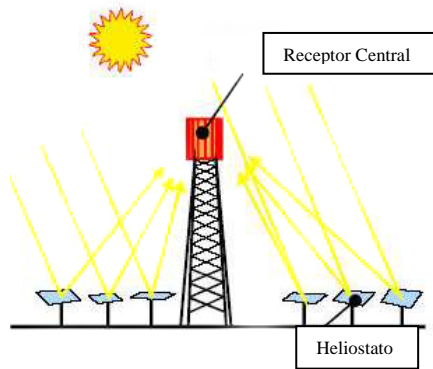


Figura 1(c) - Torre Central.

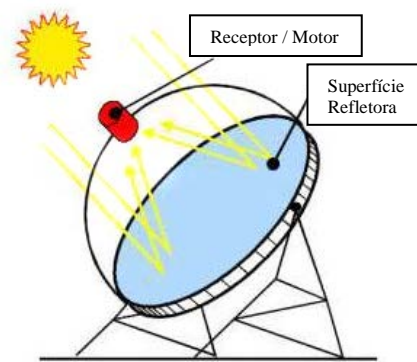


Figura 1 (d) - Prato paraboloide.

A importância da utilização da geração heliotérmica no país é justificada pelo fato de todo território nacional estar localizado no denominado "*cinturão solar*", ou seja, na região tropical, com latitudes variando de 0° a -30° , onde os níveis de radiação solar direta normal anual variam de 1,6 a 2,4 MWh/m².ano (SWERA, 2015), níveis bem superiores aos encontrados em outros países, onde a tecnologia já é utilizada durante vários anos. Outras vantagens do conceito heliotérmico são os seguintes: (i) oportunidade e facilidade de armazenamento local da energia térmica para conversão em energia elétrica durante períodos de instabilidade de radiação solar e noturno o que aumenta a despachabilidade deste tipo de usina solar (ONSE, 2013); (ii) oportunidade para funcionamento de forma híbrida complementando a energia elétrica gerada por plantas termoeletricas que utilizam combustíveis fósseis ou biomassa; (iii) fácil adaptabilidade da tecnologia, pois grande parte dos materiais utilizados são abundantes no país, além das indústrias serem capazes de fabricar os componentes e realizar serviços de engenharia.

A adaptação da tecnologia solar de media e alta temperaturas para geração de potencia elétrica (CSP) e calor para processos industriais deve ser acompanhada primeiramente pelo entendimento dos componentes primários por meio de realizações de pesquisas visando a formação de uma base tecnológica sustentável para desenvolvimento de novos componentes e criação de inovação tecnológica.

Os coletores concentradores de foco linear (i.e, calha parabólica e refletor linear de Fresnel) são utilizados para geração de potencia e calor de processo, sendo a calha parabólica já largamente utilizado em plantas comerciais em varias partes do mundo. Os dois elementos primários, das calhas parabólicas são a superfície refletora e o tubo receptor absorvedor denominado "Elemento de calor" localizado na linha focal. As superfícies refletoras são fabricadas de vidro com revestimento de prata, filmes plásticos espelhados, ou chapas de alumínio anodizado. O "Elemento de Calor" é constituído por dois tubos concêntricos sendo o tubo externo denominado "tubo receptor" e o interno "tubo absorvedor". O "tubo receptor" é um tubo de vidro de alta transmissividade na faixa de comprimento de onda visível e baixa transmissividade na faixa de comprimento de onda infravermelho sendo que alguns possuem filmes anti refletivos na suas superfícies externas. O "tubo absorvedor" é um tubo de aço inoxidável revestido externamente com tintas seletivas de alta absorvidade na faixa espectral visível e baixa emissividade na faixa espectral infravermelha.

Os "Elementos de Calor" podem ser do tipo "não- evacuado" contendo ar atmosférico na região anular, e do tipo "evacuado" com pressões internas na região anular da ordem de 10^{-3} mbar. A vantagem do "Elemento de Calor"

"evacuado" é a eliminação quase total do ar da região anular tornando a perda de calor convectiva nessa região desprezível. A desvantagem do "Elemento de Calor" evacuado é o seu alto custo e tecnologia sofisticada referente ao processo de fabricação. Os dois tipos de "Elemento de Calor" são mostrados nas Figs. 2(a) e 2(b), sendo o primeiro do tipo "evacuado", de alta tecnologia fabricado por uma empresa estrangeira, e o segundo do tipo "não-evacuado" fabricado artesanalmente e utilizado nas calhas parabólicas da plataforma solar do CEFET-MG / CEMIG.

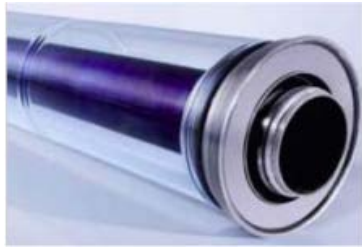


Figura 2 (a) - Elemento de Calor Evacuado.



