

DISPOSITIVO PARA MEDIR O DIFERENCIAL DE TEMPERATURA EM COLETORES SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

T.F. Manea, F. N. Rosa, A. L. Perin, A. Krenzinger
Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL-UFRGS)
Tel. +55(51)3308-6841 e-mail: tiagomanea@mecanica.ufrgs.br, fabio.rosa@mecanica.ufrgs.br,
alperin@projelum.com.br, arno.krenzinger@ufrgs.br

RESUMO: A norma brasileira NBR 15747-2 determina alta precisão nas medidas da temperatura em ensaios de coletores solares para aquecimento de água. Para atender esta especificação foi necessário o estudo, projeto, análise, montagem e calibração de um dispositivo para medição do diferencial de temperatura entre entrada e saída do fluido de trabalho em coletores solares com a precisão especificada. Este dispositivo é composto por um circuito baseado na ponte de Kelvin que utiliza sensores de platina, resistores de alta precisão e é alimentado por uma fonte de alta estabilidade.

Palavras chave: coletor solar, temperatura, ponte de Kelvin, diferencial, Pt100

INTRODUÇÃO

O aquecimento de água para consumo doméstico no Brasil utiliza-se em grande parte de energia elétrica. Esta cultura de uso excessivo da eletricidade para este fim ocasiona de imediato, problemas referentes à geração de energia e superdimensionamento das linhas de transmissão, e em longo prazo problemas ambientais quando a energia não é vinda de uma fonte renovável. O aquecimento de água utilizando a energia solar é sem dúvida uma forma alternativa para obter energia térmica com impactos menores ao meio ambiente, e a sua empregabilidade no aquecimento de água para uso doméstico já é algo bastante comum em alguns países, porém na América Latina de uma forma geral esta tecnologia ainda está se difundindo.

O sistema de aquecimento de água residencial utilizando energia solar pode ser economicamente atrativo, pois se dimensionado corretamente conforme o consumo e a localidade, a substituição do sistema de aquecimento elétrico pelo solar tem um retorno econômico em curto ou em médio prazo. O dimensionamento destes sistemas passa pela seleção dos coletores, que por sua vez devem ter seu desempenho térmico determinado dentro de rigorosos parâmetros que são especificados por normas. Neste contexto torna-se importante inserir dentro destas regras normativas para avaliar adequadamente estes coletores e poder realizar comparações sobre o comportamento de diferentes marcas, tipos, e inclusive tecnologias de coletores.

A incerteza na medida da eficiência de um coletor é estimada a partir da combinação das incertezas associadas às medidas de diferença de temperatura entre entrada e saída do coletor, radiação solar incidente no seu plano e a vazão de água que está sendo aquecida por ele. A figura 1 ilustra a relevância de cada uma destas medidas na determinação do desempenho de um coletor solar, considerando-se incertezas máximas estipuladas na norma brasileira NBR 15747-2 (ABNT, 2009).

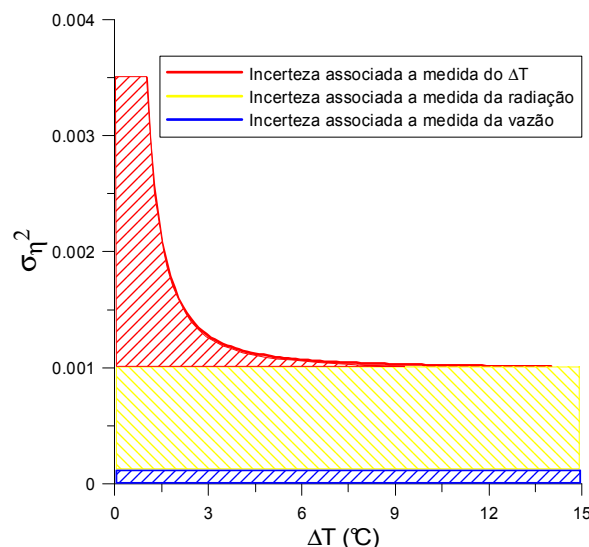


Figura 1: incertezas associadas na determinação da eficiência do coletor.

