



Concentrador Solar Parabólico aplicado ao aquecimento de óleos : Um projeto experimental de otimizações ao tubo focal

Gabriela Ferreira Soares Vidal

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES CEP 29075-910
gabifsvidal@yahoo.com.br

Gabriel Haddad Souza Gava

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES CEP 29075-910
ghsg@bol.com.br

Resumo: *Este trabalho é resultado de um estudo experimental acerca dos efeitos da transferência de calor da energia solar para a diminuição da viscosidade do petróleo pesado a fim de vencer com maior eficiência as perdas de carga nas tubulações destinadas ao seu transporte através de um concentrador solar. Neste estudo, que prioriza as fontes alternativas de energia, foram descritos e testados três tipos diferentes de tubos focais instalados no concentrador solar parabólico. Os referidos tubos funcionaram, cada um por sua vez, montados no foco da parábola de maneira que recebessem grande parte da radiação solar refletida pela superfície do concentrador. Deste modo, o fluido de trabalho (água), que passa dentro do tubo focal, foi aquecido num ciclo primário e o calor recebido foi utilizado para aquecer o óleo num ciclo secundário através de um trocador de calor. Este estudo trata primeiramente da apresentação do concentrador e subsequentemente da eficiência de cada um desses tubos focais, e, como resultado, qual o melhor tipo a ser usado para tal aplicação.*

Palavras-chave: *energia solar, energia alternativa, petróleo pesado, concentrador solar, concentrador parabólico.*

1. INTRODUÇÃO:

A crescente preocupação mundial, tanto da sociedade como dos governos nacionais, com o aquecimento global causado por gases gerados a partir da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, vem sendo usada como estímulo para o desenvolvimento de fontes de energia alternativa, especialmente aquelas renováveis e não poluidoras.

Nesta categoria está incluída a energia solar, que é um modo de energia limpa, renovável e abundante encontrada na natureza. Apesar de o uso deste tipo de fonte energética ainda não ser muito difundido em escala industrial, sua aplicação cresce cada vez mais para uso residencial e outras pequenas aplicações.

Atualmente, as aplicações da energia solar podem ser divididas em dois grupos, aquelas que convertem sua energia diretamente em energia elétrica e aquelas que convertem a energia solar em energia térmica, sendo o segundo tipo o mais utilizado, principalmente para aquecimento de água para banho, e o primeiro tipo, em pequena escala em geração de energia elétrica.

A despeito de o Brasil ser um país intertropical, a média de irradiação solar em seu território varia entre 400 e 700 W /m² ao ano, enquanto outros países localizados em latitudes semelhantes, como a Austrália, por exemplo, recebem cerca de 1300 W /m² em áreas desérticas. A Fig. 1 indica o nível de irradiação solar para vários locais através do globo terrestre, conhecidas como “cinturão solar”.

Em algumas regiões do país, especialmente no norte do estado do Espírito Santo e em áreas localizadas nos estados do nordeste do país, é comum a ocorrência de dias de céu limpo, assim como a produção de petróleo pesado e extra-pesado. Devido a isso, o desenvolvimento e a melhoria de tecnologias que usem o calor da radiação solar na exploração e transporte dos subprodutos do petróleo pode ser uma forma de reduzir custos e tornar o processamento do óleo mais ecológico, permitindo ainda a aplicação da tecnologia desenvolvida em outras áreas da indústria em geral.

As principais metas estão associadas à redução de custos e ao suprimento, por exemplo, de calor a áreas isoladas não atingidas pela rede elétrica convencional.

