

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR BALANÇO ENERGÉTICO

por

Gabriel Leser Donato

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2014

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR BALANÇO ENERGÉTICO

por

Gabriel Leser Donato

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Francis França

Prof. Nattan Caetano

Profa. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 28, Novembro de 2014.

- DEDICATÓRIA: Este trabalho é integralmente dedicado a minha família, o que inclui pai, mãe e namorada, os quais são os principais responsáveis por minha motivação e dedicação.

- AGRADECIMENTOS: Agradeço, com imenso carinho, aos professores Fernando Marcelo Pereira, Thamy Cristina Hayashi e Paulo Smith Schneider, os quais foram presentes e fizeram a diferença em minha formação acadêmica.

DONATO, G. L. **Medição de Temperatura por Balanço Energético**. 2014. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Um sensor capaz de medir taxa de radiação proveniente de uma fonte de calor, via balanço energético, foi desenvolvido. A taxa de calor é utilizada como parâmetro de entrada para um modelo matemático, o qual é capaz de estabelecer a temperatura da superfície da fonte de calor, sendo esse o principal objetivo do trabalho. A discrepância nos resultados, quando comparados a um pirômetro comercial, é inferior a 5%, dentro de limites de distanciamentos entre fonte e sensor de 100 a 250 mm. A constante de tempo do sensor é de 20 minutos.

PALAVRAS-CHAVE: Sensor, Taxa de calor, Medição de Temperatura.

DONATO, G. L. **Temperature Measurement by Energy Balance**. 2014. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

1 ABSTRACT

A sensor which is able to measure the radiation rate provenient from a heat source, by energetic balance, was developed. The heat rate is used like na entry parameter to a matematic model, which is able to set up the temperature of the heat source surface, being this the main goal oh this paper. The discrepancy in the resouts, when compared to a comercial pirometer, is less than 5%, between the distance limits of sensor and source, which is 100 to 250 mm. A time constant of the sensor is 20 minutes.

KEYWORDS: Sensor, Heat Rate, Temperature Measurement.

Índice

1	INTRODUÇÃO	2
2	OBJETIVOS	2
2.1	Geral	2
2.2	Específico	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1	Medidor de fluxo de calor simples (<i>Simple Heat Flux Meter</i>)	2
3.2	Medidor de calor com placa fina (<i>Thin Foil Heat Meter</i>)	2
3.3	Sensor de Gardon	3
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
4.1	Difusão do calor	4
4.2	Convecção natural em placa plana	4
4.3	Fluxo de calor radiante	5
4.4	Propagação de incertezas de medição	8
5	DESCRIÇÃO DO SENSOR E EQUACIONAMENTO	8
5.1	Características físicas e instrumentação do sensor	9
5.2	Fonte de Calor	9
5.3	Modelo Matemático	9
5.3.1	Parcela q_{cond}	9
5.3.2	Parcela q_{conv}	10
5.3.3	Parcela q_{rad} e rede de radiação	10
5.4	Critérios para seleção de materiais	10
5.5	Convecção forçada na face traseira do sensor	11
5.6	Software Executável	11
5.7	Análise de Sensibilidade	12
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
6.1	Limite superior de distância c entre sensor e fonte	12
6.2	Limite inferior de distância c entre sensor e fonte	13
6.3	Constante de tempo	13
7	CONCLUSÃO	13
8	RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	14
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

2 INTRODUÇÃO

A maioria dos instrumentos disponíveis para medição de temperatura de superfícies exige contato do sensor com o objeto de medição (Hollman, 1996). Esses sensores têm larga utilização em processos dos mais variados, porém apresentam restrições quando se trata de situações específicas, entre as quais se destacam aquelas em que a superfície está distante ou inacessível, a temperatura prevista ultrapassa os limites de uso do sensor ou da aproximação de pessoas, ou ainda que a instalação do sensor interfira no fenômeno.

É para essas situações que a medição sem contato encontra sua justificativa, mesmo que apresente incertezas de medição, em geral, maiores do que as opções convencionais. A medição da temperatura de superfícies por meio da leitura do fluxo radiante emitido torna-se uma alternativa desejável. Quando se trata de chamas, a medição do fluxo radiante pode informar a temperatura da fonte, a sua razão de mistura média (quando pré-misturada), e até mesmo, a composição dos gases de combustão.

Embora a medição de temperatura baseada no fluxo radiante resolva alguns dos problemas citados anteriormente, ela também tem limitações. Salientam-se as incertezas ligadas às propriedades radiantes e sua dependência espectral.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Realizar a medição de temperatura de uma fonte de calor sem que haja, entre fonte e sensor, contato físico.

