

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

CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA DE CHAMAS UTILIZANDO
TERMOPARES ULTRA-FINOS

por

Felipe Smaniotto

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, 12 de novembro de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA DE CHAMAS UTILIZANDO
TERMOPARES ULTRA-FINOS

por

Felipe Smaniotto

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

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Volnei Borges

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 12 de novembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço à todas as pessoas que ajudaram a tornar este trabalho possível. Agradeço aos professores, pelo conhecimento transmitido. Agradeço aos meus colegas e amigos, pelo companheirismo e união nos momentos de alegria e/ou de dificuldade. Agradeço ao Scotty pela longa caminhada juntos. Agradeço ao pessoal do Laboratório de Combustão, Isaías, Peng, prof. Fernando, Hugo, Tiago, Jonas, pela grande ajuda na realização dos experimentos. Agradeço ao prof. Van der Laan e à Deborah, do GENUC, pelo desenvolvimento da fonte de energia e ajuda na soldagem do termopar. Agradeço ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais pelo empréstimo do microscópio. Agradeço ao Batista pela ajuda com os mecanismos de posição. Por fim, um agradecimento especial ao meu professor orientador, Nattan, pelo apoio, paciência e disposição.

SMANIOTTO, F. **Caracterização do campo de temperatura de chamas utilizando termopares ultra-finos**. 2014. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

A combustão é o processo de geração de energia mais utilizado no mundo. Responde pela maior parte da energia utilizada para a produção de energia elétrica, térmica e nos transportes. No entanto, este processo é responsável pela formação de produtos tóxicos quando mal realizado, como o monóxido de carbono e a fuligem. Sendo assim, é de fundamental importância que se compreenda os fenômenos físicos da reação para que o processo possa ser executado da maneira mais eficiente possível. Um dos parâmetros que melhor descreve uma chama é o seu campo de temperatura. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é medir o campo de temperatura de chamas laminares geradas por gás natural e ar. Para isso, um termopar ultra-fino foi fabricado. Aplicou-se uma correção por perdas por radiação. O instrumento foi validado pela comparação de resultados da temperatura medida e corrigida com a temperatura adiabática da chama, apresentando discrepância de 0,9% quando corrigido. Medições foram realizadas em uma chama laminar não pré-misturada apresentando resultados coerentes.

PALAVRAS-CHAVE: Campo de temperatura, chamas laminares, queimador, termopar.

SMANIOTTO, F. **Characterization of the temperature field of flames using fine wire thermocouples.** 2014. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

Combustion is the most used process for energy generation. It claims for the most part of the energy used for electric and thermal energy production and transportation. However, this process is responsible for the formation of toxic products when it is performed poorly, like carbon monoxide and soot. Thus, the comprehension of the physical phenomena of the reaction is of fundamental importance so that the process may be executed in the most efficient way. One of the parameters that best describes a flame is its temperature field. So the goal of the present work is to measure the temperature field of laminar flames generated by natural gas and air. For that, a fine wire thermocouple was manufactured. A correction for radiation loss was applied. The instrument was validated by comparing the results of the measured and corrected temperatures to the adiabatic temperature of the flame, presenting a discrepancy of 0.9% when corrected. Measurements were performed in a laminar non-premixed flame showing coherent results.

KEYWORDS: Temperature field, laminar flames, burner, thermocouple.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1.
1.1 Objetivos	1.
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2.
2.1 Termopar.....	2.
2.2 Combustão.....	3.
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4.
3.1 Métodos de medição de temperatura em chamas	4.
3.1.1 Termopares ultra-finos	4.
3.1.2 Técnicas ópticas	5.
4. METODOLOGIA	5.
4.1 Bancada de fabricação do termopar	6.
4.2 Correção das medições.....	6.
4.3 Aferição do termopar	7.
4.4 Combustível	8.
4.5 Sistema de aquisição de dados.....	8.
4.6 Medição de temperatura.....	9.
4.7 Tratamento estatístico	9.
4.8 Análise de incertezas.....	10.
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	10.
6. CONCLUSÕES.....	12.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13.
ANEXO I	16.
ANEXO II.....	16.
ANEXO III.....	16.
ANEXO IV	17.
APÊNDICE I	17.
APÊNDICE II	17.
APÊNDICE III.....	18.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia tornou a combustão o processo de geração de energia mais utilizado no nosso planeta. No Brasil, o recente crescimento da classe média foi responsável por um significativo aumento da demanda. No ano de 2013, mais de 80% da energia utilizada no país foi gerada por este processo [EPE, 2014]. As principais aplicações da combustão são nos setores industrial e de transporte, devido à alta liberação de energia e baixo custo.

A combustão é o principal processo de produção de energia, o pilar de sustentação dos avanços tecnológicos da sociedade contemporânea. Atualmente, 90% da energia utilizada nos transportes, na produção de energia elétrica e da energia térmica resulta da queima de combustíveis. Embora exista uma crescente tendência na redução da utilização de combustíveis fósseis, a combustão deve continuar dominando a maior parte do setor de produção de energia nas próximas décadas [Coelho e Costa, 2007].

A combustão desempenha um papel fundamental na indústria e no transporte. São dependentes diretos da fonte de energia setores como: produção e tratamento térmico de metais, vidros, cerâmicos, e cimento; tratamento de resíduos industriais e sólidos urbanos; transportes aéreos, marítimos e terrestres.

No entanto, a grande maioria dos combustíveis utilizados no processo de combustão são de natureza carbonífera e os produtos dessa reação estão diretamente ligados ao aquecimento global, sendo o dióxido de carbono (CO_2) o principal causador deste efeito [NRC, 2010]. O problema se torna ainda mais agravante quando a reação química é incompleta. Neste caso, outros produtos indesejáveis são liberados, como o monóxido de carbono (CO) e a fuligem. O CO é um gás altamente tóxico. A fuligem não só tem efeitos adversos na saúde das pessoas, como também polui o meio ambiente [Joo e Gülder, 2010]. As partículas de fuligem são possivelmente um dos principais causadores do aquecimento global, atrás somente do CO_2 [Jacobson, 2001]. Segundo estudos do autor, a deposição destas partículas na neve e no gelo altera sua refletividade e, portanto, a capacidade de refletir a radiação solar é reduzida.

Diante dessas circunstâncias, fica evidente que a combustão deve ser realizada da maneira mais eficiente possível. Estudar chamas é fundamental para o entendimento do processo. A temperatura deve ser considerada o parâmetro mais importante da chama pela influência nas reações químicas [Hartlieb *et al.*, 2000]. Chamas com as mais variadas configurações são temas de pesquisa muito estudados. Porém, parece haver uma falta de informação referente à alguns parâmetros da chama, como o campo de temperatura [Bhattacharjee *et al.*, 2014].