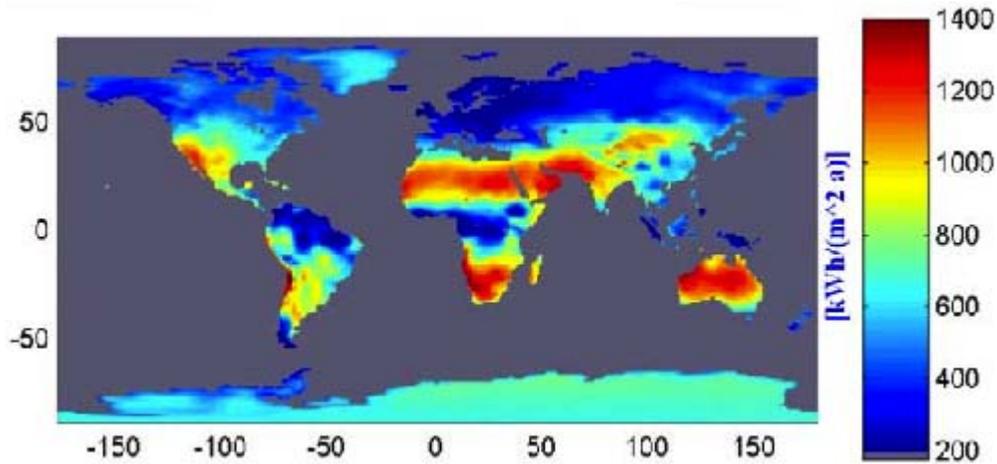


Figura 1: nível de irradiação solar para vários locais da Terra

O objetivo deste trabalho é mostrar os desenvolvimentos na tecnologia necessária para diminuir o gasto de energia convencional no bombeamento de petróleos pesados empregando calor solar. O esboço do protótipo proposto por este trabalho é mostrado na Fig. 2.

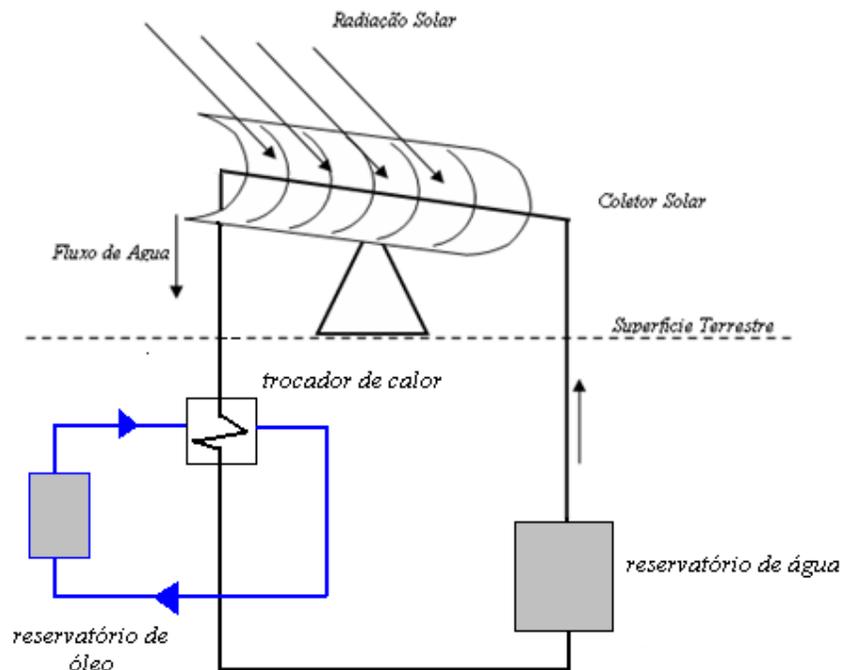


Figura 2: Esboço do protótipo do aquecedor solar proposto

2. CARACTERÍSTICAS DO CONCENTRADOR SOLAR

O equipamento pode ser dividido em três partes principais: (a) espelho parabólico; (b) tubo focal; (c) sistema de circulação, composto de bombas e medidores de vazão e temperatura do fluido de trabalho.

O espelho parabólico será responsável pela captação de energia solar e aquecerá a água que passa pelo tubo focal em circuito fechado. O espelho deve ter características específicas e bem definidas no sentido de se obter uma otimização da captura e reflexão dos raios solares para o foco da parábola, onde será instalado o tubo focal cujos resultados experimentais dos testes feitos serão demonstrados aqui. Assim, tanto o projeto quanto a construção do espelho obedecerão a rígidos critérios para alcançar, ao final da construção, dados que mostrem que material deve ser usado no projeto do tubo focal para uma menor resistência térmica. Deve ser observado que o espelho deverá ser montado em uma estrutura inclinável, rígida o bastante para que o perfil parabólico possa ser preservado durante as operações de posicionamento e inclinação. Alguns dados geométricos podem ser vistos na Fig. 3.