A figura 1 deixa clara a influência significativa da incerteza na medição da diferença de temperatura que aumenta drasticamente para baixas diferenças de temperatura.

A norma brasileira NBR 15747 que substituiu a norma anterior NBR 10184 exige para obtenção de curvas de desempenho térmico de coletores solares para aquecimento de água uma precisão na medida da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor menor que $0,05^{\circ}\text{C}$. Existem vários tipos de sensores para medida de temperatura disponíveis comercialmente, porém, a grande maioria resulta em medições com incerteza maior do que a requerida pela norma, o que motivou este estudo em busca de um dispositivo que corresponda ao requerido.

PROJETO E MONTAGEM

Uma forma simples de medir a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor, pode ser feita utilizando sensores de temperatura absolutos instalados na entrada e na saída do coletor, e a partir destes valores, subtraindo uma temperatura da outra, tem-se a diferença. Termistores podem ser muito sensíveis, mas tem pouca estabilidade, podendo variar décimos de graus em alguns meses (Jones, 1985). Termopares também necessitam freqüente de calibração e sua baixa sensibilidade exige muita proteção contra ruídos eletromagnéticos. Os sensores de resistência de platina são mais estáveis e considerados de alta qualidade para a determinação de temperatura. Este método, porém, com sensores resistivos de platina comerciais, não atinge a precisão especificada pela norma, pois de acordo com a norma IEC60751 os sensores de platina tipo Pt100 classe A possuem uma incerteza padrão de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}$ na faixa de -50°C a 50°C , não alcançando o grau estabelecido pela norma NBR 15747.

Com base neste fato, realizou-se uma análise de um dispositivo para medir o diferencial de temperatura com alta precisão e sensibilidade para ser utilizado numa bancada para ensaios de eficiência e estudos térmicos de coletores solares montada no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL-UFRGS), descrita em Rosa et al. (2011).

Entre os métodos possíveis está a utilização de um circuito de resistências, como a ponte de Wheatstone figura 2(a) ou a ponte de Kelvin, figura 2(b).

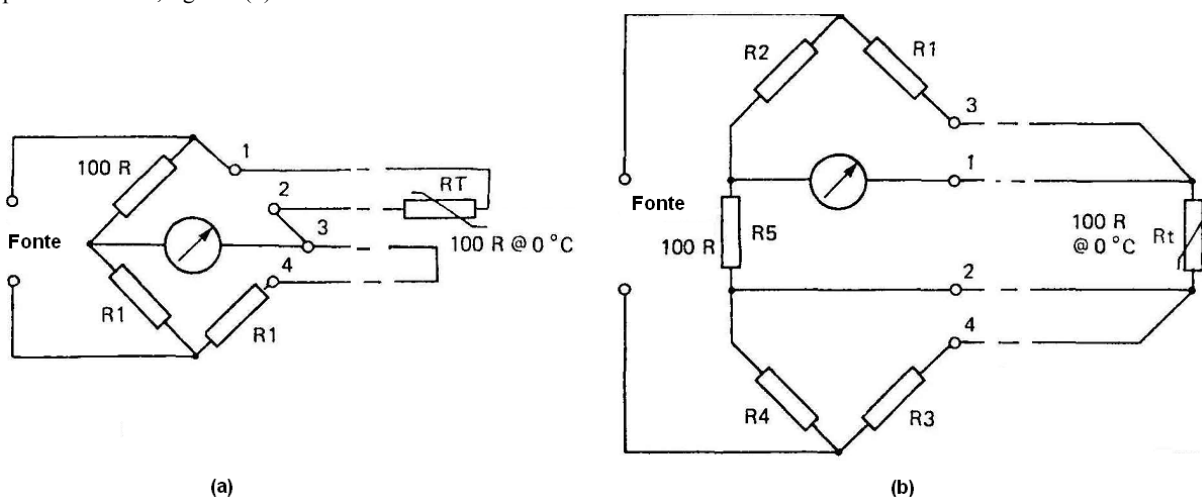


Figura 2: (a) Ponte de Wheatstone; (b) Ponte de Kelvin. Fonte: Jones (1985).

