

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DAS PERDAS TÉRMICAS DE UM ELEMENTO ABSORVEDOR DE CALOR EM UM CILINDRICO PARABÓLICO

Samira Fontes Domingos – samirafisica@yahoo.com.br

Centro Universitário UNA, Instituto Politécnico

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

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

Resumo. *Uma instalação solar denominada “Usina Solar do CEFET MG”, constituída por coletores concentradores do tipo cilindro parabólico com foco linear, está instalada nas dependências do campus II do CEFET MG, em Belo Horizonte -MG. Este trabalho tem como objetivo principal determinar as perdas térmicas e o coeficiente global de transferência de calor, através da análise em laboratório de uma amostra do Elemento absorvedor de calor dessa usina. Para isso, foram realizados três testes experimentais para o estudo da influência da temperatura da superfície absorvedora, da velocidade do vento e da temperatura do ar ambiente.*

Palavras-chave: *Perda de Calor, Concentrador Cilindro Parabólico, Coeficiente de perdas térmica.*

1. INTRODUÇÃO

Diante da abundante disponibilidade de energia solar no país a utilização da energia solar para o setor de maior consumo energético do Brasil – o setor industrial – é uma alternativa plenamente viável. A utilização desse sistema como gerador de energia elétrica têm crescido enormemente no mundo e sua implementação no Brasil é ainda mais vantajosa diante da disponibilidade de grandes áreas pouco habitáveis e ensolaradas.

Para a concretização da energia solar em geral e, especificamente, para a utilização dos concentradores cilindro parabólicos no setor industrial e na geração descentralizada, torna-se necessário o levantamento de informações confiáveis a respeito de suas características operacionais, como suporte a investidores e futuros fabricantes.

Portanto, o presente trabalho visa oferecer uma contribuição ao avaliar e caracterizar o tubo absorvedor do primeiro protótipo brasileiro de concentradores cilindro parabólicos, gerando um incremento na qualidade dos futuros sistemas de concentradores solares no país e ainda estabelece esse tipo de tecnologia como alternativa energética para aplicações industriais no país.

O coletor concentrador cilindro parabólico tem refletores cilindros parabólicos e contínuos. Nesse trabalho, o conjunto formado pelo tubo de vidro e pelo tubo absorvedor é denominado um elemento absorvedor de calor. Um fluido térmico (fluido comercial para altas temperaturas) ou água flui no interior do tubo absorvedor. Geralmente não se utiliza água como fluido térmico, pois a mesma requer pressurização do coletor solar quando opera em temperaturas superiores à 100 °C, o que pode trazer problemas de vazamento nas uniões rotativas e acoplamentos dos coletores. Fluidos térmicos comerciais são preferidos, pois não requerem pressurização do coletor sendo, portanto, recomendados nestes coletores. A radiação solar que chega à superfície óptica desse tipo de concentrador é direcionada para a linha focal onde está localizado o tubo de vidro.

Os coletores concentradores cilindros parabólicos, de acordo com Battisti et al (2007), representam 22 % da capacidade de coletores solares instalados no mundo, enquanto os coletores de placa plana representam 70% do total.

O Campus II do CEFET MG possui a única instalação solar do país (denominada “Usina Solar” do CEFET MG) formada por coletores concentradores cilindros parabólicos. O projeto da construção dessa Usina Solar faz parte de um Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em parceria com o CEFET MG.

A Usina Solar do CEFET MG é composta por três linhas de coletores cilindros parabólicos. A linha I tem dimensões diferentes das outras duas linhas (II e III) que possuem as mesmas dimensões. A Usina Solar está montada no eixo Norte-Sul e rastreia o sol no eixo leste oeste.

Um modelo numérico para o cálculo das perdas de calor de elemento absorvedor 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 (2003) 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 (2006).

O trabalho de Price (2006) utiliza o software SunLab para simular a performance térmica do elemento absorvedor de calor baseado no modelo Forristall (2003). Nesse trabalho há um estudo que simula as perdas térmicas do elemento absorvedor de calor em função da diferença de temperatura do vidro e da temperatura ambiente para o mesmo elemento absorvedor de calor com diferentes gases na região anular entre o tubo de vidro e o tubo absorvedor.

Testes experimentais foram conduzidos por Burkholder e Kutscher (2008) no Laboratório National Renewable Energy Laboratory (NREL) e, posteriormente, aprimorados e repetidos por Burkholder e Kutscher (2009) considerando

algumas amostras de elementos de calor, similares aqueles instalados nas usinas das SEGS. Esse elemento absorvedor de calor tem em sua região anular formada entre os tubos absorvedor e vidro, vácuo. 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.

2. MATERIAIS E METODOS

Neste trabalho denominamos elemento absorvedor de calor o conjunto formado pelo tubo absorvedor e pelo tubo de vidro do coletor concentrador cilindro parabólico.