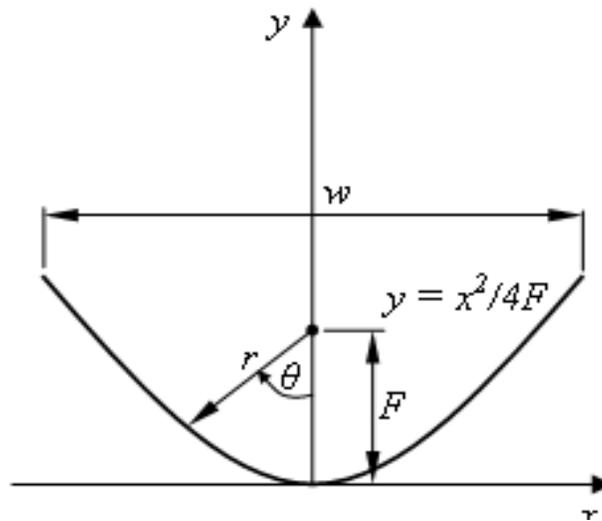


Figura 3: Dados geométricos do perfil parabólico do espelho refletor com comprimento do foco $F = 0,2\text{m}$, $w = 1\text{m}$ e $L = 2\text{m}$

Como superfície reflexiva foi usada uma lâmina de aço inoxidável, de pequena espessura, por sua boa reflexividade, mas o ideal seria um espelho fabricado sob medida já com seu formato definido. Para dar a forma parabólica desejada ao aço inoxidável foi montada uma estrutura em madeira de perfil parabólico, como mostrado nas Fig. 4a-b.



Figura 4: (a) Estrutura parabólica em madeira em construção, (b) Superfície reflexiva instalada na estrutura de madeira

O espelho é completado com o posicionamento da instrumentação relativa ao sol: transferidor, ponteiro solar, bússola e uma base móvel, visando facilitar o transporte. Neste trabalho, não será feita nenhuma análise para aprimorar o funcionamento do espelho, ficando restringido ao exame quanto ao tipo de material mais eficiente a ser usado na construção do tubo focal. A Fig. 5 mostra o concentrador solar em uso.



Figura 5: Concentrador solar em uso

O sistema de circulação de água usado nos testes é composto por um sistema fechado em que água comum flui de um tanque isolado até o tubo focal. A vazão é medida através de um rotâmetro e as seguintes temperaturas são coletadas: T1 (temperatura na entrada do tubo focal), T2 (temperatura na saída do tubo focal) e T3 (temperatura na entrada do tanque isolado). A Fig. 6 exibe um desenho esquemático do sistema de circulação.