Nestes circuitos a variação de tensão medida no voltímetro varia com a diferença de resistência entre os resistores, ou seja, no caso da ponte de Kelvin, se R1, R2, R3 e R4 forem idênticos entre si a tensão sobre o medidor depende da diferença de resistência entre o sensor R_t e o resistor R5. Se ao invés de um resistor fixo, fosse utilizado outro sensor no lugar de R5, ter-se-ia um dispositivo que mediria a diferença de temperatura entre os sensores. Se os dois sensores estiverem à mesma temperatura, a diferença de resistência teórica será 0 ohms, e portanto ter-se-á uma medida de tensão teoricamente nula (0 Vdc). Conforme a temperatura varia em um dos lados da ponte, a resistência deste lado também varia e, portanto, a saída da ponte apresenta uma leitura de tensão diferente de 0 Vdc e proporcional à diferença de temperatura entre os dois sensores.

Estes circuitos além de medirem temperatura com maior precisão, também são compensadores devido a ligação a 4 fios, o que anula as diferenças devidas ao comprimento dos cabos, permitindo medidas a longas distâncias.

O circuito do dispositivo foi construído com base na ponte de Kelvin como mostra a figura 3, este possui quatro sensores de temperatura de platina Pt100 classe A, quatro resistores de $250\ \Omega$, uma fonte de 2,5V e cabos de ligação.

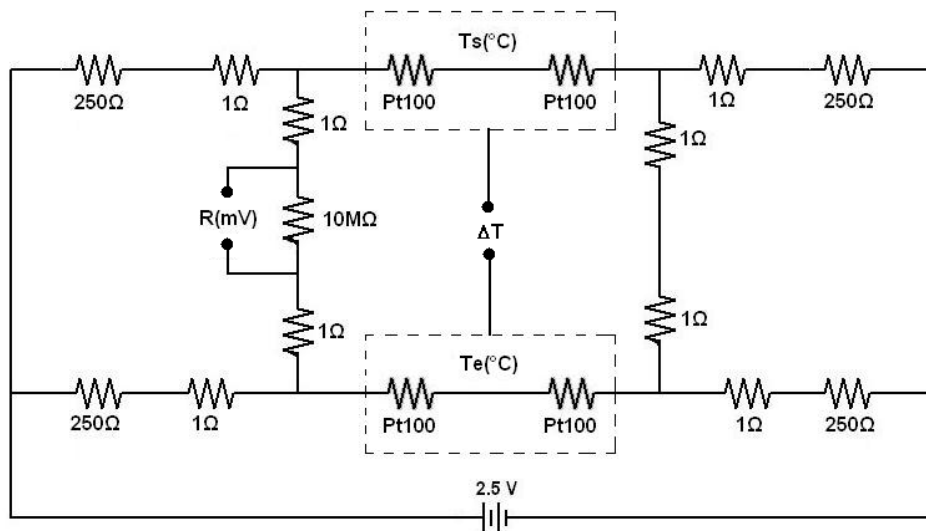


Figura 3: Circuito da ponte de kelvin modificada.

Os resistores da ponte têm alta precisão, com tolerância de 0,05 %, e um baixo coeficiente de temperatura, 13 ppm/°C segundo especificações do fabricante. A resistência de 1 Ω foi atribuída aos cabos somente para realizar a análise teórica. A medida de tensão da resposta do circuito é feita com instrumento com impedância interna de 10 MΩ.

Os sensores de temperatura foram instalados em capsulas de passagem de água conforme mostra a figura 4(a). Estas capsulas são instaladas uma na entrada e outra na saída do coletor, onde estarão envolvidas por um material de baixa condutividade térmica.