Testes no Laboratório da Engenharia Mecânica do CEFET MG foram realizados (Domingos, 2010) com o propósito de medir as perdas térmicas dos Elementos de Calor dos coletores concentradores da Usina Solar do CEFET MG.

Dentro de um tubo de cobre foi inserida uma resistência de cartucho e em cada extremidade foram inseridas duas resistências microtubulares. A resistência elétrica de cartucho e as duas resistências microtubulares internas são responsáveis pelo aquecimento do elemento absorvedor de calor.

Nas extremidades externas do elemento absorvedor de calor foi adaptado um elemento isolante térmico.

Neste trabalho foram realizados três testes experimentais: (i) O Teste I foi realizado no ambiente não climatizado do Laboratório considerando o ar estagnado; (ii) O Teste II constou da inserção do elemento absorvedor de calor em um túnel de vento, construído e instalado nas dependências do Laboratório variando-se a velocidade do ar; (iii) O Teste III também constou da inserção do elemento absorvedor de calor no mesmo túnel de vento, entretanto, neste teste variou-se a temperatura ambiente.

As principais vantagens em se realizar esses testes em um ambiente interno de laboratório em relação à realização de teste de campo, em ambiente externo, são as seguintes:

- Melhor controle das variáveis envolvidas no experimento, como temperatura ambiente, módulo e direção da velocidade do ar e vazão de ar;
- A estabilidade e uniformidade das temperaturas do elemento absorvedor de calor, devido ao controle da potência elétrica das resistências elétricas;
- Medição em tempo real das perdas térmicas através da medição da potência elétrica das resistências elétricas e das temperaturas dos elementos da montagem;
- Nos Testes II e III, realizados em túnel de vento, foi controlada a velocidade do ar sobre o elemento absorvedor de calor, objetivando manter constante a velocidade e a direção do ar sobre o elemento absorvedor de calor;
- No Teste III, realizado em túnel de vento, foi instalado um sistema de climatização o que possibilitou controlar a temperatura do ar em escoamento, mantendo constante a mesma durante a realização do teste.

O elemento absorvedor de calor utilizado nos testes correspondeu fielmente aos Elementos de Calor utilizados nos concentradores solares da Usina Solar, sendo obtido de reserva de material disponível na Usina para eventuais substituições. Os componentes da montagem do elemento absorvedor de calor são todos novos, sendo que foi tomado o cuidado de limpá-los e montá-los de forma idêntica aos Elementos de calor da Usina Solar.

As resistências elétricas constituíram as únicas fontes de energia térmica dos experimentos, de forma a garantir que durante os testes sob regime permanente a perda de calor predominante do elemento absorvedor de calor fosse a energia térmica dissipada pelo Efeito Joule através das resistências elétricas. As perdas ou ganhos de calor através das duas extremidades do elemento absorvedor de calor foram minimizadas pelas duas resistências periféricas instaladas em cada extremidade e também por um isolante térmico instalado do lado externo em cada extremidade. Os balanços de energia realizados no elemento absorvedor de calor contabilizaram também as perdas ou ganhos de calor nas extremidades.

O presente trabalho procurou seguir a metodologia dos testes laboratoriais desenvolvida e utilizada no NREL Burkholder e Kutscher (2008) e Burkholder e Kutscher (2009). Entretanto, neste trabalho foram realizados testes adicionais não realizados no NREL, visando verificar experimentalmente o comportamento da perda de calor em função da variação da velocidade do vento e da temperatura do ar ambiente, utilizando-se um túnel de vento que foi fabricado e construído para esse fim.

2.1 TESTE I: Teste do UL – CONDIÇÃO CLIMÁTICA PADRÃO

Neste teste objetivou-se determinar a influência de temperatura da superfície absorvedora sobre a perda de calor do elemento absorvedor de calor para o ar ambiente do laboratório. As temperaturas do tubo absorvedor variaram de 70 °C a 250 °C, com incrementos de 20 °C. As condições climáticas do ar ambiente do laboratório não foram controladas, embora as flutuações da temperatura do mesmo tenham sido pequenas e o ar esteve praticamente estagnado devido ao ambiente ser fechado. Entretanto, a temperatura e a velocidade do ar ambiente do laboratório, foram medidas durante a realização de cada teste.

Para contribuir com a entrada em regime permanente as potências elétricas impostas às resistências microtubulares, instaladas nas extremidades do elemento absorvedor de calor, foram controladas tendo como base as

temperaturas medidas nessas extremidades. Este controle permitiu não apenas a estabilização das temperaturas nas extremidades do elemento absorvedor de calor como também a redução das perdas de calor nas mesmas. Durante cada teste a potência elétrica imposta à resistência de cartucho foi mantida constante pelo Varivolt e os onze pontos de temperatura no elemento absorvedor de calor foram medidos. Após a estabilização da temperatura da resistência de cartucho e das quatro resistências microtubulares, iniciou-se o teste que teve duração de 15 minutos e que constou da medição das potências elétricas impostas às três resistências (a de cartucho e as duas microtubulares localizadas mais internamente) e das temperaturas no elemento absorvedor de calor e ar ambiente. As medições foram realizadas em intervalos de tempo de cinco segundos, totalizando 180 medições de cada ponto por teste.