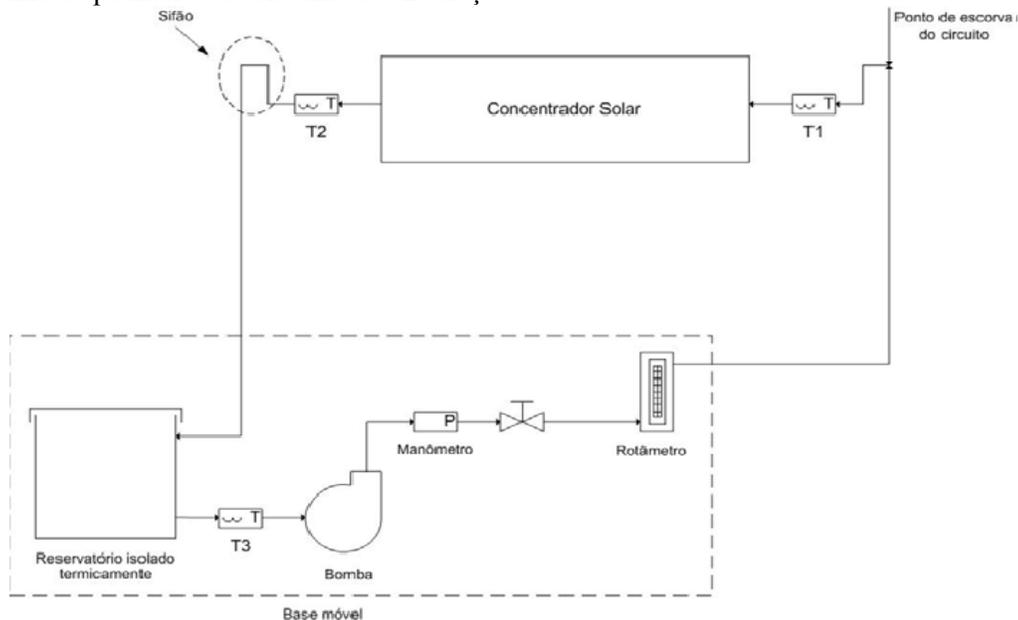


Figura 6: Desenho esquemático do circuito fechado de água

Por outro lado, o tubo focal deve ter características que minimizem a resistência térmica. Assim, um tubo comercial de cobre ($\varnothing 3/4''$, $L=2.0\text{m}$) com paredes pouco espessas foi selecionado de modo a obter uma redução na resistência térmica ocasionada na condução de calor. No entanto, o tubo focal fica exposto à atmosfera, proporcionando, desta maneira, uma redução da transferência de calor para o fluido de trabalho acarretada pela convecção forçada promovida pelo vento. O aumento da transferência de calor por condução associado à diminuição das perdas por convecção através do projeto do tubo são o objeto da análise a seguir.

Como visto a seguir, foram propostos e construídos quatro tipos diferentes de projetos para o tubo focal:

- Tubo 1: Tubo de cobre sem revestimento superficial (mais tarde provado ineficiente e não testado como tubo focal).
- Tubo 2: Tubo de cobre revestido de tinta preta.
- Tubo 3: Tubo de cobre revestido de tinta preta e por um fino tubo de vidro
- Tubo 4: Tubo de cobre com aletas internas quadradas piniformes, revestido de tinta preta e por um fino tubo de vidro.

O tubo 1 é o projeto mais fácil e básico, mas promove grande perda de calor para a atmosfera por convecção, assim como o tubo 2, com a diferença de que este obtém um aumento da transferência de calor entre o tubo e o fluido de trabalho, pois absorve mais radiação do que o primeiro, o qual reflete grande parte desta.

O tubo 3 promove um isolamento térmico devido ao tubo de vidro envolvendo o tubo de cobre, que assim, proporciona uma espécie de efeito estufa ao refletir para o tubo de cobre a radiação primeiramente refletida deste.

O tubo 4, igualmente como o tubo 3, melhora a troca de calor entre o tubo de cobre e o fluido de trabalho e ainda, através de suas aletas piniformes de base quadrada soldadas na parte inferior do tubo e distribuídas ao longo de todo o comprimento do tubo de cobre, provoca uma melhor troca de calor para o fluido, ao mesmo tempo em que produz turbulência. O acréscimo da turbulência visa aumentar também a mistura do fluido, tendo em vista o baixo número de Reynolds a que o sistema é submetido.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O primeiro teste feito foi a respeito da influência da refletividade da superfície do tubo de cobre sobre a eficiência do concentrador. Existiam três possíveis formas de utilizar o tubo: recoberto com uma camada de tinta preta fosca, com a superfície polida ou recoberta com sua camada natural de óxido. Para definir qual seria a melhor forma de utilizá-lo foi realizada uma experiência simples que consistiu em expor dois pequenos pedaços do tubo ao sol, um recoberto com tinta preta fosca e outro possuindo metade de sua superfície lixada e a outra em seu estado natural recoberta com uma camada de óxido, desta forma fixou-se um termopar sobre cada um dos três tipos de superfícies e realizou-se tomadas de temperatura das três situações simultaneamente, em determinados intervalos de tempo, a Fig. 7 mostra o experimento e a Tab. 1 mostra os resultados obtidos.



Figura 7: Experimento para seleção do acabamento superficial do tubo coletor focal.

Tabela 1: Variação da temperatura superficial com o tempo para os três tipos de superfícies

Tempo (minutos)	Superfície recoberta com tinta	Superfície natural do cobre	Superfície lixada
0	34 °C	34 °C	34 °C
10	42 °C	41 °C	39 °C
20	47 °C	43 °C	42 °C
30	50 °C	47 °C	44 °C

Como já era esperado a superfície recoberta com tinta preta fosca possui a menor refletividade, logo absorve melhor a energia luminosa.

A partir dos resultados obtidos acima, somente o tubo com superfície recoberta de tinta foi testado como tubo focal, pois foi provado mais eficiente para um teste de longa duração visto que em um curto espaço de tempo (30 minutos) apresentou uma variação de temperatura de 6°C em relação à superfície lixada e uma variação de 3°C em relação à superfície natural do cobre.

Os experimentos foram efetuados em dias com características climáticas semelhantes para o teste dos três tipos de tubos focais, já que os testes anteriores provaram que é necessário.