Figura 2 (b) - Elemento de Calor Não - Evacuado.

Este artigo apresenta resultados de duas pesquisas experimentais para determinação das perdas térmicas do "Elemento de Calor" e do rendimento ótico dos coletores concentradores do tipo calha parabólica, da plataforma heliotérmica do CEFET-MG / CEMIG. As perdas de calor são comparadas com valores experimentais obtidos de testes realizados no campo solar da SEGS (Solar Energy Generation System) conforme Dudley (1994) e com um "Elemento de Calor" comercial de 4ª geração. Adicionalmente, uma análise econômica simplificada é apresentada mostrando as diferenças de investimento dos dois tipos de "Elemento de Calor" para aplicação em geração de potência elétrica e em processo térmicos industriais.

2. METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

As perdas de calor do "Elemento de Calor" foram determinadas utilizando duas metodologias experimentais, sendo a primeira em ambiente interno de laboratório e a segunda em ambiente externo na plataforma solar do CEFET-MG / CEMIG. O rendimento ótico dos coletores concentradores foi determinado externamente na plataforma solar do CEFET-MG / CEMIG.

2.1 Perdas de Calor do "Elemento de Calor" em laboratório

Uma metodologia experimental foi desenvolvida para a determinação em laboratório das perdas de calor do "Elemento de Calor" utilizado nos coletores concentradores do tipo "calha parabólica" do CEFET-MG/CEMIG, conforme descrito por Domingos (2010, 2012), consistindo da realização de testes sob condição controlada em uma amostra do "Elemento de Calor" do tipo "não-evacuado". A amostra consistia de um tubo receptor de vidro boro silicato de baixo teor de ferro sem tratamento anti reflexivo da superfície externa, de diâmetro externo de 75 mm, espessura de 4,2 mm e comprimento de 680 mm, com transmissividade de 90% na faixa dos comprimentos de onda visível e infravermelha. O tubo absorvedor utilizado foi um tubo de aço inoxidável AISI 304 Schedule 40 de diâmetro externo de 48,3 mm, espessura de 3,5 mm e comprimento 890 mm, sendo a superfície externa pintada com uma tinta seletiva comercial denominada "Solkote Hi / Sorb II", com a emissividade variando de 0,28 a 0,49 na faixa de comprimento de onda infravermelho e a absorvidade variando de 0,88 a 0,94 na faixa do comprimento de onda visível.

O procedimento experimental constou da inserção de uma resistência elétrica do tipo "cartucho", especialmente projetada e fabricada, dentro de um tubo de cobre que foi instalado dentro do tubo absorvedor do "Elemento de Calor", conforme mostrado na Fig. 3, tendo como função promover a absorção uniforme do calor gerado pela resistência elétrica e transferir este calor uniformemente para o tubo absorvedor na direção radial ao longo de todo comprimento. Em cada extremidade do "Elemento de Calor", dentro do tubo de cobre, foi instalada uma resistência elétrica do tipo circunferencial, cuja função, foi anular a perda de calor na direção axial pelas extremidades. Medições da temperatura da superfície externa do tubo de cobre, antes e depois de cada resistência circunferencial, permitiu o ajuste manual da potência elétrica dessas resistências visando anular o gradiente de temperatura axial e minimizar as perdas axiais pelas extremidades. Um isolamento térmico de alta condutividade foi colocado em cada extremidade do "Elemento de calor".

Diferentes potências elétricas foram selecionadas e ajustadas utilizando-se um regulador de tensão do tipo "Varivolt" até se conseguir alcançar o regime permanente para temperaturas da superfície do absorvedor variando de 70 °C a 250 °C com incrementos de 20 °C. As potências elétricas foram medidas com transdutores de potência de alta precisão e as temperaturas das superfícies do tubo absorvedor, tubo receptor de vidro e temperatura do ar ambiente do laboratório foram medidas com termopares do tipo "K". O sistema de aquisição de dados Agilent 34980A foi utilizado para aquisição das potências elétricas das resistências e das várias temperaturas gerando arquivos de dados para análise e refinamento dos dados. Os testes foram realizados com a velocidade do ar do laboratório estagnada e próxima de zero, entretanto, testes adicionais realizados dentro de um túnel de vento fabricado artesanalmente permitiu realizar testes com a velocidade do ar variando de 1 a 9 m/s e com a temperatura do ar variando de 17 °C a 21 °C. Uma análise da incerteza combinada do coeficiente global de transferência de calor " U_L ", correspondente às perdas térmicas, foi realizada obtendo-se uma incerteza máxima igual a $\pm 0,26 \text{ W/m}^2$.