A preparação para o teste seguinte consistiu no aumento gradual da potência elétrica imposta à resistência de cartucho ajustando-se manualmente o Varivolt e baseando-se no valor da temperatura da resistência de cartucho. Após a estabilização dessa temperatura iniciou-se, o outro ciclo de medidas. Um total de dez ciclos de testes foram realizados, correspondendo a dez níveis de temperatura, com um intervalo de 20 °C. O primeiro teste foi realizado com a temperatura do tubo absorvedor mantida igual a 70 °C, enquanto que, o teste final foi realizado com a temperatura do mesmo igual a 250 °C, que correspondeu à temperatura máxima do fluido de trabalho obtida na Usina Solar do CEFET MG. Inicialmente, previu-se a realização de testes até a temperatura de 350 °C. Entretanto, após algumas tentativas, verificou-se a queima das resistências microtubulares para temperaturas superiores a 250 °C. Em altas temperaturas as resistências microtubulares se tornam muito aquecidas, conforme mencionado pelo fabricante, e a temperatura superficial pode exceder o valor admissível de 350 °C, acarretando a queima do componente. Inicialmente metodologia foi baseada nos testes realizados no NREL, ou seja, com intervalos de temperatura de 40 °C e temperatura inicial e 50 °C. Porém foi verificado que um intervalo menor para a faixa de temperatura pretendida (70 °C a 250 °C) descreveria com maior detalhe o comportamento das perdas de calor do elemento absorvedor de calor utilizado na Usina Solar do CEFET MG. O controle manual da potência imposta às resistências microtubulares através dos dimmers apresentou pouca estabilidade para a temperatura de 50 °C, pelo fato deste componente trabalhar com tensão muito próxima àquela do seu fundo de escala.

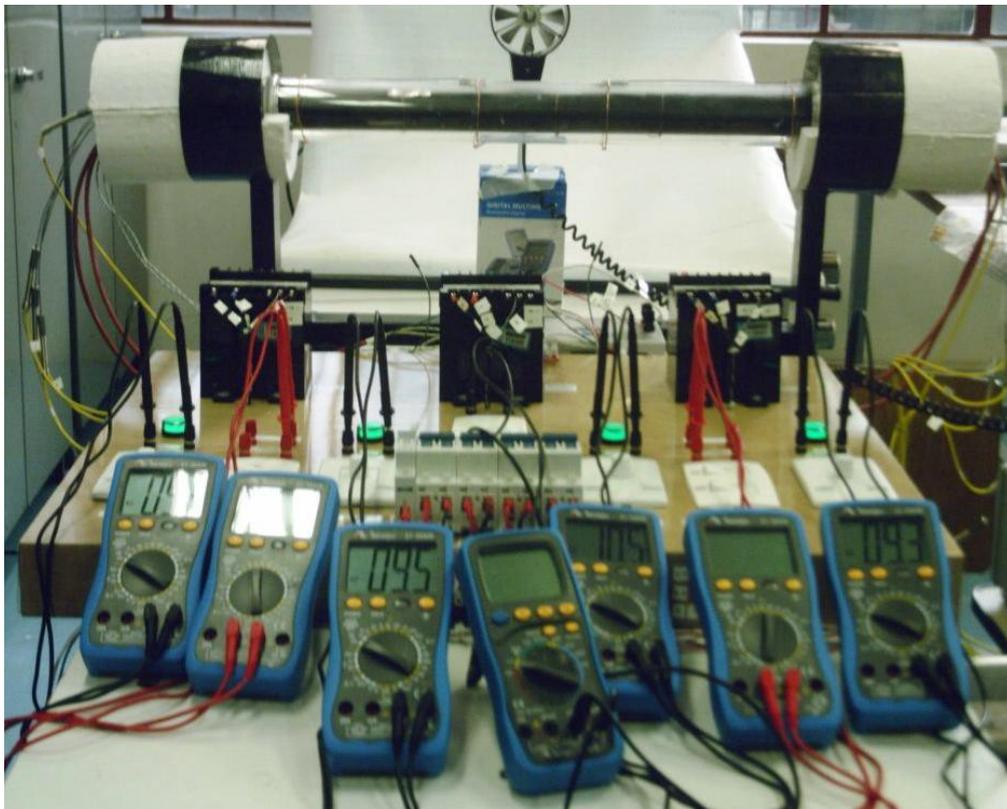


Figura 1 – Montagem do Teste I

A Fig. 1 mostra na parte superior um anemômetro que garante que não há correntes de ar no interior do laboratório. O elemento absorvedor de calor devidamente isolado nas laterais e logo abaixo o painel elétrico com os multímetros. A Fig. 2 mostra um organograma do Teste I.