Durante o teste do circuito fechado de água foi fixada uma vazão de 1.25 ml/s, monitorada e controlada por um rotâmetro. Devido à baixa velocidade do fluido, foi necessária a instalação de dois sifões, um antes e um depois do tubo focal, a fim de garantir um completo desenvolvimento da água dentro do tubo, com conseqüente aumento da troca térmica entre o tubo e a água.

É importante notar que a energia instantânea disponível foi estimada a partir da irradiação solar direta global sobre o espelho de área de 2 m² projetado.

Alguns dados foram coletados de testes (T1, T2, Q) e outros obtidos como mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4. Nessas tabelas, G_I representa a média da irradiação global de energia, obtida da radiação acumulada de energia em uma hora, informada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – site do INMET (2007), que mantém uma estação climática automática localizada na área de experimentos de seu site. Q é a energia instantânea absorvida pela água, calculada pela Eq. 1. A razão entre Q e G_I fornece a eficiência η_I ,

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Na Eq. 1, m é a vazão mássica da água em kg/s e c_p é o calor específico da água a pressão constante em J/kg . K. Dados marcados como G_R significam o valor da irradiação global disponível no software Radasol (2007), que simula a irradiação solar para várias cidades brasileiras, incluindo Vitória, ES, para qualquer dia do ano. A fim de verificar os dados disponíveis pelo Radasol (2001), também foi relacionado o valor ΔG , que representa o erro percentual calculado entre os dados obtidos pela Radasol e os dados obtidos pela INMET (2007). A razão entre Q e G_R provê a eficiência η_R . Radasol (2001) foi usado com todos os dados padrões, sem qualquer outro ajuste.

Tabela 2: Dados experimentais de testes realizados dia 26-03-2007 e calculados utilizando o tubo 2

Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	Q (W)	G _R (W)	η_R (%)	G _I (W)	η_I (%)	ΔG (%)
9:30	29	63	177,6	1146	15,5	1345,6	13,2	14,8
10:00	31	80	256,0	1280	20,0	1506,7	17,0	15,0
10:30	36	77	214,2	1414	15,1	1653,6	13,0	14,5
11:30	36	54	94,0	1560	6,0	1724,4	5,5	9,5
12:00	36	57	109,7	1633	6,7	1648,3	6,7	0,9
12:30	38	58	104,5	1560	6,7	1694,4	6,2	7,9

Tabela 3: Dados experimentais de testes realizados dia 19-03-2007 e calculados utilizando o tubo 3

Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	Q (W)	G _R (W)	η _R (%)	G _I (W)	η _I (%)	ΔG (%)
10:30	32	96	334,3	1402	23,8	1639,4	20,4	14,5
11:00	34	70	188,1	1474	12,8	1742,2	10,8	15,4
11:30	36	72	188,1	1546	12,2	1794,4	10,5	13,8
12:00	38	95	297,8	1618	18,4	1846,7	16,1	12,4
12:30	36	87	266,4	1546	17,2	1857,8	14,3	16,8
13:00	36	77	256,0	1474	17,4	1868,9	13,7	21,1
13:30	34	85	229,8	1402	16,4	1790,0	12,8	21,7

Tabela 4: Dados experimentais de testes realizados dia 21-03-2007 e calculados utilizando o tubo 4

Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	Q (W)	G _R (W)	η _R (%)	G _I (W)	η _I (%)	ΔG (%)
11:30	36	79	224,6	1550	14,5	1663,6	13,5	6,8
12:00	35	97	323,9	1622	20,0	1918,9	16,9	15,5
12:30	37	96	308,2	1550	19,9	1925,8	16,0	19,5
13:00	38	96	308,2	1478	9,5	1932,8	16,3	23,5
13:30	37	96	308,2	1406	21,9	1846,4	16,7	23,9
14:00	38	96	303,0	1275	23,8	1760,0	17,2	27,6
14:30	37	97	313,4	1144	27,4	1593,6	19,7	28,2
15:00	32	92	313,4	977	32,1	1427,2	22,0	31,5
15:30	24	78	282,1	810	34,8	1221,7	23,1	33,7
16:00	36	79	219,4	643	34,1	1016,1	21,6	36,7

A Fig. 8 mostra a diferença entre os dados medidos e os dados simulados, considerando o INMET (2007) como a fonte mais confiável. Como pode ser visto, há um grande variação em tal comparação, de cerca de 5% a cerca de 35%, com valores médios: 10,4% para o tubo 2, 16,5% para o tubo 3, 24,7% para o tubo 4, considerando todo o período de medição.