Termopares são instrumentos de medição de temperatura robustos e versáteis. No entanto, possuem natureza intrusiva que produz perturbações na chama. Tais perturbações podem gerar erros de medição, que se tornam graves com o aumento do diâmetro do fio. Por isso, os termopares ultra-finos são aplicados com o propósito de diminuir estas perturbações. Assim, o presente trabalho tem como foco fabricar termopares ultra-finos, a fim de realizar medições de temperatura em chamas.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de medições de temperaturas de chamas.

Objetivos específicos:

- Construir uma bancada para fabricação de termopares ultra-finos;
- Aferir o instrumento de medição a partir de um queimador padrão;
- Analisar a incerteza total da medição;

- Fazer medições em diversos pontos em uma chama laminar não pré-misturada, a fim de mapear o campo de temperatura;
- Apresentar os resultados de maneira a visualizar a estrutura física do campo de temperaturas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo de parâmetros estruturais de uma chama é a chave para o entendimento do processo de combustão. O campo de temperatura é uma das informações mais importantes sobre a chama. Termopares são instrumentos acessíveis, robustos e versáteis para medição de temperatura.

Neste capítulo são destacadas as informações, em literatura, necessárias para a compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem na medição de temperatura em chamas utilizando um termopar.

2.1 Termopar

Os termopares são amplamente utilizados para se medir temperatura. São relativamente baratos e podem ser aplicados nas mais variadas situações. Este instrumento de medição consiste de dois materiais condutores distintos que se conectam em algum ponto, chamado de junta quente. Uma diferença de potencial é produzida quando este ponto é submetido a uma temperatura diferente da temperatura de referência, chamada junta fria, que está conectada a outra parte do circuito. A temperatura de referência deve ser constante e conhecida [Michalski *et al.*, 1991].

Seu funcionamento baseia-se no *efeito Seebeck*. T. Seebeck descobriu, em 1821, que uma corrente é gerada em um circuito fechado composto de dois metais diferentes quando suas junções estão a diferentes temperaturas. Ele observou que essa corrente gera uma força eletromotriz (f.e.m.) que resulta da variação da densidade do elétron ao longo de um condutor sujeito a uma temperatura de distribuição não-uniforme [Michalski *et al.*, 1991]. A f.e.m. de Seebeck é dada pela Eq. (2.1).

$$dE = \sigma(T) dT \quad (2.1)$$

onde σ é o coeficiente de Seebeck do metal e T , a temperatura.

No caso de um circuito com dois metais, A e B, para medições de temperaturas, é mais difícil resolver a equação com duas variáveis. Por essa razão, é assumido que a T_2 , temperatura da junta fria, deve ser constante (temperatura de referência, T_R). Pode-se concluir que a f.e.m. é função apenas da temperatura medida, $f(T_1)$, conforme a Eq. 2.2.

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AB}(T_1, T_R) = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_R) = f(T_1) \quad (2.2)$$

onde E_{AB} e e_{AB} são a diferença de potencial total e parcial, respectivamente, entre os metais.

Quaisquer dois metais produzem uma diferença de potencial. Porém, alguns materiais, normalmente ligas metálicas, possuem relações previsíveis e com boa repetibilidade entre temperatura e diferença de potencial. Os materiais com melhor comportamento formam alguns tipos de termopares que se tornaram padrões na indústria. São identificados por letras: B, C, E, G, J, K, N, R, S e T. A seleção do termopar é influenciada pelo custo, disponibilidade, conveniência, ponto de fusão do material, propriedades químicas (local de aplicação), estabilidade e sinal de saída. Na maioria das vezes, no entanto, o que define o tipo de termopar é a faixa de temperaturas e a sensibilidade necessária na aplicação. Para a aplicação em

chamas, onde as temperaturas chegam a mais de 2500 K os tipos mais recomendados são os que utilizam ligas de platina: R, S e B.

2.2 Combustão

Borman e Ragland, 1998, definem combustão como reações que ocorrem rapidamente com significativa conversão de energia química em energia sensível. Turns, 2000, a define como uma oxidação rápida que libera calor, ou simultaneamente luz e calor. Ambas as tentativas introduzem certa subjetividade na definição. Liñán e Williams, 1993, a definiram de maneira mais abrangente: a ciência das reações químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa.

A reação química ocorre na presença de um combustível e um comburente. O comburente é a fonte oxidante, que é composta por oxigênio (normalmente o ar, uma mistura de 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio). Um combustível pode ser considerado uma fonte finita de energia potencial química na qual a energia depositada em uma estrutura molecular é liberada por complexas reações químicas [El-Mahallawy e Habik, 2002]. Alguns dos requisitos dos combustíveis são: alta concentração energética, alta liberação de calor, boa estabilidade, baixa pressão de vapor e baixa toxicidade. Podem ser utilizados nos três estados: sólido, líquido, gasoso. Cada estado possui diferentes propriedades, estruturas, segurança e confiabilidade, além de influenciar a eficiência do sistema de combustão.

O objeto de estudo no qual se podem observar os parâmetros da combustão normalmente é a chama. Turns, 2000, define uma chama como sendo a propagação auto-sustentada de uma onda de combustão localizada. Em processos de combustão, o combustível e o comburente se misturam e reagem. É conveniente distinguir se os reagentes são misturados antes e depois queimados (chama pré-misturada) ou se estes dois fenômenos ocorrem simultaneamente (chama não pré-misturada). Estas categorias ainda são subdivididas dependendo do regime do escoamento do fluido em laminar ou turbulenta [Warnatz *et al.*, 2006]. A Tabela 2.1 mostra as divisões juntamente com um exemplo no qual cada uma delas ocorre em aplicações práticas.

Tabela 2.1 – Classificação das chamas [adaptado de Warnatz *et al.*, 2006]

	Mistura Combustível e Comburente	
Regime do escoamento	Laminar pré-misturada (<i>chama plana</i>)	Laminar não pré-misturada (<i>motor à gasolina</i>)
	Turbulenta pré-misturada (<i>turbina de avião</i>)	Turbulenta não pré-misturada (<i>chama de vela</i>)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Métodos de medição de temperatura em chamas

Diferentes métodos para medição de temperatura em chamas são utilizados. Os termopares estão no mercado há muito tempo. As recentes versões de termopares são os termopares ultra-finos que caracterizam-se por diminuir o efeito da natureza intrusiva deste tipo de instrumento. Outros métodos consolidados são os chamados ópticos. Estes métodos tem como vantagem a perturbação nula na chama. Neste capítulo são apresentados os trabalhos realizados em chamas, utilizando os métodos citados, presentes na literatura.