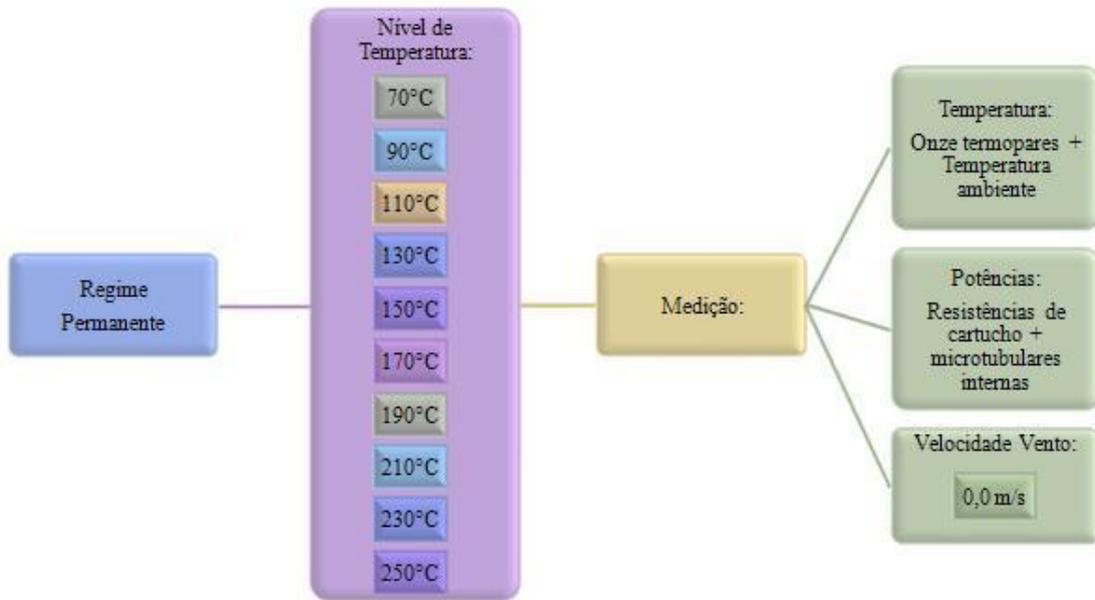


Figura 2 – Organograma do Teste I, para condição climática padrão.

2.2 TESTE II: Teste do UL – CONDIÇÃO VELOCIDADE DO VENTO VARIÁVEL

Neste teste objetivou-se determinar a influência de velocidade do vento sobre a perda de calor do elemento absorvedor de calor. Para simular o efeito do vento, ar foi introduzido no túnel de vento permanecendo na temperatura ambiente do laboratório. A velocidade do ar foi aumentada através da variação da rotação do exaustor bem como através da mudança da configuração do circuito dos exaustores. O escoamento do ar sobre o elemento absorvedor de calor foi fluxo cruzado. A velocidade do ar variou de a 1 m/s a 8 m/s, sendo também realizado um teste na velocidade máxima (9,2 m/s) alcançável pelos exaustores.

Os procedimentos utilizados para constatação da entrada em regime permanente e medição das variáveis em regime permanente foram similares àqueles descritos no item anterior, relativo ao Teste I.

Os testes, conforme ilustra o organograma mostrado na Fig. 3, contemplaram as diferentes velocidades do ar para temperaturas do tubo absorvedor variando de 70 °C a 250 °C, com intervalos de 20 °C.