Apesar de Radiasol (2001) mostrar-se um excelente software gratuito, alguns cuidados são requeridos pelo usuário no caminho de ajustar os parâmetros de irradiação atuais a fim de evitar erros nas análises. Esta observação é importante para algumas comparações e conclusões demonstradas posteriormente.

A comparação entre a eficiência de absorção com os quatro diferentes tipos de tubo focal é mais bem observada na Fig. 9, considerando os cálculos de η_I. É possível inferir considerável perda de calor por convecção para a atmosfera dos tubos 2 e 3 em comparação com o tubo 4, como demonstrado pela alta eficiência deste durante todo o período de teste, principalmente no intervalo de tempo em que as taxas de irradiação tendem a decrescer, especialmente depois de 13:00.

Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de as aletas piniformes do tubo 4 proporcionarem maior troca de calor interna. Por outro lado, a baixa velocidade do fluxo de água com o correspondente número de Reynolds pequeno tende a manter um fluxo de regime laminar e pouco misturado, reduzindo-se a o coeficiente de troca de calor por convecção interna.

Apenas para efeito de comparação, a média de eficiência obtida pelos tubos 2, 3 e 4 é, respectivamente, 10,3%, 14,1% e 18,3%. O isolamento térmico promovido pela cobertura de vidro pode ser explicado analisando o comportamento das propriedades de alguns espectros da radiação, considerando a Fig. 10. Como pode ser visto, a maior parte do poder de transmissão do vidro ocorre entre 1,5 e 2,5 μm, enquanto 95% da emissão interna do tubo de cobre, considerado um corpo negro a 400 K, ocorre num comprimento de onda de 4,5 a 10,5 μm, aproximadamente.

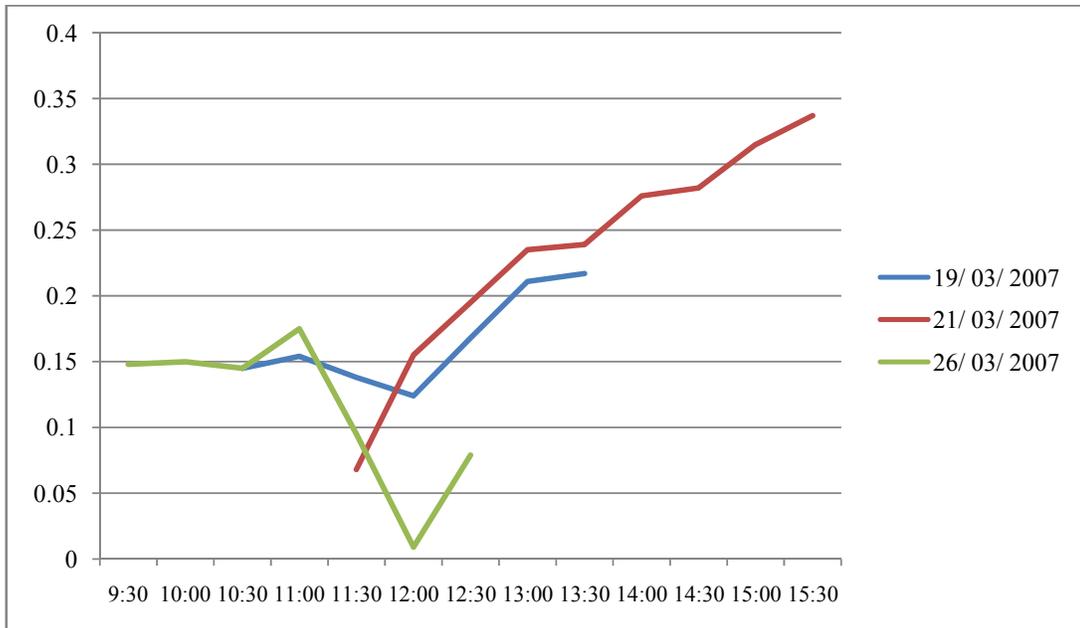


Figura 8: Comparação entre os dados de ΔG , da irradiação global, supridos pelo INMET (2007) e simulados pelo Radiasol (2001)