3.1.1 Termopares ultra-finos

A literatura dispõe de alguns estudos realizados utilizando termopares ultra-finos para medições em chama: Bradley e Matthews, 1968, Sato *et al.*, 1975, Moneib, 1980, LaRue *et al.* 1984, Kent e Wagner, 1985, Katsuki *et al.*, 1987, Santoro e Miller, 1987, Pita e Nina, 1989, Rumminger *et al.*, 1996, Martins *et al.*, 2002.

Uma das maiores desvantagens do termopar são as perturbações no escoamento da chama causadas pela natureza intrusiva do instrumento. As perturbações aerodinâmicas são consideradas as mais sérias [Martins *et al.*, 2002]. No entanto, as perturbações aerodinâmicas de um termopar com diâmetro menor de 80 μm podem ser desprezadas [LaRue *et al.*, 1984].

As perturbações químicas estão relacionadas com os efeitos catalíticos na superfície do termopar. Estes efeitos podem influenciar as propriedades. Os efeitos catalíticos de um termopar ultra-fino do tipo R em uma chama pré-misturada são minimizados com o uso de um revestimento superficial [Pita e Nina, 1989]. Esta perturbação pode ser desprezada em chamas laminares [Katsuki *et al.*, 1987].

As perturbações térmicas são as mais influentes na caracterização do campo de temperatura da chama com termopares ultra-finos. Um termopar mede a temperatura na solda, ponto em que os diferentes materiais se encontram. Esta temperatura raramente é a mesma que a do gás que está sendo medido, especialmente em baixas vazões e altas temperaturas [Rumminger *et al.*, 1996]. A diferença decorre da transferência de calor (convecção, radiação e condução). Esta parcela apresenta a maior influência em relação às perturbações anteriores [Martins *et al.*, 2002].

A perda de calor por condução é minimizada se os fios do termopar estiverem paralelos à superfície do queimador [Rumminger *et al.*, 1996]. Moneib, 1980, mostrou que esta perda pode ser desprezada se a relação entre o comprimento e o diâmetro do fio for maior de 200 e que, no caso de fios finos da ordem de 40 μm , o erro é desprezível.

O termopar perde calor por radiação em altas temperaturas. Por isso, recomenda-se realizar correções para aproximar as medições ao valor real. Kent e Wagner, 1985, realizaram medições com um termopar Pt/Pt-10%Rh com fios de 60 μm de diâmetro em uma chama pré-misturada de metano e ar. Os erros devido à radiação foram corrigidos comparando as medições com informações presentes na literatura. A maior correção foi de 170 K em uma temperatura de 1980 K.

Bradley e Matthews, 1968, criaram um método de correção dos erros provenientes da perturbação térmica por radiação e convecção, como mostra a Eq. 3.1.

$$T_g = T_t + \frac{\sigma \varepsilon_t T_t^4}{h_g} \quad (3.1)$$

onde T_g é a temperatura do gás, T_t , a temperatura medida pelo termopar, ε_t é a emissividade do termopar, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) e h_g é o coeficiente de convecção.

Martins *et al.*, 2002, realizaram experimentos com termopares do tipo R de 38 μm de diâmetro e aplicaram correções de 3% para temperaturas da ordem de 500 K e 5,7% para temperaturas da ordem de 1750 K.

Sato *et al.*, 1975, mostraram que normalmente as correções devido as perturbações térmicas aumentam com relação ao diâmetro do fio. Se não forem necessários alto tempo de vida e facilidade no manuseio do instrumento, as perturbações térmicas podem ser aproximadas para termopares ultra-finos e, neste caso, a utilização para medições de temperaturas em chamas é conveniente.

Outro problema que afeta a medição de temperatura em termopares é a deposição de fuligem. Este fenômeno ocorre em chamas não pré-misturadas de gás natural. Santoro e Miller, 1987, utilizaram uma técnica de inserção rápida. Segundo estes autores, esta técnica não elimina totalmente essa fonte de erro, mas a reduz significativamente. Santoro e Miller, 1987, negligenciaram os efeitos catalíticos e de condução, realizando correções térmicas para perdas por radiação e, por fim, estimaram erros de 5% nas medições.

3.1.2 Técnicas ópticas

Outra alternativa de medição de temperatura em chama são as técnicas ópticas. Apesar destas técnicas estarem se popularizando, são mais sofisticadas e de difícil interpretação. A vantagem sobre os termopares é que não são intrusivas. Pode-se destacar as seguintes técnicas: Raman, Rayleigh e CARS. Todas se baseiam no espalhamento de laser: basicamente, uma amostra é iluminada com um feixe de laser; o ponto afetado reage enviando radiação eletromagnética que é coletada.

Hartlieb *et al.*, 2000, realizaram medições de temperatura em chama pré-misturada, plana, de diferentes combustíveis e com temperaturas de até 2400 K utilizando várias técnicas com o intuito de compará-las. As grandes vantagens destacadas das técnicas Raman e Rayleigh sobre os termopares (de 500 e 600 μm de diâmetro) foi a baixa perturbação e a possibilidade de utilizá-las em altas temperaturas (>2000 K).

Masri *et al.*, 1988, compararam medições utilizando as técnicas de Rayleigh e de termopares ultrafinos (Pt-Rh5%/Pt-Rh20% de 130 μm de diâmetro) sem correções de perda por radiação em dois queimadores similares. As divergências foram de menos de 100 K.

A técnica CARS é melhor aplicável em ambientes com alta luminosidade devido à intensidade luminosa que possui magnitude da ordem de 6 vezes maior do que a técnica Raman [Farrow *et al.*, 1984].

Farrow *et al.*, 1984, realizaram experimentos para medir temperaturas em chamas não pré-misturadas utilizando a técnica CARS e comparando os resultados com termopares, nos quais observou-se boa concordância. Sick *et al.*, 1991, afirmaram que a técnica possui alta resolução espacial e temporal, porém é necessário alto investimento e a avaliação dos dados requer um especialista, principalmente devido à relação não-linear do sinal com a variação da intensidade do laser e da concentração dos componentes.

As técnicas ópticas de espalhamento de laser Raman, Rayleigh e CARS tem aplicações restritas, pois elas são caras e requerem muita experiência para utilização [Katsuki *et al.*, 1987].

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para fabricação do termopar é proposta por Martins *et al.*, 2002. Uma bancada é montada. Avalia-se o comportamento do termopar na chama e estudam-se as perturbações. Uma chama pré-misturada descrita em literatura é reproduzida para verificar o

funcionamento do instrumento construído. Medições de temperatura são realizadas em uma chama não pré-misturada. Os resultados são tratados estatisticamente e as incertezas são estimadas.