3.2 Específico

Construir um sensor baseado em um modelo de balanço energético, capaz de detectar um parâmetro ΔT que, posteriormente, é utilizado como um dos dados de entrada para a solução de um modelo matemático, estabelecendo a temperatura média da fonte.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A proposta de construção do sensor apresentado no presente trabalho apoiou-se na revisão de instrumentos descritos na literatura, apresentado a seguir.

4.1 Medidor de fluxo de calor simples (*Simple Heat Flux Meter*)

Um pequeno medidor de fluxo de calor, com rápida resposta, útil para medir fluxo local tipicamente encontrado em energia solar e no de resfriamento natural é descrito por Andretta et al., 1980. Utilizando instrumentos de aquisição normalmente utilizados para medição de temperatura com termopares, o medidor assegura uma exatidão de no mínimo 10%, resultante de sua de calibração com dois dispositivos diferentes.

4.2 Medidor de calor com placa fina (*Thin Foil Heat Meter*)

Hager, 1965, apresentou um sensor construído com duas folhas de termopares, mostrado na Figura 3.1 de $0,64 \times 10^{-3}$ cm de espessura cada, separadas por uma fina placa de aglomerado de baixa densidade, com $2,5 \times 10^{-3}$ cm de espessura, resistente a compressão e com comportamento de isolante térmico (Figura 3.1). As folhas são de cobre e liga de cobre-níquel e conectadas de forma a gerar um sistema de baixa impedância diferencial. Induz uma

força eletromotriz proporcional à diferença de temperatura entre as faces do sensor. Em condições de regime permanente, o fluxo de calor normal à superfície é calculado por um fator de calibração do conjunto. A calibração experimental confirmou a calibração calculada com menos de 5% de discrepância. As abordagens teóricas e experimental concordaram que uma mudança abrupta no fluxo de calor incidente impôs uma resposta de 0,4 s. A resistência térmica do sensor é insignificante se comparada com a do filme de ar adjacente às superfícies do sensor.

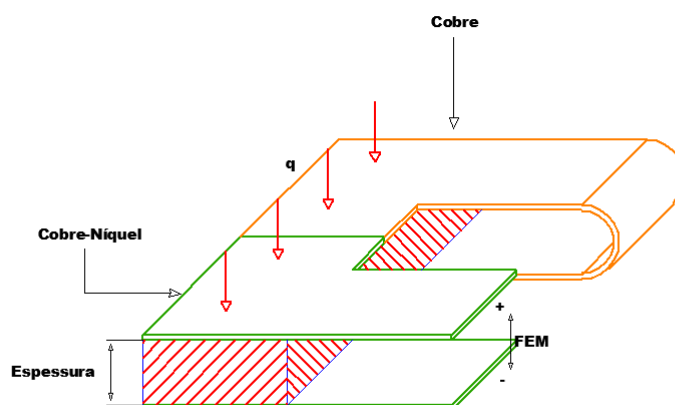


Figura 3.1 – Medidor de calor com placa fina

4.3 Sensor de Gardon

O sensor de Gardon é relatado por Hollman, 1996, e apresentado na Figura 3.2.

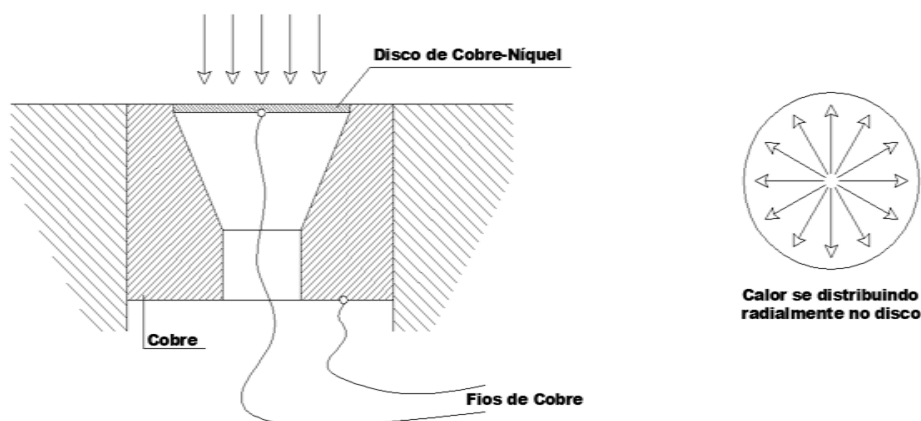


Figura 3.2 – Sensor de fluxo de calor de Gardon (Hollman, 1996)