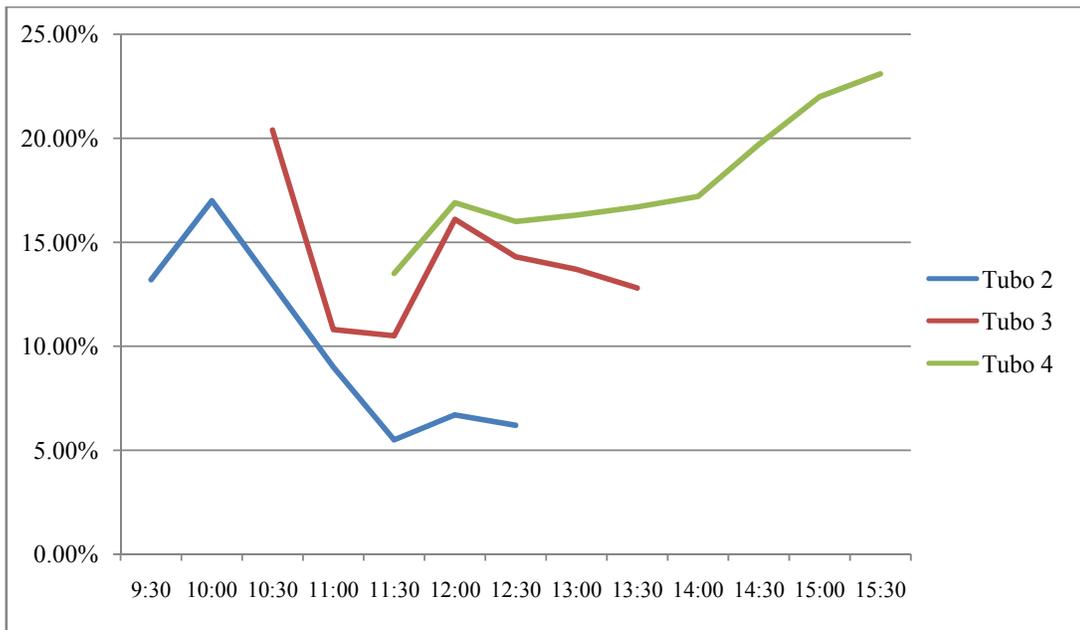


Figura 9: comparação de eficiência, η_1 (%), entre os três tipos de tubos focais

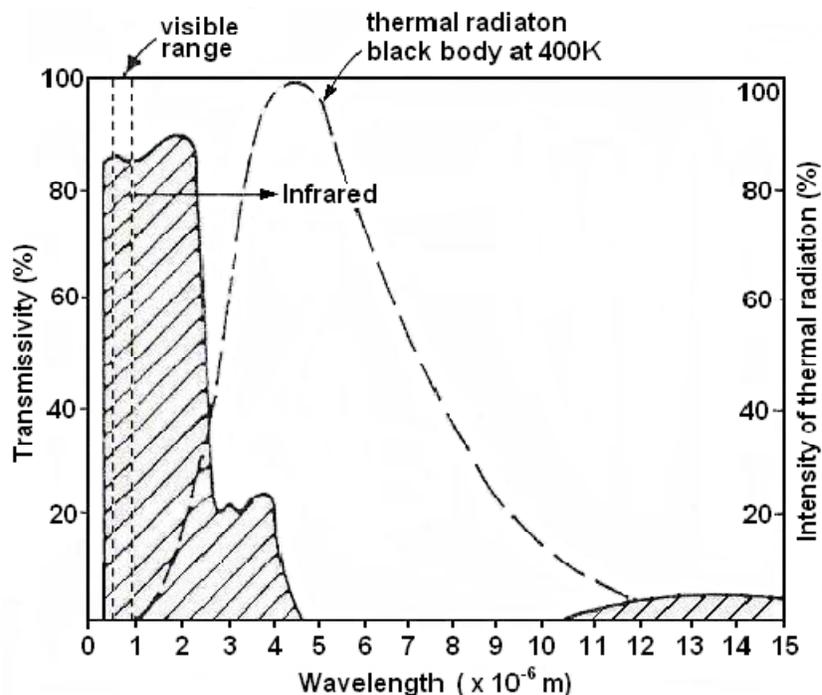


Figura 10: Propriedades da dependência espectral da radiação para um vidro qualquer (Acioli, 1994)

4. ANÁLISE E CONCLUSÕES

Como esperado, o Tubo 4 obteve a maior eficiência. O tubo de cobre pintado com tinta preta fosca, recoberto com um tubo de vidro e com aletas piniformes internas realmente contribuiu para o aumento na transferência de calor para o fluido de trabalho que passa dentro do tubo focal. O tubo 4 será utilizado então na sequência do trabalho.