4.1 Bancada de fabricação do termopar

Apesar dos termopares ultra-finos serem utilizados desde a década de 1970, no Brasil sua presença em pesquisas e desenvolvimento tecnológico é muito restrita. Isso ocorre porque este instrumento não é vendido comercialmente, obrigando o pesquisador a executar um procedimento laboratorial para a fabricação [Martins *et al.*, 2002].

A construção da bancada experimental serve para unificar os equipamentos necessários para a fabricação do termopar. Ela é constituída por algumas ferramentas ópticas, um sistema de aplicação de carga elétrica para soldagem e ferramentas de posicionamento para aproximação dos fios.

O processo de soldagem ocorre por resistência. Uma corrente elétrica atravessa os dois fios a partir do momento que eles estiverem em contato. A solda é realizada formando o ponto de medição do termopar. Uma fonte de energia foi desenvolvida pelo laboratório GENUC e emprestada ao Laboratório de Combustão. Foi necessária uma carga de aproximadamente 180 mJ por um tempo de 400 ms para obter uma solda satisfatória.

O termopar de tipo R é utilizado neste trabalho por questões de conveniência, já que é mais econômico e pode medir temperaturas de até 1750 K de maneira confiável, segundo o fabricante.

A sonda do instrumento é formada por um par de fios de 25 μm de diâmetro, um de Pt e outro de Pt-Rh13%. Dois fios semelhantes de 200 μm são conectados aos mais finos, servindo de apoio estrutural. Um tubo capilar cerâmico de alumina (Al_2O_3) engloba os fios mais grossos. A Fig. 4.1 apresenta o esquema.

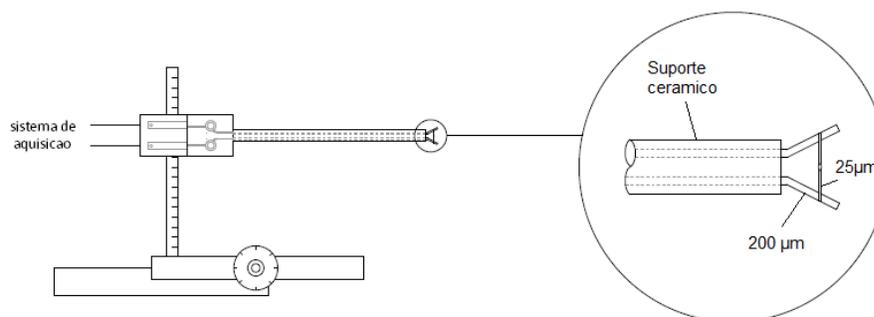


Figura 4.1 – Esquema detalhado do termopar.

4.2. Correção das medições

As medidas de temperatura são corrigidas devido às perdas de calor por radiação e convecção, utilizando a Eq. 3.1. Conforme explicado anteriormente, as outras perdas serão negligenciadas utilizando técnicas citadas ou por sua relativa baixa influencia na temperatura.

O segundo termo à direita da Eq. 3.1 representa esta correção. Além da temperatura medida, a correção depende da constante de Stefan-Boltzman, σ , da emissividade do termopar, ϵ_t e do coeficiente de calor por convecção do gás, h_g . Estes parâmetros são função de outras propriedades do gás e do escoamento que devem ser conhecidos, como: densidade, ρ , condutividade, κ , viscosidade, μ , número de Prandtl, Pr , velocidade do escoamento, v , número de Reynolds, Re , e número de Nusselt, Nu .

Assim, calcula-se o número de Reynolds ($Re_d = \rho v d / \mu$), que relaciona-se com o número de Nusselt ($Nu_d = h_g d / \kappa$). A solda foi considerada como sendo cilíndrica. A correlação de Kramers é utilizada para o cálculo de Nu_d , com $0,01 < Re_d < 10^5$, descrita pela Eq. 4.1 [Tropea *et al.*, 2007].

$$Nu_d = 0,42(Pr)^{0,2} + 0,57(Pr)^{\frac{1}{3}}(Re_d)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

Bradley e Entwistle, 1961, calcularam a emissividade, ϵ_t , dos materiais Pt e Pt-Rh10%, como observa-se na Fig. I, no Anexo I. Apesar do termopar do tipo R ser formado pelos materiais Pt e Pt-Rh13%, é uma boa aproximação utilizar os valores calculados pelos autores. As propriedades do gás utilizadas para o cálculo foram as do ar [Incropera e DeWitt, 2002], que é de longe o maior componente da mistura. A velocidade do escoamento é aproximada pela vazão volumétrica sobre a área do bocal. O diâmetro da solda é medido no microscópio.

A perturbação é diretamente proporcional ao diâmetro da solda. Portanto, esperam-se correções menores das observadas em literatura devido ao pequeno diâmetro utilizado neste trabalho. Também espera-se que a correção será maior, quanto maior for a temperatura.

4.3 Aferição do termopar

Um queimador padrão é utilizado para validar o funcionamento do instrumento, comparando as medições com uma temperatura conhecida. Para isso, foi escolhido um queimador com grande base de dados na literatura a fim de reproduzir uma chama com temperatura conhecida.

O *McKenna* é provavelmente o queimador de chama plana mais popular no mercado [Gregor e Dreizler, 2009]. Por gerar uma chama plana, laminar, normalmente é usada com o objetivo de calibrar um instrumento. Este queimador é utilizado para pesquisa em combustão há 25 anos [Holthuis & Associates]. Sua estrutura é constituída de aço inoxidável na parte exterior, melhor visualizada na Fig. 4.2a, e de aço inox 316 na matriz porosa, que é refrigerada com água, como mostra a Fig. 4.2b. O uso deste dispositivo como fonte de calibração de instrumentos de medição de temperatura particularmente também já é realizado desde a década de 90. Os experimentos estão disponíveis em literatura: Prucker *et al.*, 1994, Sutton *et al.*, 2006, Gregor e Dreizler, 2009.