O calor absorvido pelo disco tem apenas uma opção de percurso, se for considerada uma situação ideal. A difusão de calor se dá de forma radial até a borda do disco. Nas bordas, o disco é soldado na carcaça do sensor, sendo essa solda um dos terminais do termopar. O segundo terminal encontra-se no centro do disco, onde um fio de cobre é soldado. Com esse sistema, o autor afirma que é possível obter-se a diferença de temperatura entre o centro e a

borda do disco, e conseqüentemente obter-se o fluxo radial de calor. Segundo a literatura, o equipamento é capaz de mensurar fluxos de calor entre $15,8 \times 10^4$ e $15,8 \times 10^6$ W/m² com uma constante de tempo na ordem de 0,1 s.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sensor desenvolvido no presente trabalho mede sem contato a temperatura de uma superfície aquecida, por meio da solução de um balanço térmico em regime permanente. O balanço envolve um equilíbrio entre aportes convectivos, condutivos e radiantes na superfície de medição. Esses aportes foram modelados como segue:

5.1 Difusão do calor

A taxa unidimensional de transferência de calor por condução q_{cond} [W] é calculada para o corpo sólido da próxima figura, mantido em regime permanente.

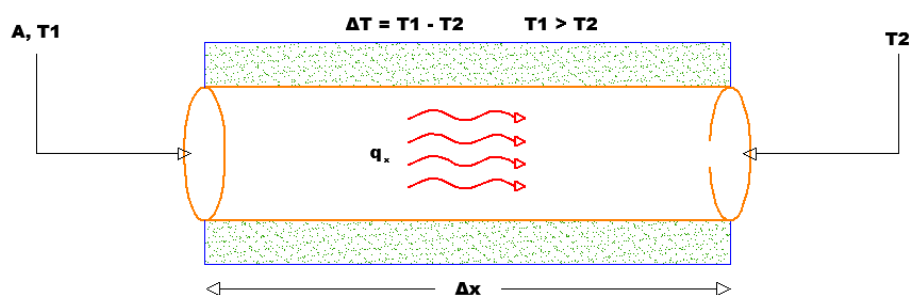


Figura 4.1 – Condução térmica em regime estacionário

O cálculo da taxa $q_{x,cond}$ pode ser realizado pela equação de Fourier (Incropera et al., 2008).

$$q_{x,cond} = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.1.a)$$

Onde k [W/(m.K)] é a condutividade térmica do material, A [m²] é a área normal à taxa de calor, T é a temperatura [K] e x [m] é a posição. Considerando a situação particular de transferência de calor em regime permanente, unidimensional, com materiais com propriedades constantes e uniformes e em coordenadas cartesianas, essa última equação pode representar a taxa de transferência de calor em um domínio finito q_{cond} , como segue:

$$q_{cond} = k A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (4.1.b)$$

5.2 Convecção natural em placa plana

A taxa de transferência de calor convectiva q_{conv} [W] é estimada pela lei de resfriamento de Newton (Incropera et al., 2008), dada por:

$$q_{conv} = A \bar{h} (T_{sup} - T_f) \quad (4.2)$$

Onde \bar{h} [W/(m²K)] é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, T_{sup} [K] é a temperatura na superfície da placa e T_f [K] é a temperatura do fluido em contato.

O coeficiente \bar{h} é estimado por meio do número de Nusselt médio \overline{Nu} , dado pela correlação para placas planas verticais:

$$\overline{Nu}_b = \bar{h} \frac{b}{k_f} = \frac{4}{3} \left[\frac{Gr_b}{4} \right]^{1/4} g(Pr) \quad (4.3)$$

$$Gr_b = \frac{g\beta(T_{sup} - T_f)b}{\nu_f^2} \quad (4.4)$$

$$g(Pr) = \frac{0,75Pr_f^{1/2}}{\left[0,609 + 1,221Pr_f^{1/2} + 1,238Pr_f \right]^{1/4}} \quad (4.5)$$

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (4.6)$$

Onde g [m/s²] é a aceleração da gravidade, b [m] é o comprimento da aresta vertical da placa, k [W/m.K] é a condutividade térmica do ar, Pr é o número de Prandtl, Gr_b é o número de Grashof ao longo de b e ν [m²/s] é a viscosidade cinemática do ar. Os parâmetros dependentes da temperatura do fluido devem ser definidos pela temperatura média entre T_{sup} e T_f .

5.3 Fluxo de calor radiante

A taxa de calor radiante q_{rad} [w] é definida pela equação (Incropera et al, 2008):

$$q_{rad} = \sigma F A \varepsilon (T_{S1}^4 - T_{S2}^4) \quad (4.7)$$

onde T_{S1} e T_{S2} [K] são as temperaturas das superfícies emissoras e F é o fator de forma entre elas.