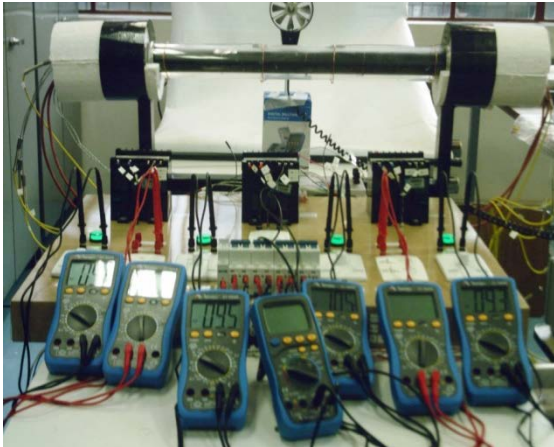


Figura 3(a) - Amostra do "Elemento de Calor" e instrumentos.

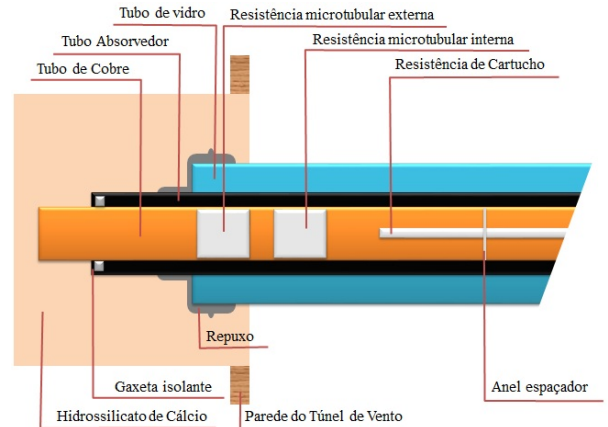


Figura 3 (b) - Detalhe da do "Elemento de Calor".

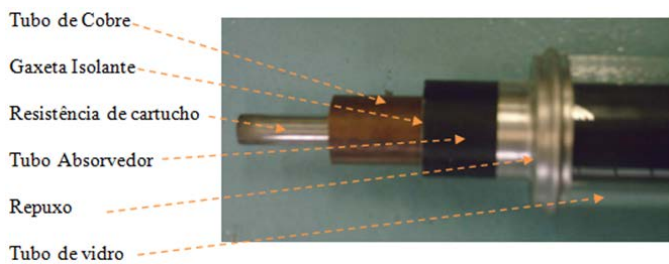


Figura 3 (c) - Extremidade do "Elemento de Calor".

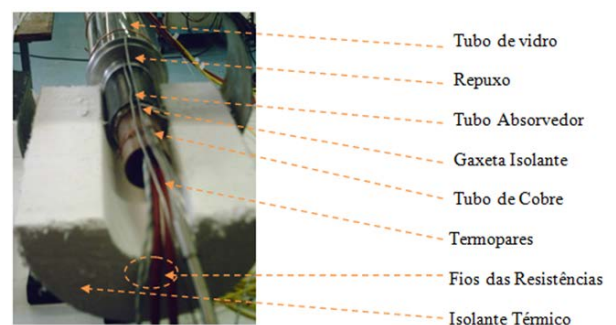


Figura 3 (d) - Extremidade com isolante térmico.

2.1 Perdas de Calor e rendimento ótico do "Elemento de Calor" em campo

Uma metodologia experimental foi desenvolvida para teste dos coletores do tipo "calha parabólica" instalados na plataforma de testes do CEFET-MG / CEMIG, para determinação das perdas térmicas e do rendimento ótico, conforme descrito por Borges (2010 e 2012). O procedimento experimental seguiu as normas internacionais de testes de coletores solares (ASHRAE, 2010) e (European Standard, 2006) e visou determinar a curva de eficiência térmica de uma linha de coletores em serie, composta por cinco módulos de 3,5 m de largura e 5 m de comprimento, correspondendo à uma concentração geométrica de 77 X conforme mostrado na Fig. 4 (a) e 4 (b). As eficiências térmicas foram determinadas após constatado a entrada em regime quase permanente para temperaturas do fluido de trabalho na entrada da linha de coletores de 60 °C, 93 °C, 122 °C, 160 °C e 228 °C. O fluido de trabalho foi o óleo mineral comercial "Thermia E" da Shell. A vazão mássica foi ajustada igual à 0,02 kg.s⁻¹.m⁻², da área bruta de abertura dos cinco módulos, conforme ASHRAE (2010). A vazão volumétrica foi medida com um medidor do tipo turbina, as temperaturas do fluido de trabalho medidas com sensores do tipo PT-100 e a temperatura ambiente com um termopar tipo "T". As radiações direta normal, global no plano horizontal, global no plano de abertura dos coletores e difusa foram medidas com radiômetros de alta resolução, sendo todos sensores calibrados previamente. O sistema de aquisição de dados foi o Agilent 34980A.



Figura 4 (a) - Instalação do CEFET-MG / CEMIG.