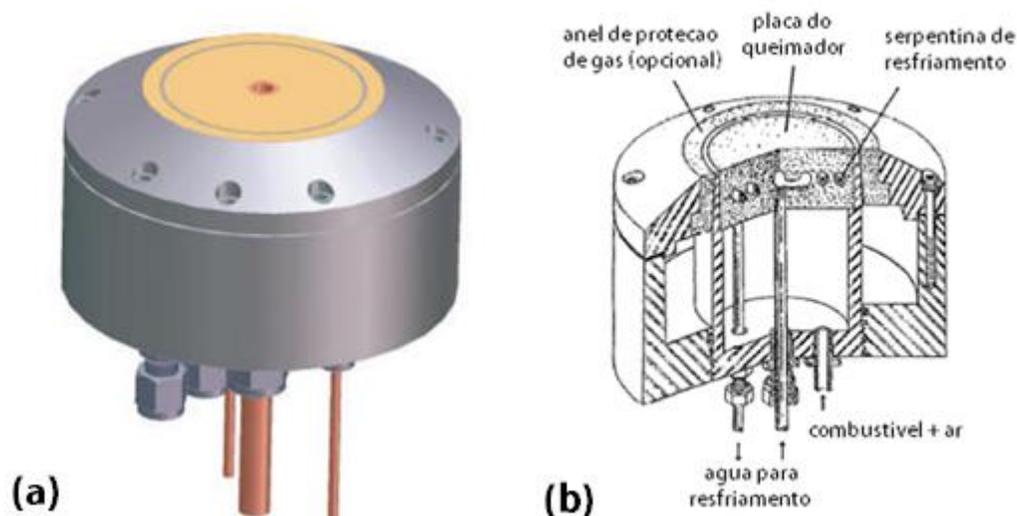


Figura 4.2 – (a) Queimador *McKenna* [Holthuis & Associates]; (b) Corte [adaptado de Prucker *et al.*, 1994]

Numa chama pré-misturada, uma composição de mistura bem definida entra na chama em temperatura e pressão fixas. Portanto, é possível calcular a temperatura adiabática da chama a partir das termodinâmicas da mistura original [El-Mahallawy e Habik, 2002]. Então, é possível ter ideia da ordem de grandeza das temperaturas esperadas. Sabe-se que as temperaturas das chamas planas do queimador *McKenna* são estáveis e quasi-adiabáticas. As perdas por radiação podem ser observadas na literatura.

Assim, uma chama laminar pré-misturada de gás natural e ar, em condição quasi-adiabática, é estabilizada no queimador *McKenna*, a fim de permitir a aferição do instrumento construído. A formação da chama ocorre alimentando o queimador com o gás natural, e aos poucos adiciona-se o ar até a proporção desejada. Posiciona-se o termopar próximo a chama, após a estabilização. As informações são enviadas ao sistema de aquisição, que converte a voltagem em temperatura. É possível visualizar o fluxograma explicado na Fig. 4.3.

Comparando a medição com a temperatura adiabática teórica é possível verificar a funcionalidade do instrumento. Uma mistura pobre ($\phi < 1$) é utilizada para que a chama não ultrapasse a temperatura de fusão da platina. Um programa computacional, *Gaseq*, é utilizado para o cálculo da temperatura adiabática nas condições da medição. A interface do programa pode ser vista na Fig. IV, no Apêndice III.

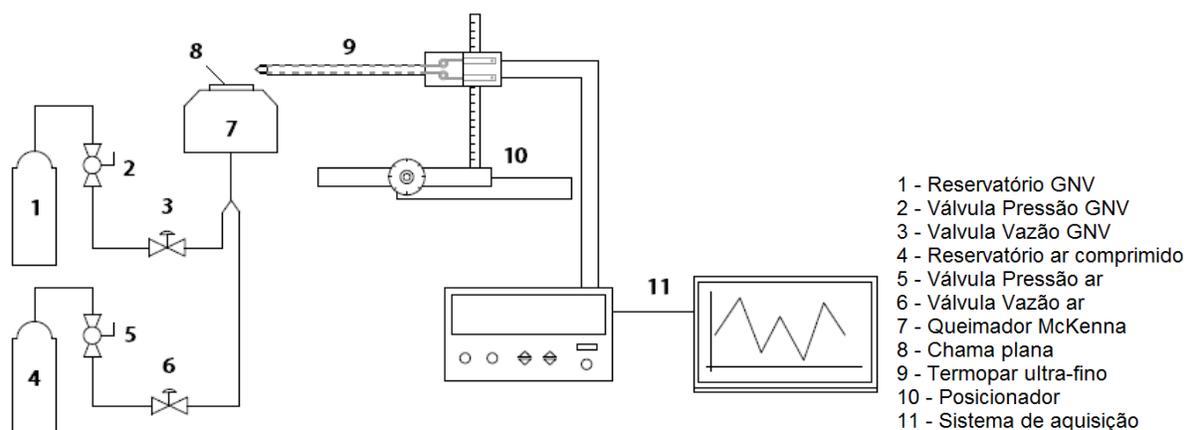


Figura 4.3 – Representação esquemática da medição de temperatura de chamas reproduzidas no queimador *McKenna*.

4.4 Combustível

O combustível utilizado neste trabalho é o gás natural (GNV). Este gás é encontrado na natureza em diversos locais do planeta. É produto de processos naturais que ocorreram nos últimos milhões de anos. Portanto, cada local possui um combustível com composição diferente. Segundo o fornecedor, o GNV utilizado pelo Laboratório de Combustão é de origem boliviana. É composto por metano (90,8%), etano (6,1%), propano (1,2%) e outros gases. Possui um poder calorífico de 38,8 MJ/Nm³.

4.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é realizado com o auxílio de um *data logger* e um computador. Neste trabalho, o equipamento selecionado é da marca Agilent, modelo 34972a, como mostra a Fig. III, no Anexo III. Seleciona-se o tipo de termopar a ser utilizado na medição e o equipamento converte automaticamente a entrada elétrica gerada pela chama no termopar

na temperatura correspondente. O manual do equipamento fornece dados mais específicos, como o erro gerado pelo mesmo.

4.6 Medição de temperatura

Com o funcionamento do termopar aferido, pode-se realizar medições de temperatura em uma chama qualquer com boa confiança. A chama desta vez é não pré-misturada e laminar, utilizando novamente gás natural como combustível e ar como oxidante. O *setup* da medição é similar ao de calibração, conforme representação da Fig. 4.4.

No entanto, ao contrário da situação anterior, os pontos de medição não são definidos pela literatura. Tratando-se do campo de temperaturas, são medidos diversos pontos tanto radialmente quanto axialmente, dando preferência a região da frente de chama. Para isso, dois posicionadores micrométricos são utilizados.