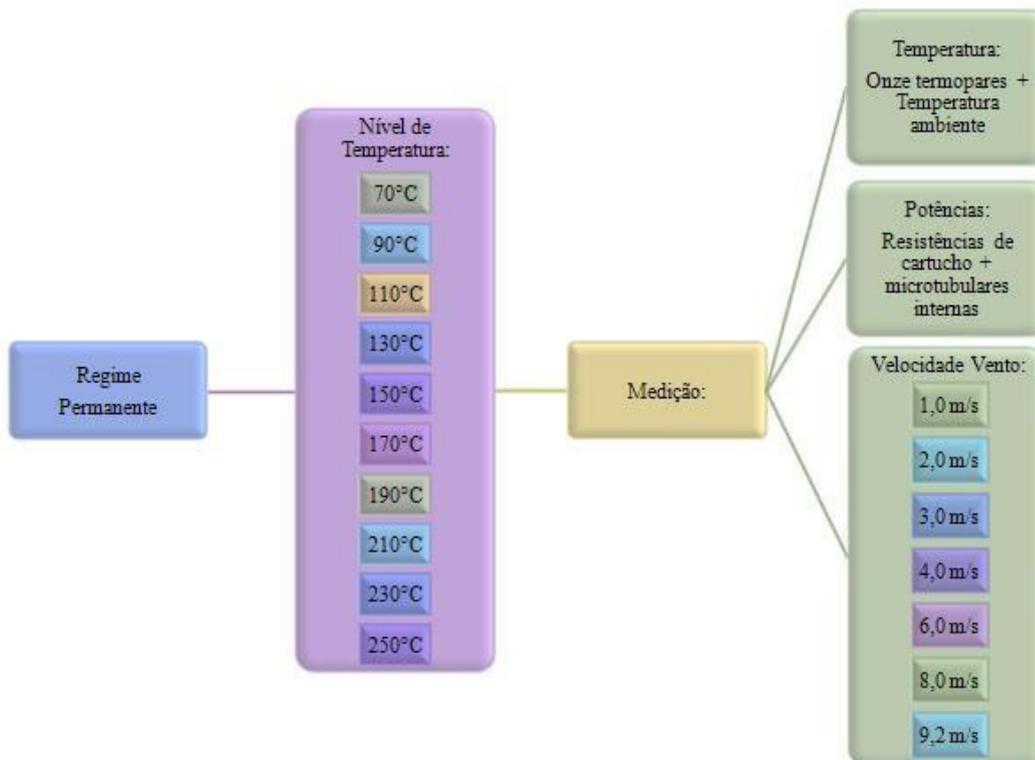


Figura 3 – Organograma do Teste II, para condição velocidade do vento variável.

Para medição da velocidade do ar construiu-se na seção de teste do túnel de vento uma malha de medições, o número de nodos da malha foi selecionado de forma a contemplar quatro medições no sentido da largura e duas medições no sentido da altura, totalizando oito pontos de medição. Para facilitar o acesso do sensor optou-se por deixar um espaçamento entre as regiões dos nodos de medição e uma distância de entre e as paredes do túnel de vento.

O Teste II difere do Teste I, pois o elemento absorvedor de calor está inserido em um Túnel de vento com velocidade variável para cada um dos dez níveis de temperatura do elemento absorvedor de calor ao qual, a velocidade do vento foi variada em sete níveis.

2.3 TESTE III: Teste do UL – CONDIÇÃO TEMPERATURA AMBIENTE VARIÁVEL

Neste teste objetivou-se determinar a influência da temperatura do ar ambiente sobre a perda de calor do elemento absorvedor de calor. Para simular o efeito dessa temperatura, ar numa dada temperatura controlada foi introduzido no túnel de vento mantendo-se constante a sua velocidade durante cada teste.

Um sistema de climatização, composto de duas unidades de condicionamento de ar do tipo “Ar Condicionado de Janela” (ACJ), conforme apresenta a Fig. 4.

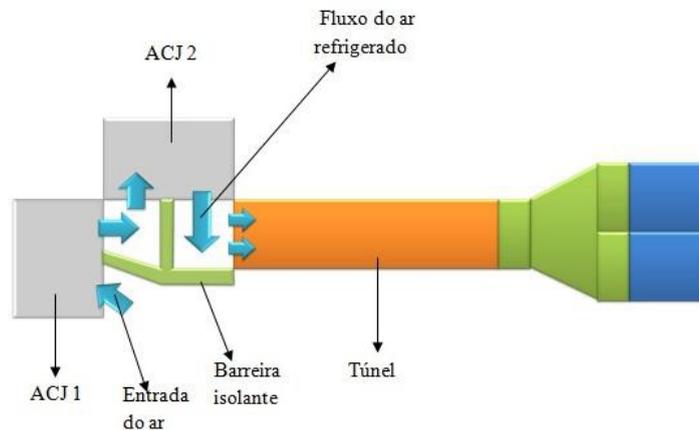


Figura 4 – Montagem do Teste III

A referida montagem, ilustrada no organograma da Fig. 5, possibilitou reduzir a temperatura do ar ambiente do laboratório para um valor mínimo de aproximadamente 18 °C, considerando-se a velocidade do ar de 2,0 m/s. A temperatura inferior em 18,0 °C esteve em média 12,0 °C abaixo ao valor do Teste II, para a mesma velocidade de 2,0 m/s. O procedimento de medição da velocidade do ar foi similar ao usado no Teste II, sendo igual à média aritmética das velocidades dos nodos da malha. Novamente, a temperatura do absorvedor que variou de 70 °C a 250 °C, com incrementos de 20 °C. Portanto, foi possível obter dados experimentais que possibilitaram avaliar as perdas térmicas do elemento absorvedor de calor para duas temperaturas do ar ambiente, de 18 °C e 30 °C, considerando a velocidade do ar igual à 2 m/s.