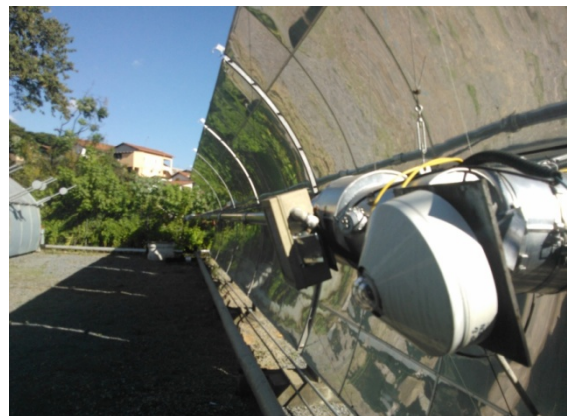


Figura 4 (b) - Linha de realização dos testes de eficiência.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir são apresentados valores das perdas de calor do "Elemento de Calor" testado experimentalmente no CEFET-MG utilizando as duas metodologias descritas anteriormente. Para fins de comparação são apresentados as perdas térmicas de outros "Elementos de Calor" testados em outras instituições. Para facilitar a comparação optou-se por apresentar as perdas térmicas específicas, representadas pelos coeficientes globais de transferência de calor " U_L ", em função da área de transferência de calor do absorvedor e diferença de temperatura entre absorvedor e ar ambiente.

3.1 Teste em laboratório

Os coeficientes globais de transferência de calor " U_L " da amostra do "Elemento de Calor" do CEFET-MG/CEMIG são apresentados na Fig. 5. Cada teste refere-se à um nível de temperatura do absorvedor tendo demorado cerca de um dia. Durante os testes a temperatura do ar ambiente variou entre 26,4 °C e 31,9 °C e o ar esteve estagnado com velocidade praticamente nula. Para efeito de comparação a Fig. 5 apresenta valores calculados de " U_L " de testes realizados no Laboratório SANDIA (Dudley, 1996) para um módulo comercial da IST (Industrial Solar Technology) do tipo "calha parabólica", utilizando um "Elemento de Calor" do tipo "não-evacuado". As concentrações geométricas "nominal" (i.e., referente à área projetada do tubo absorvedor) e "real" (i.e., referente à área de perda de calor do tubo absorvedor) do "Elemento de Calor" do SANDIA foram 45 X e 14,4 X, respectivamente. O "Elemento de Calor" possuía vidro "Pyrex" com filme anti refletivo de transmissividade 0,94 e tubo absorvedor revestido com tinta seletiva do tipo "cromo negro" de absorvidade 0,94 no comprimento de onda visível e emissividade 0,18 à 200 °C na faixa infravermelha. A superfície refletora da parábola era de vidro com revestimento de prata. Os testes no SANDIA foram realizados externamente numa plataforma o que permitiu manter o ângulo de incidência igual à 0°. Durante os testes o módulo foi posicionado fora do foco. Um aquecedor elétrico manteve a temperatura do fluido de trabalho no valor selecionado. A temperatura do ar ambiente variou de 4,4 °C a 24,5 °C e a velocidade do ar variou de 0,9 a 4,9 m/s.

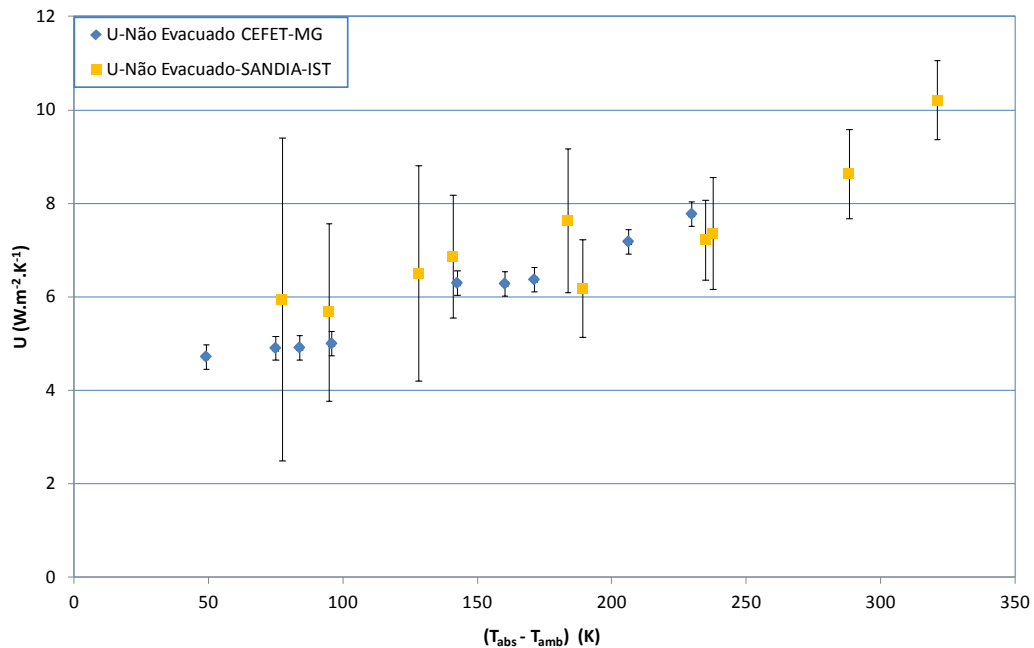


Figura 5 - Valores de " U_L " dos elementos de calor do tipo "não-evacuado" testados no CEFET-MG e SANDIA.