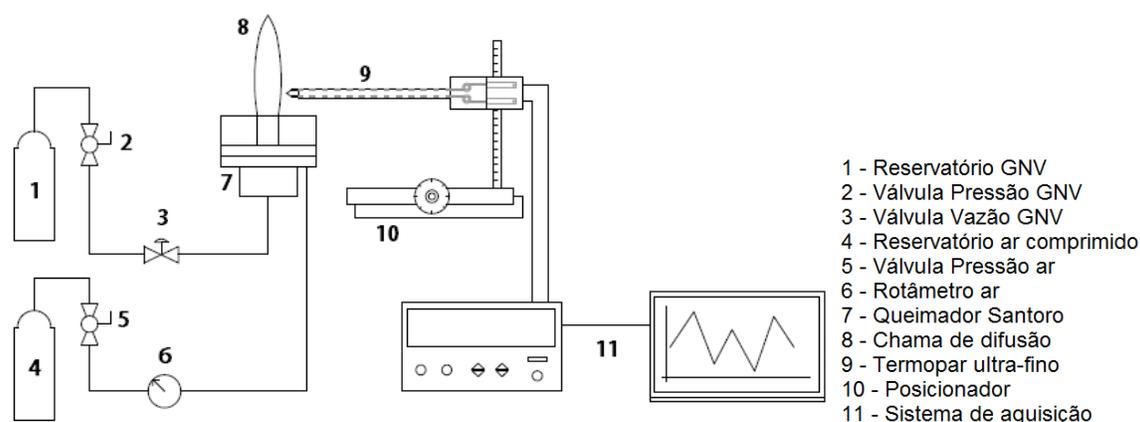


Figura 4.4 – Representação esquemática da medição de temperatura realizada em uma chama não pré-misturada de gás natural.

O queimador utilizado foi o descrito por Santoro e Miller, 1987. O diâmetro interno de saída do combustível é de 11,1 mm. Há um escoamento co-anular, *coflow*, de ar de 101.6 mm para manter a chama laminar. As medições são realizadas no sentido radial, R , em 5 posições para cada uma das 9 posições axiais, H . A vazão é de 8,33 m³/s de gás natural. A região na qual ocorrem os maiores gradientes de temperatura é a frente de chama, por isso esta região tem ênfase neste trabalho. Assim, para cada H , localiza-se a frente de chama, observando o ponto onde se registra a maior temperatura. São medidos outros quatro pontos, dois em direção ao interior da chama e dois na direção oposta, com distância de 1 mm entre cada um deles.

4.7 Tratamento estatístico

Os resultados das medições são submetidos ao critério de *Chauvenet* para descartar valores que fogem da tendência dominante. Segundo Holman, 2012, se a probabilidade de encontrar um valor for menor que $1/2n$ em uma amostra de n medições, então essa amostra pode ser rejeitada. Pela Eq. 4.2, se o valor da medição x , subtraído da média de todos os valores \bar{x} , dividido pelo desvio padrão, σ , for maior que o valor de d_{max}/σ , especificado na Tabela I, Anexo IV, então este valor pode ser descartado.

$$\frac{x - \bar{x}}{\sigma} > \frac{d_{max}}{\sigma} \quad (4.2)$$

4.8 Análise de incertezas

A incerteza da medição tem um papel fundamental na interpretação do resultado. A medição é representada como o seu valor médio dentro de uma tolerância. O método de Kline-McClintock foi utilizado para estimar a incerteza das medições. A propagação de incerteza depende de cada parcela de incerteza presente na medição, como mostra a Eq. 4.3.

$$u = \pm \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{dY}{di} u_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

onde Y é a grandeza medida, sendo função de outras grandezas, $Y = f(i, \dots, n)$. Com essa informação é possível avaliar a qualidade da medição.

Na medição de temperatura em chamas com o termopar, existem várias incertezas. O termopar de tipo R utilizado, fabricado pela Omega Engineering, sofre uma incerteza de medição de uma das seguintes alternativas, sempre devendo ser computada a maior delas: 1,5°C ou 0,25% (em condições padrões), como mostra a Fig II, no Anexo II.

O sistema de aquisição, da marca Agilent, também possui uma incerteza estimada pelo fabricante, que pode ser combinada com o termopar. Neste caso, a incerteza é de 1,2 K para a faixa de temperaturas entre 573 K e 2033 K.

A temperatura adiabática considerada depende da riqueza da mistura. A proporção da mistura dos gases é calculada, havendo uma incerteza de cerca de 0,2% nessa aproximação. Outro parâmetro que está em pauta, neste caso, é a vazão. O controlador de vazão, da marca Bronkhorst, de cada um dos componentes da chama (gás natural e ar) possui uma incerteza de 0,1% do valor de fundo de escala mais 0,5% do valor medido, o que pode ter uma influência de cerca de 0,01% na temperatura da chama.

São calculados a média e o desvio padrão. As incertezas em relação as variâncias estatísticas são da ordem de 0,6% para a chama pré-misturada e 1,0% para as medições na chama não pré-misturada, nas quais foram realizadas 100 medições para cada resultado. As incertezas de cada medição foram calculadas e a maior delas foi escolhida como incerteza total. Portanto, as incertezas resultantes são de 0,7% na chama pré-misturada e 1,0% na chama não pré-misturada, como mostram os cálculos do Apêndice I e II.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medidas realizadas no queimador *McKenna* tem boa concordância com as temperaturas esperadas. A riqueza, ϕ , a temperatura adiabática da chama, T_{ad} , a temperatura medida, T_{med} , e a temperatura corrigida para perdas por radiação, T_{rad} , são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Medição no queimador *McKenna*.

ϕ (1)	T_{ad} (K)	T_{med} (K)	T_{rad} (K)
0,7	1836	1721	1820

A discrepância entre a temperatura medida pelo termopar ultra-fino e a temperatura adiabática calculada é de 6,3%. A diferença reduz-se a 0,9% aplicando-se a correção por radiação.

Assim, realizam-se as medições na chama não pré-misturada sabendo que o termopar apresenta funcionamento satisfatório quando as medições são corrigidas. Os resultados das

medições na chama não pré-misturadas e as temperaturas corrigidas por radiação são mostrados na Fig. 5.1. As medições realizadas pelo termopar ultra-fino são representadas por círculos, enquanto as medições corrigidas são representadas por quadrados.