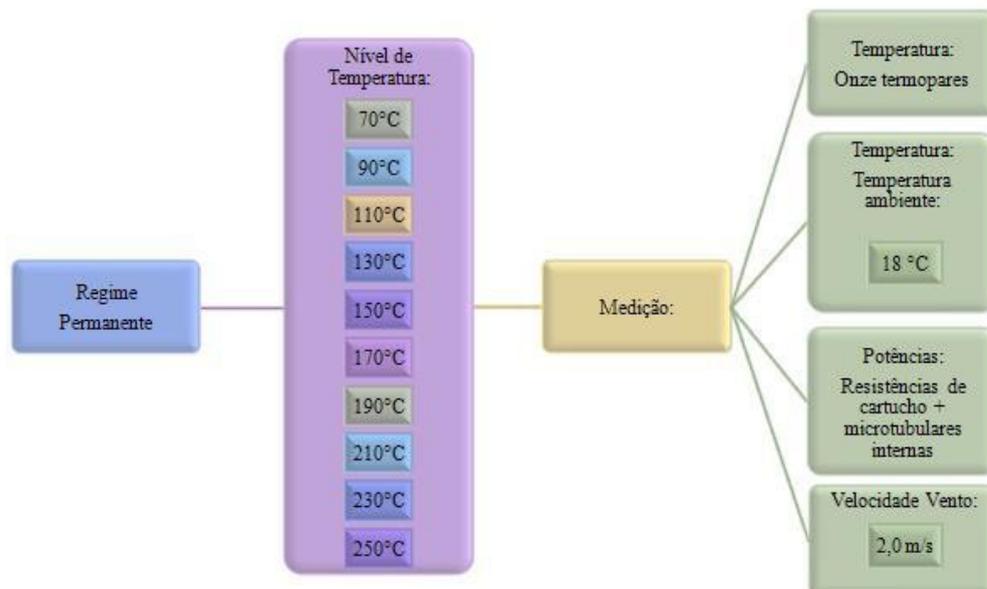


Figura 5 – Organograma do Teste III, para condição temperatura ambiente variável.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras seguintes ilustram a evolução das perdas de calor e do coeficiente global das perdas térmicas em função das diferenças de temperaturas, considerando todas as velocidades e também a condição I de ar estagnado.

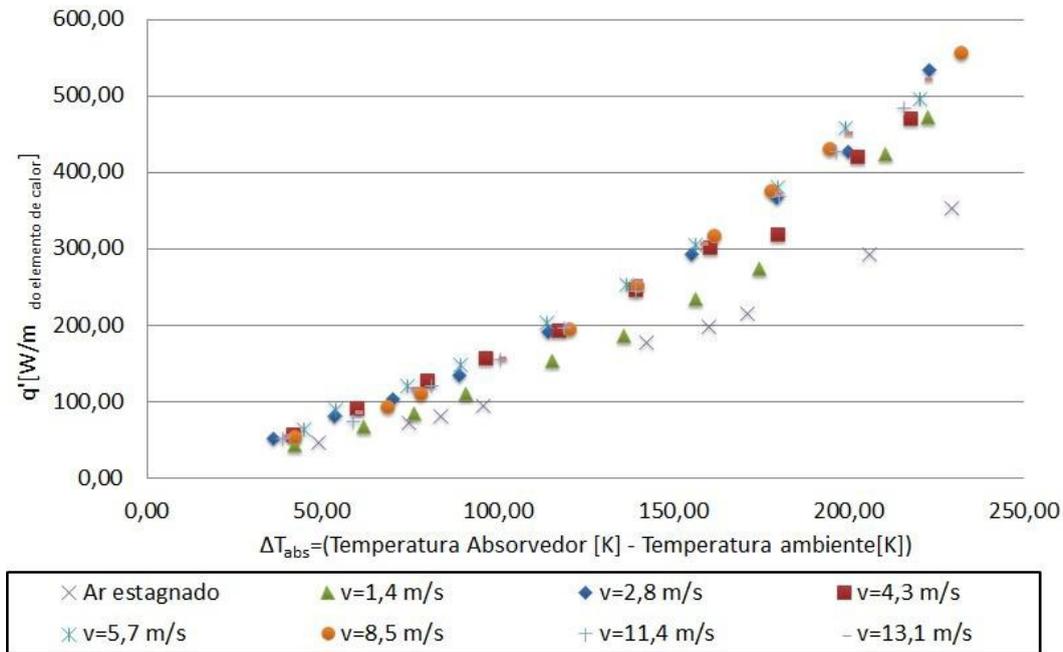


Figura 6 – Perda de calor para diferentes velocidades do ar

Na Fig. 6 percebe-se que as perdas térmicas aumentam até um valor limite de velocidade, sendo que a partir desta velocidade as perdas térmicas parecem permanecer inalteradas ou com variação mínima. A condição para o ar estagnado e para a velocidade de 1,4 m/s verifica-se uma menor perda térmica. Para as velocidades maiores as perdas são similares. Como esse gráfico está em função da temperatura do absorvedor, verifica-se que essa variável está sujeita a uma pequena interferência em relação à velocidade do vento. Conclui-se que analisar as perdas térmicas em função da temperatura do absorvedor torna-se inviável.