As perdas térmicas mostradas na Fig. 5, tendem a aumentar à medida que a temperatura da superfície do tubo absorvedor aumenta tendo sido desprezada a influência da temperatura do ar ambiente, que variou pouco. A perda de calor por radiação comparada à perda por convecção torna-se cada vez maior com o aumento da temperatura do absorvedor, estando coerente com a Lei de Stefan Boltzman. Os valores de " U_L " do "Elemento de Calor", testado no CEFET-MG, são praticamente iguais aqueles da SANDIA. Os valores médios de " U_L " dos testes do CEFET-MG e SANDIA são 6 W.m⁻².K⁻¹ e 7 W.m⁻².K⁻¹, respectivamente, sendo os valores do CEFET-MG levemente inferiores aos do SANDIA para uma diferença de temperatura de até 170 °C, estando essa diferença dentro da incerteza combinada.

Uma comparação foi realizada objetivando avaliar os valores de " U_L " em função da diferença de temperatura do absorvedor e ambiente, conforme mostrado na Fig. 6, para diferentes módulos concentradores do tipo calha parabólica utilizando "Elementos de Calor" do tipo "evacuado" e "não-evacuado". Os valores de " U_L " foram calculados utilizando banco de dados originados de testes experimentais realizados no SANDIA e na SEGS. Adicionalmente, valores de " U_L " foram calculados para um "Elemento de Calor" comercial, considerado de última geração, utilizando-se dados das perdas de calor unitárias em função da temperatura do absorvedor informadas no catálogo técnico do fabricante.

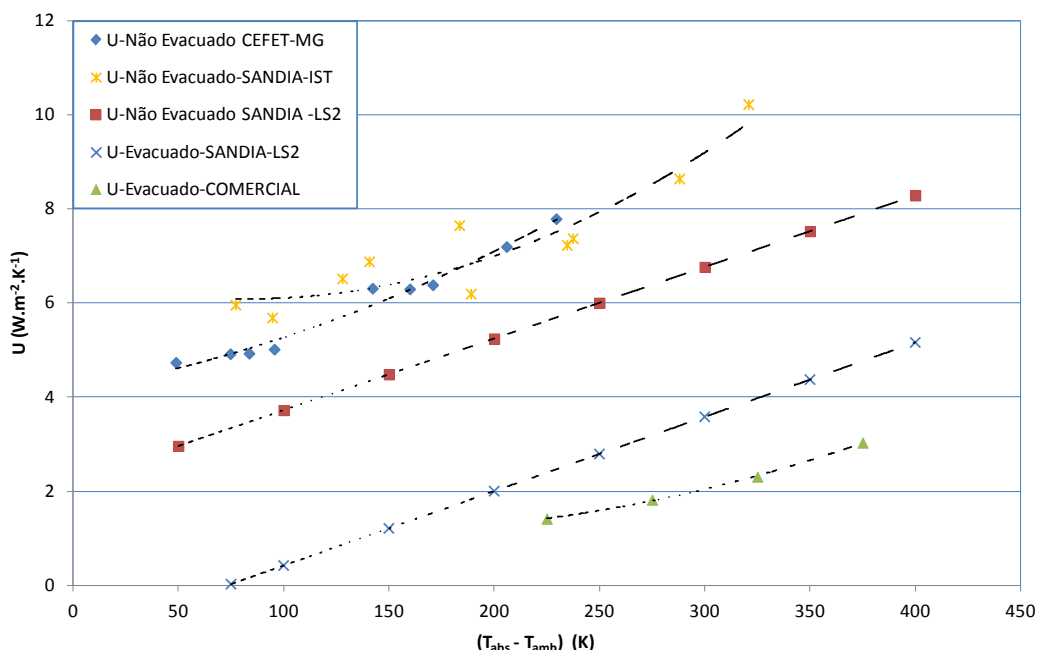


Figura 6 - Valores de "U_L" dos elementos de calor" de calhas parabólicas do tipo "evacuado e "não-convectado".

O gráfico apresentado na Fig. 6 mostra que os valores de "U_L" dos elementos de calor do tipo "não-convectados" (i.e., CEFET-MG e SANDIA - IST) são maiores que aqueles do tipo "evacuado" sendo que a diferença entre os dois tipos tende a aumentar à medida que a temperatura do absorvedor aumenta. Os menores valores de "U_L" foram encontrados para o coletor comercial, embora a confiabilidade dos dados informados não possa ser assegurada.