A baixa eficiência máxima observada em todo o sistema (máx. 23%) talvez seja devido à necessidade de melhores critérios de montagem do sistema. Foi notado também que o foco parabólico não ficou exatamente sobre o tubo focal, gerando um inesperado componente de radiação difuso.

Outro aspecto observado é sobre a precisão dos dados gerados pelo software Radiasol (2001) quando comparado com os dados da estação climática do INMET (2007), situado a poucos metros do site de experimentação. Os dados foram coletados automaticamente pela estação e, no entanto, os dados de irradiação acumulada foram convertidos de kJ/m^2 para W/m^2 e usados neste trabalho, gerando alguns erros devidos à transformação de unidades.

5. AGRADECIMENTOS

A equipe do projeto gostaria de agradecer à Fundação de Apoio a Ciência e Tecnologia do Estado do Espírito Santo – FAPES e ao professor Rogério Ramos, orientador do projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Acioli, J. L., 1994, “Fontes de Energia”, Ed. Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, 138 p (in Portuguese).
- Cometta, E., 2004, “Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos”, Ed. Hemus, São Paulo, Brazil (in Portuguese).

- Dogruoz, M. B., Urdaneta, M., Ortega, A., 2005, "Experiments and modeling of the hydraulic resistance and heat transfer of in-line square pin fin heat sinks with top by-pass flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 5058-5071.
- Gasparini, J. C., Louzada, D.A., 2006, "Análise da redução da perda de carga em escoamentos de óleo pesados por termo-acumulação utilizando energia solar – Projeto e construção de um concentrador solar", final graduation course monography, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 115p (in Portuguese).
- ITESO, 1995, "Notas Sobre El Curso de Energía Solar", Ed. Tlaquepaque, Jalisco, Mexico (in Spanish).
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, 2007, home page accessed in Mar. 2007, <<http://www.inmet.gov.br>>.
- Palz, W., 1981, "Energia Solar e Fontes Alternativas", Ed. Hemus, São Paulo, Brazil (in Portuguese).
- Ramos, R., Gasparini, J.C., Dos Anjos, V.L.R., 2007, "Estudo experimental da eficiência de captação de calor em função do projeto do tubo focal para um concentrador solar parabólico", II Brazilian Congress on Energy Efficiency – CBEE 2007, in Portuguese, submitted (in Portuguese).
- Su, J. and Estefen, S., 2005, "Thermal-Hydraulic Analysis of Heavy Oil Transportation in Heated Sandwich Pipelines", Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece.
- Trp, A., 2005, "An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer During Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit", Solar Energy, Vol. 79, pp. 648-660.
- RADIASOL–Sistema de Radiação Solar, versão 2, 2001, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, accessed in 17 Apr. 2004, <<http://www.solar.ufrgs.br>>.
- Wang, X., Wang, R. and Wu, J., 2005, "Experimental Investigation of a New-Style Double-Tube Heat Exchanger for Heating Crude Oil Using Solar Hot Water", Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1753-1763.

Concentrador Solar Parabólico aplicado ao aquecimento de óleos : Um projeto experimental de otimizações ao tubo focal

Gabriela Ferreira Soares Vidal

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES CEP 29075-910
gabifsvidal@yahoo.com.br

Gabriel Haddad Souza Gava

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES CEP 29075-910
ghsg@bol.com.br

Abstract: *The paper present the results of an experimental study about the effects of heat transfer from solar concentration over flow resistance of oil. In this study specifically, it is described and tested three different designs for the focal tube installed on a parabolic solar concentrator. In this arrangement, working fluid is heated in a primary cycle and the heat is transferred to the oil in a secondary flow cycle. At now, just the enhanced heat transfer to the working fluid of primary cycle is evaluated. The pressure loss reduction due to the oil flow heating will be estimated in future, aim to estimate the technical viability analysis of such arrangement.*

Keywords: *solar energy, alternative energy heavy oil, solar concentrator, parabolic concentrator.*