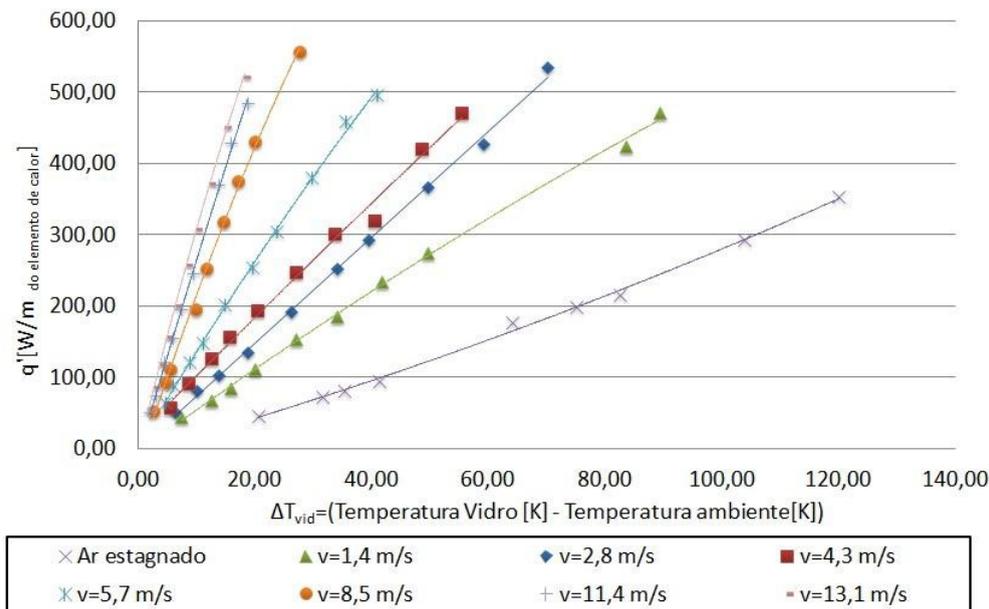


Figura 7 – Perda de calor para diferentes velocidades do vento em relação à temperatura do vidro.

A Fig. 7 resume o comportamento das perdas térmicas de uma maneira bem clara. Inicialmente a ausência de velocidade do vento e posteriormente a menor velocidade do vento, de 1,4 m/s apresenta uma menor perda térmica. Seguida da velocidade de 2,8 m/s e subsequentemente as velocidade superiores onde se observa um aumento das perdas

térmicas como o trabalho de Price (2006) previu. A Fig. 7 demonstra claramente o aumento das perdas térmicas com o aumento da velocidade, já que é utilizada a temperatura do vidro como parâmetro. Pois é essa variável que terá uma mudança abrupta e direta com a variação da velocidade do vento. A diminuição da temperatura do vidro, com o aumento da velocidade diminui as perdas por radiação da superfície do vidro para o céu além de diminuir as perdas também por convecção, justificando as perdas térmicas.

Os testes da categoria III foram realizados também no interior do túnel de vento, mantendo-se, entretanto, fixa a velocidade do ar em 2,8 m/s. Essa velocidade foi selecionada de forma arbitrária embora represente bem velocidades típicas encontradas em locais onde estão instalados coletores solares. A montagem constou da instalação de dois aparelhos portáteis de ar condicionados, do tipo janela que foram conectados em paralelo. O ar resfriado era insuflado dentro do túnel de vento, onde estava inserido o elemento absorvedor de calor. A montagem permitiu a redução da temperatura em valores abaixo das temperaturas típicas de verão em regiões tropicais.

Os testes realizados nesta categoria constaram de apenas um conjunto de testes para uma temperatura do ar ambiente variando na faixa de 16,8 °C a 20,9 °C, com valor médio em torno de 19 °C.

O Teste III pode ser comparado com o Teste II para o mesmo nível de velocidade do vento, como é ilustrado na Fig. 8, a seguir.