3.1 Teste em campo

Testes de campo foram realizados na plataforma solar do CEFET-MG durante o mês de Agosto para uma linha composta de cinco módulos com comprimento total de 20 m e concentrações geométricas "real, C_{G,R}" e "nominal" de 22,7 e 71,2. Os valores de "F_R.U_{L,med}/C_{G,R}" e "F_R.η_o" (η_o=ρ.(K.γ.τ.α)) foram determinados da inclinação da reta e do ponto de interseção da reta com "T_{f,e}-T_{amb}=0" (Duffie, 2013), sendo "F_R" o fator de remoção de calor, "ρ" a refletividade da parábola, "K" o modificador do ângulo de incidência, "γ" o fator de interceptação, "τ" a transmissividade do vidro e "α" a absorptividade do absorvedor. Para o cálculos de "U_{L,med}" e "η_o" admitiu-se "F_R=1" e "K=1", respectivamente.

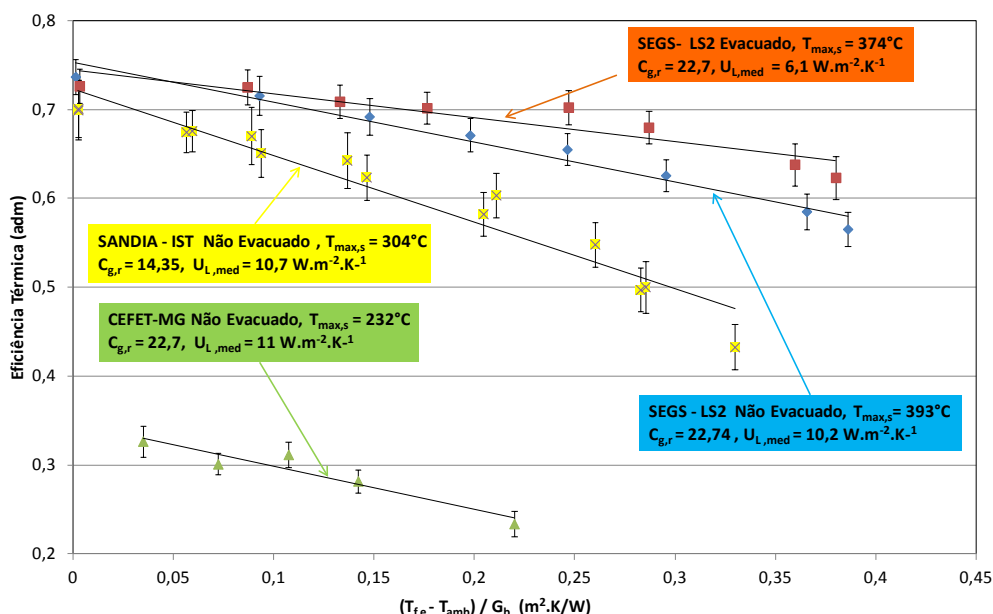


Figura 7 - Eficiência térmica das calhas parabólicas com "Elementos de Calor" do tipo "evacuado e "não-convectado".

Os três valores médios de "U_{L,med}" obtidos para os três módulos utilizando "Elementos de Calor" do tipo "não-convectado", conforme mostrado na Fig. 7, são similares existindo uma diferença máxima de apenas 7%. O módulo com "Elemento de Calor "evacuado", apresentou um valor de "U_{L,med}" cerca de 40% inferior que os módulos do tipo "não-

evacuado". Os rendimentos óticos dos módulos com "Elemento de Calor" do tipo "não-evacuado" do CEFET-MG, SANDIA e SEGS foram 35%, 72% e 75%, respectivamente. O baixo rendimento ótico dos módulos do CEFET-MG parece ser causado pela degradação das superfícies refletoras, visto que os testes foram realizados cerca de cinco anos após a data da instalação dos módulos. Uma importante constatação foi que o valor " $U_{L,med}$ " obtido dos testes de laboratório para o "Elemento de Calor" do CEFET-MG mostrou-se inferior ao valor encontrado nos testes de campo, ou seja, $6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $11 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respectivamente. O alto valor de " $U_{L,med}$ " para o teste de campo pode ser devido principalmente à degradação da tinta seletiva dos módulos expostos por vários ao tempo e sol, ao contrario da amostra que foi preparada especificamente para o teste de laboratório. Os valores de " $U_{L,med}$ " obtidos dos testes de campo do SANDIA, SEGS e CEFET-MG para o absorvedor "não- evacuado" estão bem próximos ($10,7$, $10,2$ e $11 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