A modelagem das trocas radiantes entre superfícies em meios não participantes é representada por um circuito elétrico análogo, na forma de uma rede de radiação. (Incropera et al., 2008), como segue:

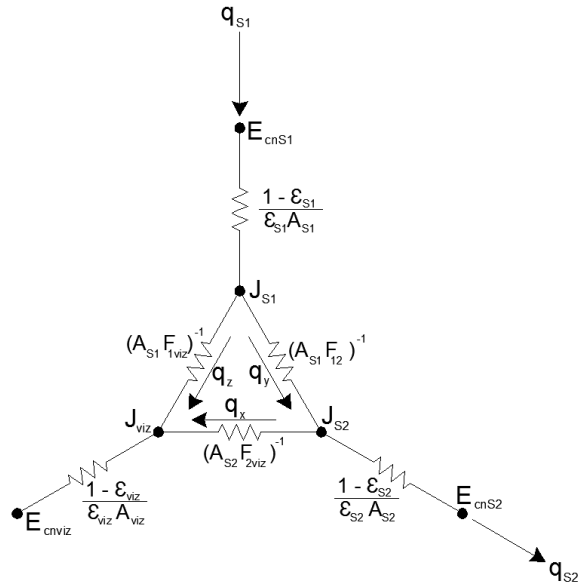


Figura 4.2 – Rede de radiação

A Figura 4.2 representa uma situação particularizada para três superfícies, sendo $S1$ e $S2$ superfícies de corpos reais e uma terceira que representa a vizinhança.

Admitindo T_{S1} [K] como a incógnita do sistema, as equações que compõem o sistema matemático são listadas abaixo:

$$E_{cnS2} = \sigma T_{S2}^4 \quad (4.8)$$

$$q_{S2} \left(\frac{1 - \epsilon_{S2}}{\epsilon_{S2} A_{S2}} \right) + E_{cnS2} = J_{S2} \quad (4.9)$$

$$E_{cnviz} = J_{viz} = \sigma T_{viz}^4 \quad (4.10)$$

$$q_x = (J_{S2} - J_{viz}) A_{S2} F_{2-viz} \quad (4.11)$$

$$q_y = q_{S2} + q_x \quad (4.12)$$

$$\frac{q_y}{A_{S1} F_{1-2}} + J_{S2} = J_{S1} \quad (4.13)$$

$$q_z = (J_{S1} - J_{viz}) A_{S1} F_{1-viz} \quad (4.14)$$

$$q_{S1} = q_y + q_z \quad (4.15)$$

$$E_{cnS1} = q_{S1} \left(\frac{1 - \epsilon_{S1}}{\epsilon_{S1} A_{S1}} \right) + J_{S1} \quad (4.16)$$

$$T_{S1} = \left(\frac{E_{cnS1}}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (4.17)$$

$$A_{S1} F_{1-2} = A_{S2} F_{2-1} \quad (4.18)$$

$$F_{1-2} + F_{1-viz} = 1 \quad (4.19)$$

$$F_{2-1} + F_{2-viz} = 1 \quad (4.20)$$

Onde E_{cn} [W/m²] é o poder emissivo de corpo negro, σ [5,67 E-8W/(m².K⁴)] é a constante de Stefan-Boltzmann, q [W] é a taxa de transferência de calor por radiação, ε é a emissividade, J [W/m²] é a radiosidade.

Para que o sistema de equações (Eq. 4.8 à 4.20) tenha solução, devem ser conhecidas a taxa de calor q_{S2} [W], a temperatura da vizinhança T_{viz} [K], temperatura da superfície $S2(T_{S2}[K])$, informações geométricas e emissividades das superfícies envolvidas. Também é necessário considerar a vizinhança como uma grande cavidade, a qual tem comportamento de corpo negro. Por consequência de tal simplificação, a emissividade da vizinhança ε_{viz} deve ser considerada igual a 1, o que justifica a Equação 4.10.

O fator de forma F_{ij} varia de acordo com a geometria das superfícies e suas disposições no espaço. Ele é definido como a fração da radiação que deixa a superfície i e é interceptada pela superfície j . Esse fator é calculado para duas placas paralelas, quadradas, com áreas distintas e eixos colineares, da figura a seguir,

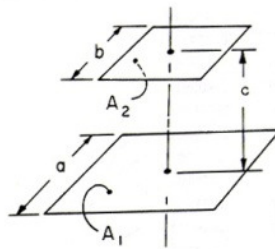


Figura 4.3 – Configuração geométrica do fator de forma
[<http://www.thermalradiation.net/sectionc/C-12.html>]

Onde a [m] é o comprimento da aresta da placa maior, b [m] é o comprimento da aresta da placa menor e c [m] a distância entre as mesmas. O equacionamento foi apresentado da página www.thermalradiation.net “acessado em 03/11/2014”, como segue:

$$A = a/c \quad (4.21)$$

$$B = b/a \quad (4.22)$$

$$X = A(1 + B) \quad (4.23)$$

$$Y = A(1 - B) \quad (4.24)$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi A^2} \left\{ \ln \frac{[A^2(1 + B^2) + 2]^2}{(Y^2 + 2)(X^2 + 2)} + (Y^2 + 4)^{1/2} \left[Y \tan^{-1} \frac{Y}{(Y^2 + 4)^{1/2}} - X \tan^{-1} \frac{X}{(Y^2 + 4)^{1/2}} \right] + (X^2 + 4)^{1/2} \left[X \tan^{-1} \frac{X}{(X^2 + 4)^{1/2}} - Y \tan^{-1} \frac{Y}{(X^2 + 4)^{1/2}} \right] \right\} \quad (4.25)$$