As cápsulas permitem aos sensores Pt100 ficarem no meio da corrente de água sem contato direto, encapsulados com baixa inércia térmica como mostra o item 1 na figura 4(b). A figura 4(c) mostra um corte transversal da cápsula, onde o item 2 indica o sentido do fluxo de água, e o item 3 o posicionamento dos sensores. Foram utilizados três sensores de temperatura, dos quais, os dois das extremidades estão ligados em série com objetivo se obter uma média mais uniforme da temperatura. Estes estão conectados ao circuito do dispositivo para medir a diferença de temperatura da água entre entrada e saída do coletor solar. O sensor central mede a temperatura absoluta do fluido.

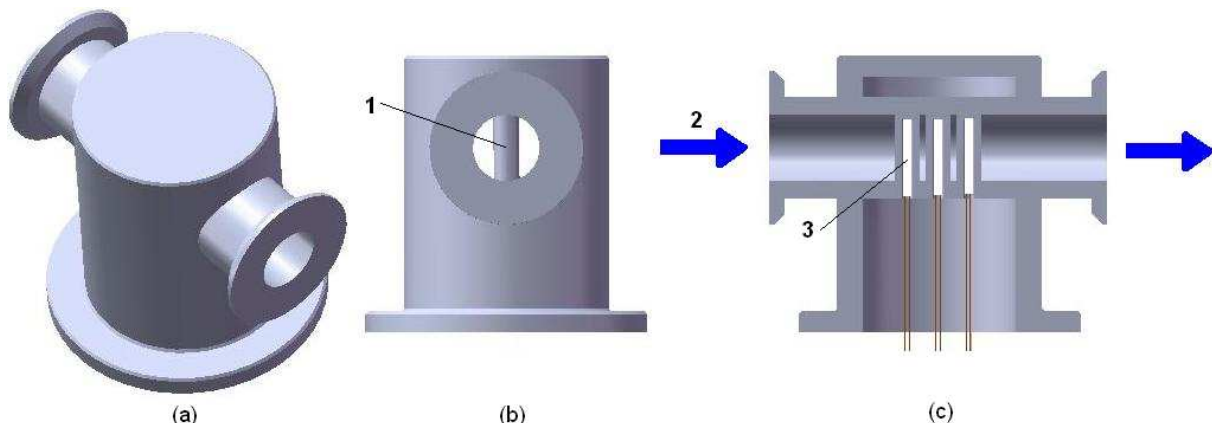


Figura 4: (a) vista em três dimensões da cápsula; (b) vista lateral; (c) vista de corte mostrando os sensores.

Foi necessário construir uma fonte de alta estabilidade para alimentar o circuito da ponte, pois a grande maioria das fontes comerciais não tem a estabilidade requerida pelo projeto. A fonte de alimentação foi construída com um circuito de referência de tensão da marca Maxim modelo MAX6133, com coeficiente de temperatura de 3ppm/°C, capacidade de saída de corrente 15 mA e regulação de 0,05 mV/mA.

ANÁLISE TEÓRICA

Para determinar o procedimento de calibração fez-se necessária uma análise teórica do dispositivo para simular seu comportamento em situações de operação real, em que um sensor estará a uma temperatura T_e na entrada do coletor e o outro a uma temperatura mais elevada T_s na saída. Para tanto foram aplicadas as leis de Kirchhoff no circuito do dispositivo mostrada na figura 3. Segundo estas leis o somatório das tensões sobre os resistores em uma malha fechada é igual a zero e o somatório das correntes em cada nó do circuito também é nula. Com este equacionamento foi possível traçar uma curva simulando uma variação da temperatura ΔT entre os sensores e observar a consequente resposta do dispositivo R como mostra a figura 5.