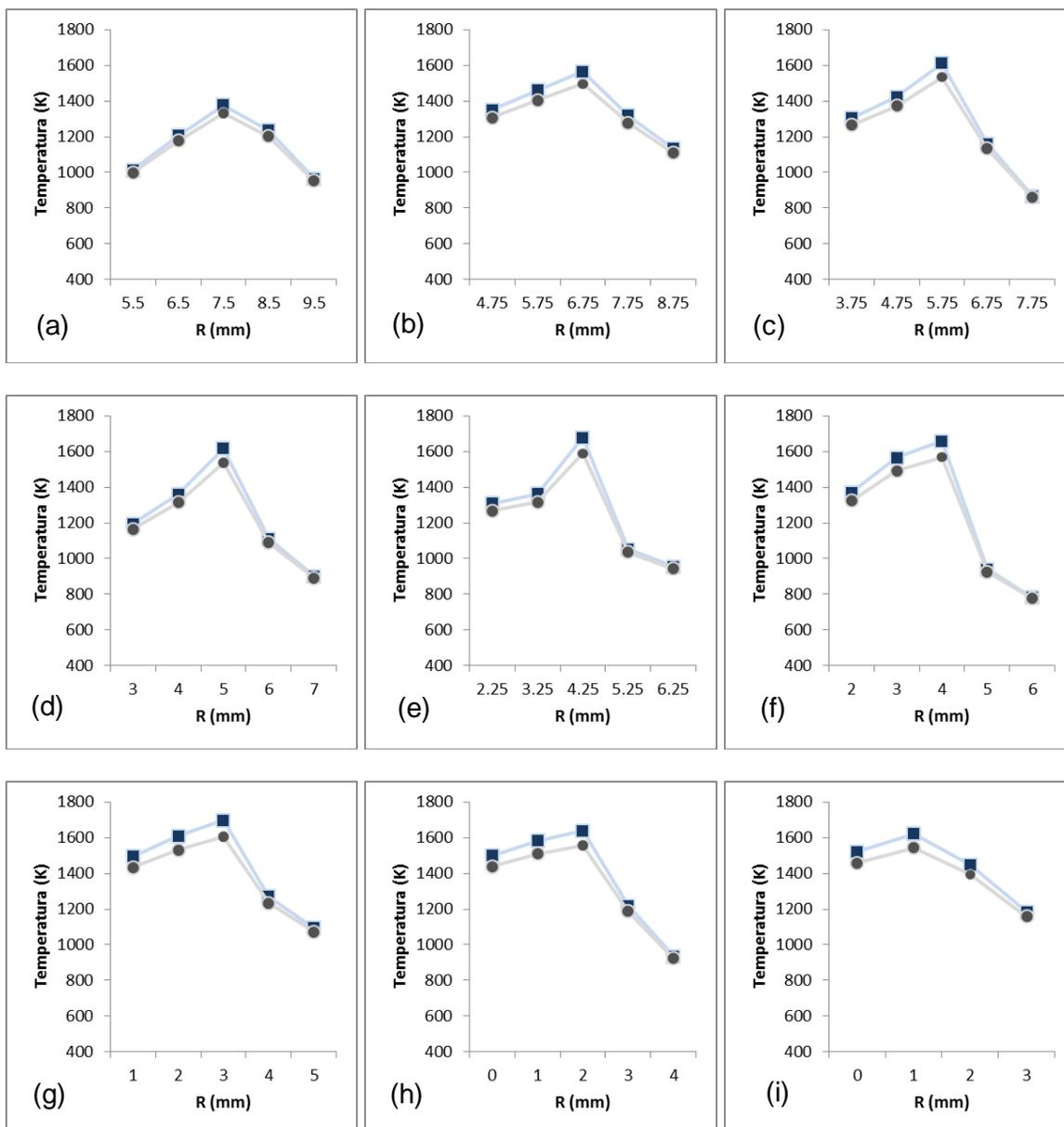


Figura 5.1 – Temperaturas em uma chama não pré-misturada de gás natural medidas (cinza) e corrigidas (azul) em H (a) 5 mm; (b) 15 mm; (c) 25 mm; (d) 35 mm; (e) 45 mm; (f) 55 mm; (g) 65 mm; (h) 75 mm; (i) 85 mm.

Pode-se notar que a temperatura da frente de chama, a maior temperatura, aumenta com a altura da chama. A temperatura máxima registrada ocorre em $H = 65$ mm, como mostra a Fig. 5.1g.

Na parte inferior da chama, os gradientes internos são similares aos externos, como na Fig. 5.1a. À medida que a chama se desenvolve, os gradientes externos apresentam uma tendência de aumento, enquanto os internos tendem a diminuir. Mesmo que os dois pontos situem-se à mesma distância do ponto no qual ocorre a reação, essa diferença ocorre porque o

ponto interno está cercado por altas temperaturas, enquanto o externo só é afetado por altas temperaturas em um dos lados.

Na parte superior da chama, em $H = 85$ mm, a temperatura interna é próxima à temperatura da frente da chama, o que é característico do perfil de qualquer chama não pré-misturada laminar, como se observa na Fig. 5.1i.

As temperaturas corrigidas comportam-se da mesma maneira, naturalmente. As correções são mais acentuadas em temperaturas mais elevadas, chegando a 5,4%. A menor correção ocorreu na menor temperatura registrada (776 K) e foi de 0,7%. Portanto, o método de correção de perdas por radiação e convecção apresenta resultados próximos aos esperados.

É possível utilizar os resultados para gerar uma imagem de melhor visualização do campo de temperaturas da chama, como mostra a Fig. 5.2. As temperaturas corrigidas são utilizadas.

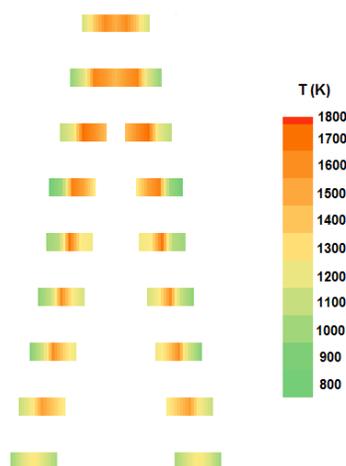


Figura 5.2 – Campo de temperaturas próxima a região de reação de uma chama não pré-misturada de gás natural.

6. CONCLUSÕES

O termopar de 25 μm de diâmetro do tipo R se mostrou capaz de realizar medições de temperatura em chama. O instrumento permitiu a medição de temperatura em um ambiente com variação de temperatura de 300 a 1800 K.

A técnica de fabricação do termopar foi realizada com sucesso. O manuseio dos fios mais finos requerem movimentos micrométricos, por isso aparelhos ópticos foram fundamentais para o acompanhamento.

O queimador *McKenna* permitiu a estabilização de uma chama plana pré-misturada e, com isso, foi possível aferir o funcionamento do instrumento. O instrumento construído apresenta uma discrepância de apenas 0,9% em relação à temperatura adiabática quando corrigido.

As medições de temperatura na chama não pré-misturadas foram realizadas próximas à frente de chama. Características típicas de chamas não pré-misturadas laminares foram observadas. Isto mostra um comportamento estável e preciso por parte do termopar.

Uma imagem foi criada relacionando uma escala de cores à intensidade do campo de temperatura da chama não pré-misturadas para melhor visualização do parâmetro medido.