5.4 Propagação de incertezas de medição

O método de propagação de incertezas de Kline and McClintock, abordado por Holman, 1994, é apresentado a seguir:

$$u_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right] \quad (4.26)$$

Onde $R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é a função de x_i parâmetros linearmente independentes, u_R é sua incerteza propagada e u_i as incertezas das respectivas variáveis. Essa equação também pode ser utilizada na análise de sensibilidade de um modelo matemático, variando cada parâmetro de maneira isolada.

6 DESCRIÇÃO DO SENSOR E EQUACIONAMENTO

O sensor desenvolvido no presente trabalho visa estimar a temperatura de uma superfície externa, doravante chamada de superfície da fonte S_1 , a partir do valor do fluxo térmico radiante por ela emitido. O esquema de funcionamento é apresentado na Figura 5.1.

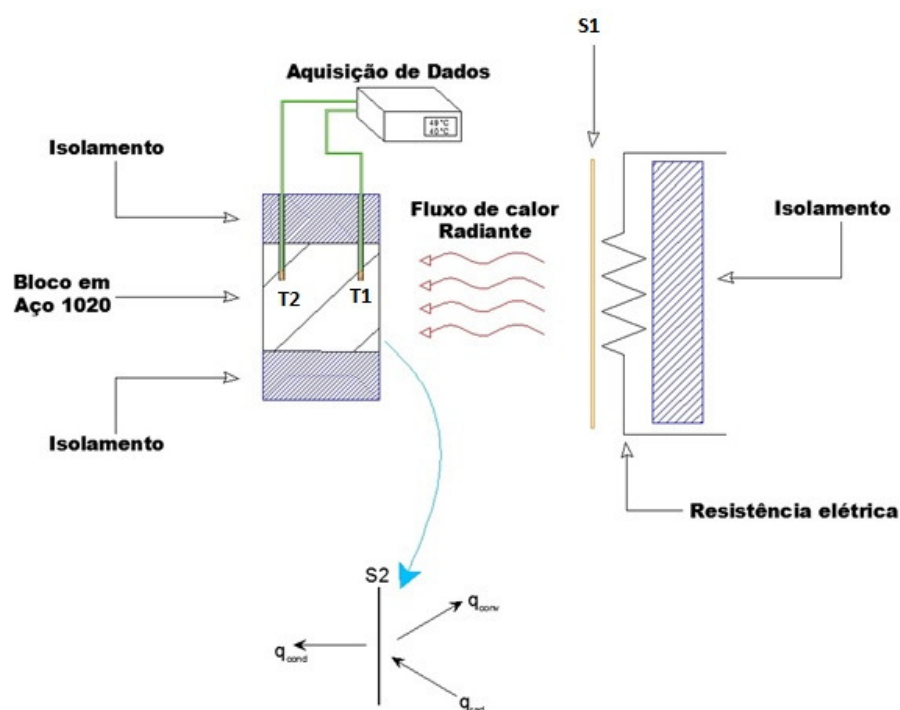


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do sensor de fluxo e balanço energético

O sensor deve estar com seu centro geométrico alinhado com o da fonte de calor, e ambos devem apresentar geometria de suas faces frontais quadradas. O balanço energético sobre a superfície do sensor, doravante chamado de S_2 , é apresentado na Equação 5.1.

$$q_{rad} = q_{conv} + q_{cond} \quad (5.1)$$

6.1 Características físicas e instrumentação do sensor

Foi utilizado um bloco metálico fabricado em aço 1020 contendo arestas de 30, 30 e 14 mm, com condutividade térmica estimada em cerca de 53,0 W/(m.K). Quatro de suas seis faces foram isoladas com poliuretano, apresentando condutividade térmica de 0,019 W/(m.K). A superfície S_2 deverá estar voltada para a fonte de calor, apresentando área de 30 x 30 mm. Sua pintura é fosca na cor preta, com emissividade na ordem de 0,98. A face oposta apresenta dimensões semelhantes e não apresenta pintura.

A emissividade da tinta foi medida com um pirômetro e um termopar. Por tentativa e erro, observou-se que não havia diferença entre as medições de ambos os instrumentos ao se programar o pirômetro com emissividade de 0,98.