4. ANÁLISE ECONÔMICA

Uma análise econômica simplificada foi elaborada para verificar o impacto econômico da decisão de se construir uma planta solar composta por módulos concentradores utilizando "Elemento de Calor" do tipo "evacuado" ou "não-evacuado". Essa análise apresenta a diferença percentual do investimento inicial requerido para instalação de uma planta de 50 MW do tipo calha parabólica para atender as finalidades de CSP (i.e., produção de eletricidade) ou Heliotermia (i.e., produção de calor para processo industrial). Para este estudo considerou-se os custos de IRENA (2012). O custo da planta solar foi igual à US\$6.000/kW e os custos percentuais do "Elemento de calor do tipo "não-evacuado" e campo solar 7,1% e 31,4% do custo total. A eficiência do Ciclo Rankine foi 7% inferior à do Ciclo de Carnot e a temperatura do fonte fria $100 \text{ }^\circ\text{C}$. O custo do "Elemento de Calor" do tipo "não evacuado" foi metade do "evacuado". As eficiências térmicas do campo solar "sem" e "com" "Elementos de Calor" "evacuado", as eficiências do Ciclo Rankine, as eficiências elétricas "sem" e "com" "Elementos de Calor" "evacuado", e as diferenças percentuais de investimento inicial "sem" e "com" "Elementos de Calor" evacuados foram determinados e apresentados na Fig. 8, em função da temperatura máxima do fluido de trabalho no campo solar para as aplicações de CSP e Heliotermia.

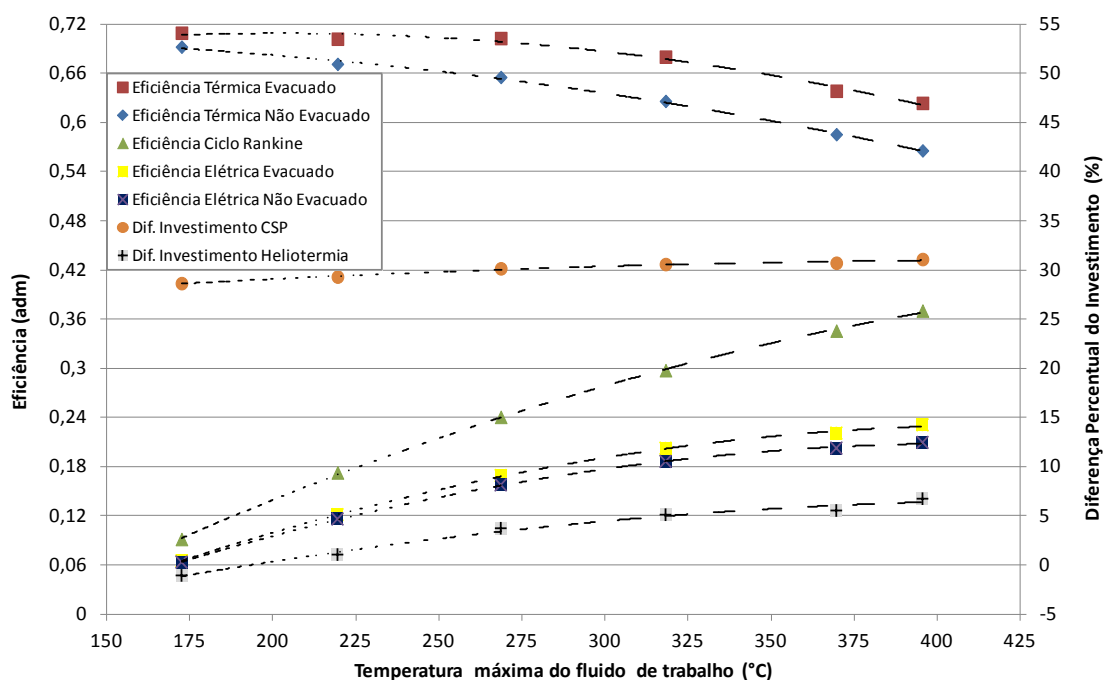


Figura 8 - Investimento de uma planta solar para CSP e Heliotermia com "Elementos de Calor" "com" e "sem" vácuo.

Analisando a Fig. 8 verifica-se que as eficiências térmicas do campo solar utilizando "Elementos de Calor" tanto do tipo "evacuado" como "não-evacuado" decrescem com o aumento da temperatura máxima do fluido de trabalho devido ao aumento das perdas térmicas. Por outro lado, a eficiência do ciclo Rankine cresce com o aumento da temperatura máxima do fluido de trabalho devido ao aumento da temperatura da fonte quente. A eficiência elétrica é definida como $\eta_{ele} = \eta_R \cdot \eta_t$, onde η_R e η_t são as eficiências do ciclo Rankine e do campo solar, respectivamente. A eficiência elétrica dos módulos utilizando "Elemento de Calor" do tipo "evacuado" e "não-evacuado" é similar crescendo com o aumento da temperatura máxima do fluido de trabalho, visto que o aumento de η_R sobrepuja o decréscimo de η_t . A diferença relativa de investimento para a aplicação CSP é sempre positiva e em torno de 30%, enquanto para a aplicação Heliotermia, para temperaturas máximas inferiores à $200 \text{ }^\circ\text{C}$, a diferença do investimento se torna negativa significando que o uso do "Elemento de Calor" do tipo "não-evacuado" pode ser vantajoso até $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou duas metodologias para determinação do coeficiente global de perda térmica do "Elemento de Calor" " U_L ", de coletores do tipo "calha parabólica". As metodologias foram utilizadas em ambiente de laboratório e na plataforma solar do CEFET-MG. O teste em campo permitiu realizar a caracterização dos módulos coletores com obtenção da curva de eficiência térmica, rendimento ótico e perdas térmicas específicas médias " $U_{L,med}$ ".