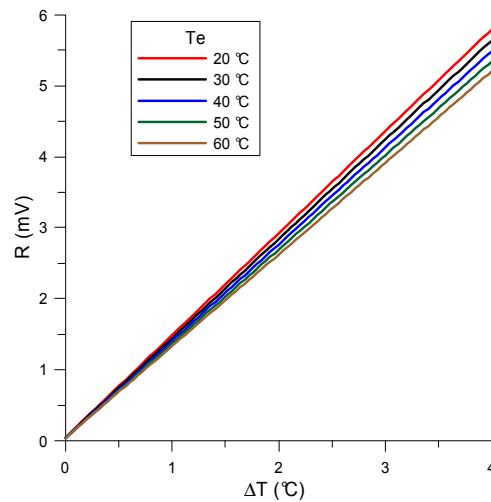


Figura 5: Resposta do dispositivo em função da diferença de temperatura para algumas faixas de temperatura.

Pode-se observar com esta análise que a resposta do dispositivo é linear com a diferença de temperatura entre os sensores, e que uma reta com coeficiente angular α e termo independente β , para cada temperatura de entrada, seria o melhor ajuste de calibração do dispositivo.

A notável variação da inclinação das retas à medida que a temperatura de entrada aumenta levou a outra análise, desta vez sobre o comportamento do coeficiente angular α destas curvas com a temperatura de entrada no coletor, que está mostrada na figura 6.

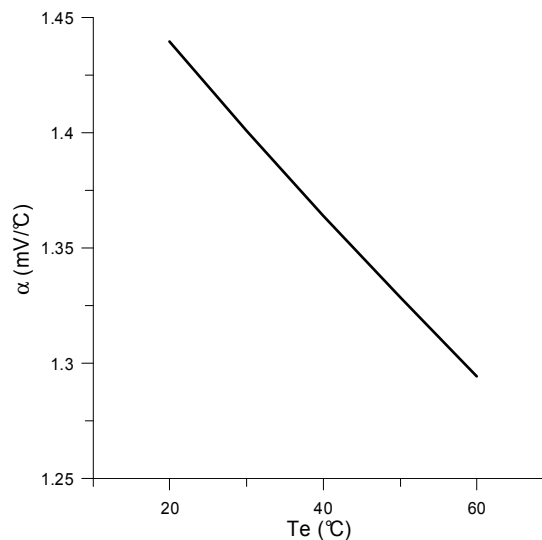


Figura 6: variação do coeficiente angular com a temperatura de entrada.

Observando que o coeficiente angular decresce linearmente com a temperatura de entrada no coletor é possível ajustá-lo com a equação de uma reta dependente da temperatura de entrada.

Além da avaliação do coeficiente angular é importante também analisar o comportamento do termo independente β das retas de resposta do dispositivo. Este coeficiente representa a tensão de resposta da ponte quando a diferença de temperatura entre os sensores é zero. Seus valores teóricos são maiores que zero devido à influência da resistência do voltímetro inserida no circuito, porém nas faixas analisadas estes valores são suficientemente similares para que se adote um único valor médio. Este coeficiente depende também da diferença de resistência entre os componentes do circuito.

Desta forma tem-se uma equação teórica geral de resposta do dispositivo em função da diferença de temperatura entre os sensores para cada temperatura de entrada, descrita na equação 1.

$$R = \alpha(T_e)\Delta T + \beta \quad (1)$$

onde R é a resposta do dispositivo, α e β são os coeficientes de ajuste para a temperatura de entrada T_e , e ΔT é a diferença entre as temperaturas dos sensores.

CALIBRAÇÃO

Procedimento.

Conhecendo o comportamento teórico do dispositivo pode-se realizar a sua calibração da seguinte forma: circulou-se água a temperatura constante e controlada por dois equipamentos de banho termostático, um mantendo os sensores que ficaram na entrada do coletor a uma temperatura T_e e outro que manteve os sensores da saída a uma temperatura de maior valor T_s .

Estabeleceram-se três pontos de diferença de temperatura entre os dois sensores e mediu-se a tensão de resposta do dispositivo. Variou-se a diferença de temperatura entre os sensores de 1 a 3 °C com as temperaturas de entrada estabelecidas aproximadamente em 20, 30, 40, 50 e 60°C.