Dois termopares do tipo J foram inseridos em sequência no bloco com distanciamento 10 mm entre si, como mostra a Figura 5.1. Devido ao fato de que a condutividade térmica do aço 1020 é significativamente maior do que a condutividade do isolamento, se pode afirmar que o mecanismo de condução de calor ao longo do bloco ocorre de maneira unidimensional. Portanto, a função dos termopares é medir a diferença de temperatura existente, resultado da taxa de calor conduzida ao longo do sensor.

6.2 Fonte de Calor

A fonte de calor representada na Figura 5.2 foi construída com resistências elétricas enclausuradas entre uma chapa de cobre e bloco isolante. A chapa foi pintada com tinta preta fosca, apresentando emissividade de aproximadamente 0,98. O conjunto se assemelha a um sanduíche, e está fixado em um pequeno tripé que permite que o operador ajuste a altura da fonte.

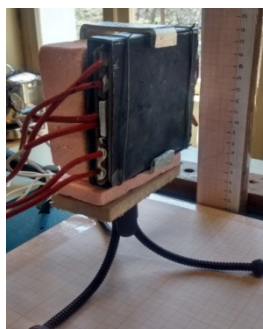


Figura 5.2 – Foto da Fonte de calor

6.3 Modelo Matemático

6.3.1 Parcela q_{cond}

A metodologia para o cálculo de q_{cond} foi apresentada na Seção 4.1. A Tabela 5.1 aponta os parâmetros da Equação 4.1:

Tabela 5.1 – Parâmetros para estimativa de q_{cond}

Simbologia	Descrição	Valor
A	Área da seção transversal do bloco (A_{S_2})	9×10^{-4} [m ²]
k	Condutividade térmica do aço 1020 (k_{aco})	52,9 [W/(m.K)]
ΔT	Diferença de temperatura entre termopares	(termopares) [K]
Δx	Distanciamento entre termopares	0,01 [m]

6.3.2 Parcela q_{conv}

Conhecendo o valor de q_{cond} (obtido na Seção 5.2) pode-se obter a temperatura na superfície do sensor aplicando a Equação 5.2 a seguir:

$$A_{S2} k_{aço} \frac{(T_{S2} - T_1)}{\Delta x^*} = q_{cond} \quad (5.2)$$

Onde T_{S2} [K] é a temperatura na superfície frontal do sensor, T_1 [K] é a temperatura do primeiro termopar e Δx^* [m] é a distância entre o primeiro termopar e a superfície, no valor de 1 mm.

Foi apresentado no capítulo 4.2 um modelo para convecção natural em placa plana. Tal modelo foi usado para estimar a convecção na face frontal do sensor, com os seguintes parâmetros:

Tabela 5.2 – Parâmetros para estimativa de q_{conv}

Simbologia	Descrição	Valor
g	Aceleração da gravidade	9,81 [m/s ²]
b	Comprimento da aresta vertical do sensor	0,030 [m]
T_{pl}	Temperatura da face frontal do sensor (T_{S2})	(estimado via Eq. 5.2) [K]
T_{ar}	Temperatura do ar	(indicado por termômetro) [K]

6.3.3 Parcela q_{rad} e rede de radiação

A parcela q_{rad} é obtida via solução da Eq. 5.1, tendo os valores de q_{cond} e q_{conv} obtidos nas Seções 5.2 e 5.3.

O modelo de rede de radiação proposto no Capítulo 4.3.1 faz uso de q_{rad} como um de seus parâmetros de entrada para estimar a temperatura da superfície $S1$. A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros para a solução da rede de radiação.

Tabela 5.3 – Parâmetros para solução da rede de radiação

Simbologia	Descrição	Valor
a	Comprimento da aresta vertical da fonte	0,083 [m]
b	Comprimento da aresta vertical do sensor	0,030 [m]
c	Distância entre fonte e sensor	(valor a ser estipulado) [m]
q_{rad}	Taxa de calor radiante absorvido pelo sensor	Eq. 5.1
T_{S2}	Temperatura da face frontal do sensor	Eq. 5.2
T_{viz}	Temperatura da vizinhança	(valor a ser estipulado) [K]
ϵ_{S1}	Emissividade da superfície da fonte	0,98
ϵ_{S2}	Emissividade da superfície do sensor	0,98

a , b e c são os valores geométricos representados na figura 4.3 referentes ao fator de forma apresentado no Capítulo 4.3.2 e utilizado para solução do sistema de rede de radiação.

É necessário assumir as hipóteses de que as superfícies são totalmente difusas e comportam-se como corpos cinza para que o modelo matemático seja válido.

6.4 Critérios para seleção de materiais

A escolha do material para fabricação do sensor foi baseada em resultados preliminares obtidos com o modelo matemático. No quesito isolamento, é razoável que seja selecionado um

material com a melhor característica isolante possível, nesse caso, o poliuretano. Entretanto, a seleção do material para o bloco deve respeitar os seguintes critérios:

1º - Não deve apresentar condutividade térmica demasiadamente grande (cobre e alumínio, por exemplo), a ponto de gerar ΔT indetectável pelos termopares.