Uma amostra do "Elemento de Calor" dos módulos da plataforma solar do CEFET-MG/CEMIG foi testada em laboratório para avaliação de " U_L " e comparada com valores de testes realizados em coletores similares mostrando boa concordância. Posteriormente, outro teste foi realizado na plataforma solar do CEFET-MG/CEMIG sendo o valor de " $U_{L,med}$ " obtido em campo superior ao obtido em laboratório. O teste em campo também promoveu a avaliação do rendimento ótico do coletor. Uma comparação dos valores " U_L " e " $U_{L,med}$ " para "Elementos de calor" com e sem vácuo, mostrou que o tipo "evacuado" apresenta menores perdas térmicas comparado ao tipo "não-evacuado".

Uma análise econômica simplificada baseada na diferença percentual de investimento mostrou que plantas de geração de eletricidade usando "Elemento de Calor" do tipo "evacuado" são mais atrativas. Para aplicações de geração de calor de processo até 200 °C as plantas utilizando "Elementos de Calor" do tipo "não-evacuado" são mais atrativas.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. 2014. Informações Gerenciais. 2014. http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Jun14.pdf. 28 Nov. 2014.
- ASHARE 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.
- Borges E. B. 2012. Avaliação experimental dos coletores solares cilíndrico parabólicos da instalação solar do CEFET-MG / CEMIG. Dissertação de Mestrado, Centro federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Borges E. B. 2014 e Neto J. H. M. Avaliação experimental dos coletores concentradores cilindro parabólicos da instalação solar do CEFET-MG / CEMIG-MG. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, 31 de Março a 03 de Abril de 2014.
- Braga J.P.P e Lisboa A.H., 2010. Usina Térmica Solar para médias e altas temperaturas utilizando concentradores Cilíndrico-Parabólicos – Análise de Componentes, III CBENS - III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém.
- Domingos, S. F. 2010. Avaliação Térmica Experimental do Elemento de calor dos Concentradores Cilindro Parabólicos da Instalação Solar do CEFET MG. Dissertação de Mestrado, Centro federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Domingos, S. F. e Neto J. H. M. 2012. Metodologia para avaliação das perdas térmicas de um elemento absorvedor de calor em um coletor cilíndrico parabólico. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino Americana, ISES – São Paulo, 18 a 21 de Setembro.
- Dudley V. E. Kolb G. J. Mahoney A. R. Mancini T. R e Matthews A. R. 1994. Tests Results - SEGS LS-2 Solar Collector. Sandia national laboratories SAND94-1984.
- Dudley V.E., Evans L. R, Matthews C. W. 1996. Tests Results - Industrial Solar Technology - Parabolic Trough Solar Collector, SAND94-1117. UC 1302.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th edition. John Wiley & Sons.
- European Standard EN 12975-2:2006- Thermal solar systems and components — Solar collectors — Part 2: Test methods - European Committee For Standardization. 2010.
- Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. 2015. "Existem projetos heliotermicos no país?". 10 Out. 2015. <<http://energiaheliotermica.gov.br/>>.
- IRENA - International Renewable Energy Agency. 2012. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Concentrating Solar Power. Vol. 1: Power Sector, Issue 2/5.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. Tristão A. ONS. 2013. Operation of the Brazilian Interconnected Power System - BIPS Attributions and Products of ONS Presentation September 4th, 2013.
- SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment, 2015. <<https://maps.nrel.gov/swera>>. 10 Out. 2015.
- Vieira L. S. R., Guimarães A. P. C., Bezerra L. B. 2012. Basic Design of a 1 MW CSP Plant in Petrolina-PE. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino Americana, ISES – São Paulo, 18 a 21 de Setembro.

EXPERIMENTAL EVALUATION AND ECONOMIC ANALYSIS OF NON EVACUATED TROUGH - PTC

Abstract. This work presents two experimental methodologies to be used in laboratory and in solar field to determine the global heat loss transfer " U_L " of a "non-evacuated" receiver of the parabolic trough collectors installed in the solar platform of CEFET-MG/CEMIG. The results show values of " U_L " of $6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $11 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ for the laboratory and solar field, respectively. A simplified economic analysis shows that solar plants using "non-evacuated" receivers are not attractive for electricity generation, however, they are attractive for thermal application with temperatures up 200 °C.

Key words: Parabolic Trough, non-evacuated absorber, CSP