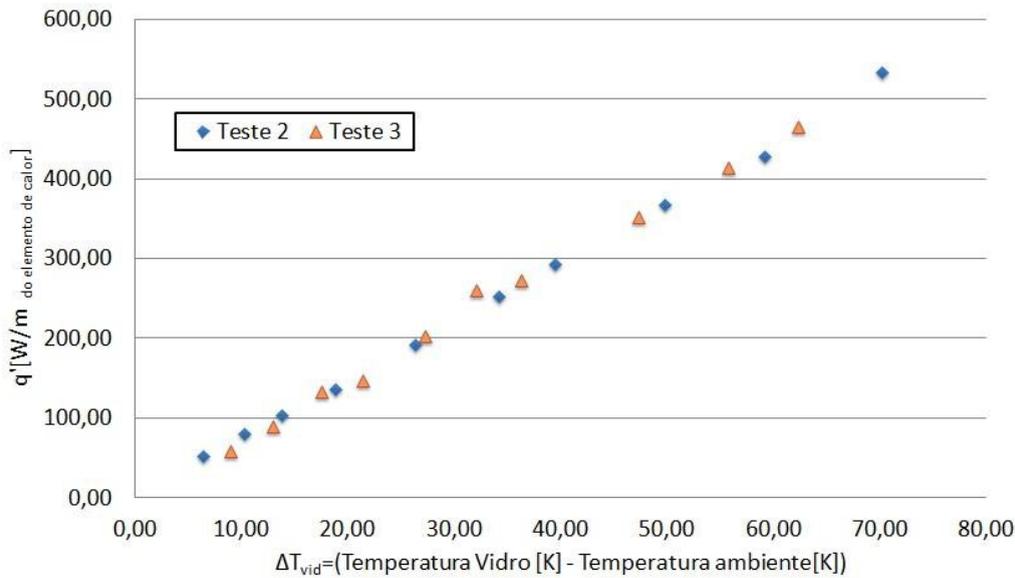


Figura 8 – Comparação entre as perdas de calor em diferentes níveis de temperatura ambiente.

A análise da Fig. 8 demonstra que as perdas térmicas têm pouca influência em relação à temperatura ambiente. A tendência geral das curvas é bem próxima. As perdas térmicas têm valores comuns, para temperaturas ambientes muito diferentes.

Nessa comparação, a diferença da temperatura ambiente é da ordem de 10°C.

4. CONCLUSÃO

A partir do Teste I em relação ao Teste II, verificou-se que quando o elemento absorvedor de calor está em uma região de ar estagnado, sem vento, as perdas térmicas são menores do que quando há vento. A partir do Teste II, verificou-se ainda que as perdas térmicas aumentam com o aumento da velocidade do vento na parte externa do elemento absorvedor de calor. A partir do Teste III em relação ao Teste II, verificou-se que a temperatura ambiente não influencia nas perdas térmicas, mesmo o elemento absorvedor de calor não sendo do tipo evacuado.

Com o estudo das perdas térmicas em função da temperatura do tubo absorvedor, da temperatura do tubo de vidro, temperatura ambiente e velocidade do vento, foi possível construir uma correlação experimental que gera o valor instantâneo das perdas térmicas apenas se conhecidos a temperatura ambiente, a temperatura do tubo de vidro e a velocidade do vento na usina do CEFET MG. Dessa forma, é possível verificar de forma simples e rápida se uma modificação construtiva na usina terá uma relevância significativa para a diminuição das perdas térmicas, dispensando novos testes experimentais.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPEMIG pelo apoio financeiro, ao CEFET por viabilizar essa pesquisa e ao professor Poluceno por permitir o acesso aos componentes da usina.

REFERÊNCIAS

- Battisti, R., Drigo S., Vannoni C. Solar Heat for Industrial Processes: Existing Plants and Potential for Future Applications. European Solar Thermal Energy Conference - ESTEC, Germany (Freiburg) ,3Aufl, 31-38 p, 2007.
- Burkholder, F., C. Kutscher. *Heat-Loss Testing of Solel's UVAC3 Parabolic Trough receiver*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2008. 14 p. Relatório.
- Burkholder, F., C. Kutscher. Heat Loss testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver. Colorado: National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2009. 58p. Relatório.
- Domingos F. S., 2000. Avaliação Térmica Experimental do Elemento de Calor dos Concentradores Parabólicos da Instalação Solar do CEFET MG, Tese de Mestrado, PPMEE, CEFET-MG, Belo Horizonte.
- Forristal, R. *Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, Technical report, 2003. Relatório.
- Price, H., Forristal, R., Wendelin T., Lewandoswski. Field survey of parabolic trough receiver thermal performance. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, Technical report, 2006. Relatório.

METODOLOGY FOR CHECK THE HEAT LOSS OF PARABOLIC THROUGH' HEAT COLLECTION ELEMENT

Abstract. *A solar energy plant named “Usina Solar do CEFET MG”, composed by collectors of the parabolic through type, is located inside the CEFET MG campus II, in Belo Horizonte, Minas Gerais. The main objective of this work is to define the thermal loss and the global coefficient heat transference, based on a laboratory analysis of a Heat Collection Element sample from this installation. To do this, three experimental tests were realized to study the absorbent surface temperature, the speed of wind and the environment air temperature influences*

Key words: *Heat Loss, Parabolic Trough Receiver, Thermal loss coefficient.*