2º - Não deve apresentar condutividade térmica na ordem do isolamento, a ponto de descaracterizar o fluxo de calor unidimensional.

Seguindo tais critérios, e avaliando a disponibilidade de materiais, chegou-se a conclusão de que o aço 1020 atenderia às necessidades.

6.5 Convecção forçada na face traseira do sensor

Um ventilador foi instalado na face traseira do sensor visando a reduzir a resistência térmica referente à convecção. O resultado disso foi a redução da parcela q_{conv} e aumento da parcela q_{cond} no balanço de energia apresentado na Equação 5.1.



Figura 5.3 – Foto do sensor de fluxo radiante

6.6 Software Executável

Um arquivo executável foi gerado com o *software* EES (*Engineering Equation Solver*) a fim de facilitar o trabalho em laboratório. Com uma interface simples, o programa engloba todo o modelo matemático. O operador tem a liberdade de alterar seis parâmetros de entrada, enquanto os demais são mantidos. A Figura 5.4 ilustra a interface do programa:

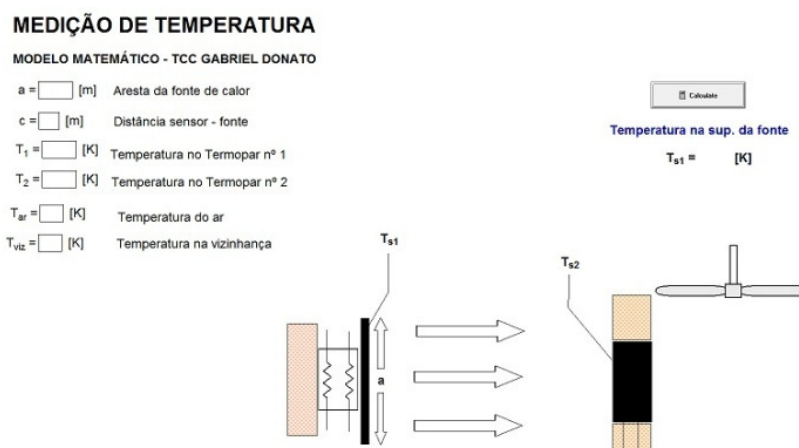


Figura 5.4 – Programa executável criado com o *software* EES (*Engineering Equation Solver*)

6.7 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tem como finalidade mostrar quais são os parâmetros de entrada que mais influenciam na obtenção de T_{S1} , a partir da Eq. 4.26.

A temperatura T_{S1} estimada pelos parâmetros nominais apresentados na Tabela 5.4 foi de 603,8 K. A análise de sensibilidade foi feita variando-se 1% dos valores nominais, de cada parâmetro, de maneira isolada, e apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise de sensibilidade do modelo de balanço térmico

Nº	Simbologia	Valor nominal	Variação em T_{S1} [K]	Sensibilidade (S_i)
1	a	0,083 [m]	3,858	1,00640
2	b	0,030 [m]	1,496	1,00248
3	c	0,100 [m]	2,361	1,00391
4	$k_{aço}$	52,9 [W/(m.K)]	1,343	1,00222
5	ΔT	0,6 [K]	1,343	1,00222
6	T_{ar}	296,0 [K]	0,985	1,00163
7	T_{viz}	296,0 [K]	0,373	1,00062
8	ϵ_{S1}	0,98	1,420	1,00235
9	ϵ_{S2}	0,98	1,382 K	1,00229
10	Δx	0,01 [m]	1,343 K	1,00222

Definiu-se como sensibilidade S_i a razão entre as temperaturas T_{S1} calculadas com o parâmetro i modificado em relação ao valor nominal, como segue:

$$S_i = \frac{T_{S1,i}}{T_{S1}}$$

Percebe-se que os parâmetros dimensionais a e c são os que mais influenciaram no cálculo da temperatura da fonte T_{S1} .

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados ensaios a fim de estabelecer os limites de distância c entre fonte e sensor. O principal parâmetro que influencia o limite superior é o ΔT medido no bloco de aço, que passa a ser indetectável em situações de demasiado distanciamento. O limite inferior, por sua vez, é limitado pela proximidade da fonte com a superfície de medição, devido à interferência entre suas plumas convectivas.

7.1 Limite superior de distância c entre sensor e fonte

Esse limite foi definido segundo o seguinte critério: o valor de ΔT não deve ser inferior a 0,1 K. Tal critério foi baseado em análises práticas, que mostram oscilação com amplitudes na ordem do valor nominal fornecido pelo instrumento de aquisição de dados.