As temperaturas T_e e T_s foram medidas nos equipamentos de banho termostático utilizando o mesmo termômetro de precisão para cada faixa de temperatura, diminuindo assim a influência da medida da temperatura na incerteza do dispositivo. O tempo de estabilização de cada ponto da mesma faixa foi de 20 minutos, e na troca de faixa de 50 minutos.

Instrumentação.

Os termômetros utilizados para a medida de temperatura nas faixas de 20 e 30°C são da marca Incoterm com resolução de 0,01°C. Para as faixas de 40, 50 e 60 °C foram utilizados termômetros da mesma marca, porém, com resolução de 0,05 °C. A tomada de dados foi feita por um equipamento de aquisição da marca Agilent, modelo 34970A ligado a um computador para armazenamento dos dados. A aquisição de dados foi realizada com intervalos de dez segundos a cada medida, capturando-se os valores de tensão da resposta do dispositivo e também o valor de tensão da fonte de alimentação. Os equipamentos de banho térmico são da marca Lauda modelos E200 e MG-M3, que mantêm a temperatura do banho com uma estabilidade de 0,01 e 0,05 °C respectivamente.

RESULTADOS

Determinação dos coeficientes.

O procedimento de calibração foi repetido quatro vezes e para cada uma foi traçado uma curva correspondente expressando a diferença de temperatura entre os sensores versus a resposta do dispositivo, para faixas de 20 a 60°C como mostra a figura 7(a) correspondente a um destes procedimentos. A figura 7(b) mostra a variação experimental do coeficiente angular α com a temperatura de entrada T_e , bem como a reta de ajuste correspondente aos quatro procedimentos experimentais.

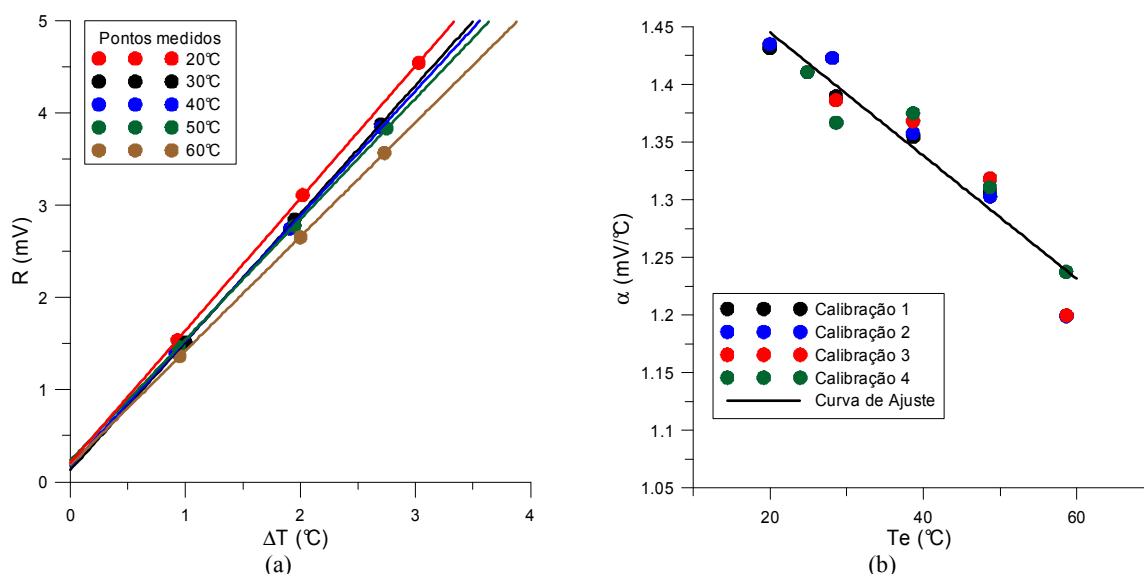


Figura 7: (a) pontos medidos e curvas de tendência para uma das calibrações; (b) Variação experimental do coeficiente α com a T_e para os quatro procedimentos de calibração.