O valor máximo estabelecido para o distanciamento c foi de 250 mm, nas seguintes condições:

Tabela 6.1 – Parâmetros para limite superior

Símbolo	Valor
c	0,25 m
T_1	303,50 K
T_2	303,39 K
T_{ar}	296,00 K
T_{viz}	296,00 K

Tal situação induz um ΔT de 0,11 K e, via modelo matemático, mediu-se a temperatura da fonte em 593,2 K. Esse resultado foi comparado ao obtido por um pirômetro, o qual mediu a temperatura da fonte em 603 K, ou seja, com uma discrepância nos resultados de 9,8 K.

7.2 Limite inferior de distância c entre sensor e fonte

O limite inferior de distanciamento foi definido experimentalmente, estabelecido em 100 mm, sob as seguintes condições:

Tabela 6.1 – Parâmetros para limite superior

Símbolo	Valor
c	0,10 m
T_1	317,80 K
T_2	317,20 K
T_{ar}	296,00 K
T_{viz}	296,00 K

Resultando em uma estimativa de temperatura da fonte de 602,4 K via modelo matemático. Via pirômetro, o resultado foi de 609 K.

Foi realizado um ensaio, com distanciamento c de 50 mm, onde obteve-se ΔT superior a 1,3 K. Entretanto, o modelo matemático indicou temperatura da fonte de 564,4 K, enquanto o pirômetro estimava a mesma em 610 K, gerando discrepância de 45,6 K, mostrando que o modelo matemático perdeu representatividade.

Foram feitos ensaios variando a posição c do sensor, entre os dois limites citados anteriormente ($0,1\text{m} < c < 0,25\text{m}$), e verificou-se que a diferença absoluta entre as temperaturas T_{S1} calculada pelo modelo e medida com um pirômetro ficou inferior à 5%.

7.3 Constante de tempo

A constante de tempo é definida como o tempo que o instrumento leva para alcançar 63,21% de sua resposta estabilizada. Tal valor foi obtido experimentalmente, e seu valor é de 20 minutos. Isso ocorre devido à elevada inércia térmica do bloco de aço 1020.

8 CONCLUSÃO

O sensor de fluxo radiante apresenta potencial para medição de temperatura de superfícies radiantes, com faixa de distanciamento entre superfície e sensor de 100 mm a 250 mm, visto que os desvios entre os resultados são menores que 5%, se comparados a um pirômetro. Entretanto, os limites apresentados são válidos, única e exclusivamente, para o conjunto fonte-sensor abordado.

A constante de tempo foi estimada em 20 minutos, o que pode parecer elevada se comparada a sensores convencionais. Entretanto, por consequência da elevada inércia térmica bloco de aço, o sensor aqui abordado pode ser empregado em situações nas quais a fonte de calor apresenta rápidas oscilações em sua temperatura e o operador está interessado em um valor médio de leitura.

É importante ressaltar o fato de que a incerteza de medição não foi estimada devido à falta de dados relativos às trocas convectivas, calculadas por modelos de correlação.

O estudo realizado na Seção 5.7 revela quais são os parâmetros que mais influenciam na obtenção de T_{S1} . ΔT , aresta da fonte a e a distância c entre fonte e sensor são os que mais influenciam, exigindo atenção do operador nas suas obtenções. Em contrapartida T_{viz} gera pouca influência, podendo ser estimado com um critério menor.

9 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a confecção de fontes de calor alternativas, as quais possam atingir temperaturas na ordem de 1300 K. Espera-se que o limite superior de distanciamento c seja ampliado para até 1m, com ΔT próximo a 0,1. Tal conclusão provém de simulações no aplicativo do modelo matemático.

Reconstruir o sensor, fazendo uso de materiais com incerteza de propriedades conhecidas pode possibilitar que a incerteza propagada seja obtida. Entretanto, é necessário que seja feita uma análise criteriosa na incerteza do modelo de convecção natural, visto que se trata de um modelo empírico.

Realizar a calibração por comparação (com instrumentos comerciais, por exemplo) pode vir a ser uma frente de pesquisa para o sensor aqui apresentado. Todavia, T_{S1} não é função única e exclusivamente de ΔT . Se forem considerados como variáveis apenas ΔT e c , por exemplo, tem-se uma curva de calibração 3D.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Andretta, B. Bartoli, B. Coluzzi, V. Cuomo, and S. De Stefano “**Simple Heat Flux Meter**”, 1981.

J. P. Holman “**Experimental Methods for Engineers**”, 6th edition, 1994.

Incropera, DeWitt, Bergman and Lavine; “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, 6th edition, 2008.

Nathaniel E. Hager Jr. “**Thin Foil Heat Meter**”, 1965.

Thermal Radiation”, www.thermalradiation.net. Acessado em 03/11/2014.