Uma reta de tendência que ajusta os coeficientes angulares das curvas obtidas experimentalmente com a temperatura de entrada foi considerada como fonte para determinar o coeficiente $a(T_e)$ da curva de calibração do dispositivo. O coeficiente β foi estimado como sendo a média dos coeficientes de cada curva. Desta forma tem-se determinados os dois coeficientes de ajuste da resposta do dispositivo que pode ser expressa pela equação 2.

$$R = (-0.005343 T_e + 1.552) \Delta T + 0.1907 \quad (2)$$

Análise de incerteza do dispositivo.

A incerteza associada às medidas realizadas com o dispositivo de medição de diferenças de temperatura é obtida através da combinação de incertezas de leitura do sistema de aquisição de dados com incerteza da calibração. A incerteza de calibração

foi considerada como a combinação da incerteza na medida da diferença de temperatura com a incerteza no ajuste das curvas experimentais de calibração. Desta forma a incerteza associada à medida do dispositivo W_D pode ser expressa pela equação 3.

$$W_D = \sqrt{(W_S)^2 + (W_{\Delta T})^2 + (W_A)^2} \quad (3)$$

onde W_S é a incerteza do sistema de aquisição de dados, $W_{\Delta T}$ é a incerteza na medida da diferença de temperatura e W_A é a incerteza do ajuste das curvas dos coeficientes.

A incerteza da leitura de tensão realizada com voltímetro com resolução de seis dígitos e meio e considerando a sensibilidade média do dispositivo de 1,3mV/°C é de 0.005°C. A incerteza associada à medida da diferença de temperatura foi considerada igual à resolução do termômetro de 0,01 °C, pois como o mesmo termômetro foi utilizado para medir as duas temperaturas a incerteza associada à diferença entre elas depende apenas da linearidade de expansão do mercúrio, da capilaridade do tubo de vidro e do posicionamento da escala impressa no termômetro de vidro. Aplicando a equação de resposta do dispositivo nos pontos medidos obteve-se um desvio médio quadrático de 0,040 °C, que foi considerado como sendo a incerteza devido ao ajuste das curvas dos coeficientes. Com estas considerações o dispositivo tem uma incerteza na medida da diferença de temperatura entre os sensores de 0,042 °C.

CONCLUSÕES

O circuito composto de fonte e ponte de Kelvin modificada apresentou um resultado satisfatório e de acordo com o esperado para a faixa de operação a que se destina. Após a realização dos ensaios de calibração e análise da propagação de erros, foi possível determinar que o conjunto de circuito e sensores atende às especificações da norma brasileira NBR 15747-2, permitindo medições de diferenças de temperatura com uma incerteza inferior a 0,05°C. Portanto, o mesmo é adequado para as medições diferenciais de temperatura entre a entrada e a saída do coletor para os intervalos de temperatura considerados na calibração. A calibração foi efetuada dentro da faixa de operação da maioria dos coletores solares térmicos e dentro da faixa de operação dos ensaios de desempenho térmico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro em auxílio à pesquisa e em bolsas por parte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Norma ABNT NBR 15747-2 (2009). Sistemas Solares térmicos e seus componentes – Coletores Solares, parte 2: Métodos de ensaio.
- Norma IEC60751 (1995). Industrial platinum resistance thermometer sensors.
- Jones E. B. (1985). Instrument Technology, Vol.2: measure temperature and chemical composition, 4ª edição, Butterworths, London.
- Rosa F. N., Manea T.F., Krenzinger A., Cardoso I. A. (2011). Projeto e construção de uma bancada de testes para coletores solares no LABSOL-UFRGS. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.

ABSTRACT: The Brazilian standard NBR 15747-2 determines high precision in the temperature measurements in testing water heating solar collectors. In order to achieve this specification it was necessary to study, project, analyze, build and calibrate a device to measure the temperature difference between the inlet and outlet of work fluid in the solar collector with the required precision. This device is assembled with a circuit based on the Kelvin bridge using platinum sensors, high precision resistors and fed by a high stability power source.

Keywords: solar collector, temperature, Kelvin bridge, Pt100, differential.