Os manuais de cada equipamento utilizado e do próprio instrumento foram consultados para contabilizar a incerteza. Assim, juntamente com as variâncias estatísticas, foi possível estimar a incerteza das medições considerando a influência de cada possível fonte de erro. As

incertezas foram estimadas em 1,0% para a chama não pré-misturada e 0,7% na pré-misturada.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam variados os parâmetros da chama (velocidade, riqueza, pressão) e verificar a influência na temperatura. Pode-se também variar o tipo de combustível e a concentração, avaliando as diferenças. Os termopares construídos estarão à disposição no Laboratório de Combustão para isso. No entanto, aconselha-se a construção de novos termopares porque os termopares ultra-finos não possuem vida prolongada. Pode-se fabricar termopares com diferentes configurações e analisar qual tem as menores perdas. Aconselha-se que se construa um termopar com fios de suporte mais distantes, isto é, com fios finos mais longos, a fim de diminuir os erros causados pela condução, que pode ter sido uma fonte de erro neste trabalho. Diferentes métodos de aferição podem ser realizados para verificar o funcionamento do termopar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhattacharjee, S., Paolini, C., Tran, W., Villaraza, J. R., Takahashi, S. **“Temperature and CO₂ fields of a downward spreading flame over thin cellulose: A comparison of experimental and computational results”**, 35th International Symposium on Combustion, 2014.

Borman, G. L., Ragland, K. W. **“Combustion Engineering”**, McGraw-Hill, 1st edition, 1998.

Bradley, D., Entwistle, A. G. **“Determination of the emissivity, for total radiation, of small diameter platinum-10% rhodium wires in the temperature range 600-1450°C”**, British Journal of Applied Physics, vol. 12, pp 708-711, 1961.

Bradley, D., Matthews, K. J. **“Measurement of high gas temperatures with fine wire thermocouples”**, Journal Mechanical Engineering Science, vol. 10, pp 299-305, 1968.

Coelho, P., Costa, M. **“Combustão”**, Edições Orion, 1st edition, 2007.

El-Mahallawy, F., Habik, S. E. **“Fundamentals and technology of combustion”**, Elsevier, 1st edition, 2002.

Empresa de Pesquisa Energética **“Balanço Energético Nacional 2014”**, http://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf. Acessado em: 12/09/2014.

Farrow, R. L., Lucht, R. P., Flower, W. L., Palmer, R. E. **“Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopic measurements of temperature and acetylene spectra in a sooting diffusion flame”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 20, pp 1307-1312, 1984.

Gregor, M. A., Dreizler, A. **“A quasi-adiabatic laminar flat flame burner for high temperature calibration”**, Measurement Science and Technology, vol. 20, pp 2-8, 2009.

Hartlieb, A. T., Atakan, B., Kohse-Höinghaus, K. **“Temperature measurement in fuel-rich non-sooting low-pressure hydrocarbon flames”**, Applied Physics B, vol. 70, pp 435-445, 2000.

Holman, J. P. "**Experimental methods for engineers**", McGraw-Hill, 8th edition, 2012.

Holthuis & Associates, "**McKenna Burner**", <http://www.flatflame.com>. Acessado em 06/09/2014.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P. "**Fundamentals of heat and mass transfer**", 5st edition, John Wiley and Sons, 2002.

Jacobson, M. Z., "**Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols**", Nature, vol. 409, pp 695-697, 2001.

Joo, H. I., Gülder, Ö. L. "**Experimental study of soot and temperature field structure of laminar co-flow ethylene-air diffusion flames with nitrogen dilution at elevated pressures**", Combustion and Flame, vol. 158, pp 416-422, 2011.

Katsuki, K., Mizutani, Y., Matsumoto Y. "**An improved thermocouple technique for measurement of fluctuating temperatures in flames**", Combustion and Flame, vol. 67, pp 27-36, 1987.

Kent, J. H., Wagner, H. GG. "**Temperature and fuel effects in sooting diffusion flames**", Symposium (International) on Combustion, vol. 20, pp 1007-1015, 1985.

LaRue, J. C., Samuelsen, G. S., Seiler, E. T. "**Momentum and heat-flux in a swirl-stabilised combustor**" Symposium (International) on Combustion, vol. 20, pp 277-285, 1984.

Liñán, A., Williams, F. A. "**Ignition in an unsteady mixing layer subject to strain and variable pressure**", Combustion and Flame, vol. 95, pp 31-46, 1993.

Martins, C. A., Lacava, P. T., Pires, A. A. C., Neto, C. G. Ferreira, M. A., de Carvalho Jr, J. A. "**Termopares de fio fino para estudos do campo de temperatura em chamas difusivas turbulentas**", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2^o, 2002.

Masri, A. R., Bilger, R. W., Dibble, R. W. "**Turbulent nonpremixed flames of methane near extinction: mean structure from Raman measurements**", Combustion and Flame, vol. 71, pp 245-266, 1988.

Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., McGhee, J. "**Temperature Measurement**", 2nd edition, John Wiley and Sons, 2002.

Moneib, H.A. "**Experimental Study of the Fluctuating Temperature in Inert and Reacting Turbulent Jets**", Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Thecnology, University of London, 1980.

National Research Council "**Advancing the Science of Climate Change**", The National Academies Press, 2010.

Pita, G. P. A., Nina, M. N. R. "**Errors induced by catalytic effects in premixed flame temperature measurements**", Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, x, pp 179-185, 1989.

Prucker, S., Meier, W., Stricker, W. **“A flat flame burner as calibration source for combustion research: Temperatures and species concentrations of premixed H₂/air flames”**, Review of Scientific Instruments, vol. 65, pp 2908, 1994.

Rumminger, M. D., Dibble, R. W., Heberle, N. H., Crosley D. R. **“Gas temperature above a porous radiant burner: comparison of measurements and model predictions”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 26, 1996.

Santoro, R. J., Miller, J. H. **“Soot particle formation in laminar diffusion flames”**, Langmuir, vol. 3, pp 244-254, 1987.

Sato, A., Hashiba, K., Hasatani, M., Sugiyama, S., Kimura, J. **“A correctional calculation method for thermocouple measurements of temperature in flames”**, Combustion and Flame, vol. 24, pp 35-41, 1975.

Sick, V., Arnold, E., Dießel, T., Dreier, T., Ketterle, W., Lange, B., Wolfrum, J., Thiele, K.U., Behrendt, F., Warnatz, J. **“Two-dimensional laser diagnostics and modeling of counterflow diffusion flames”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 23, pp 495-501, 1991.

Sutton, G., Levick, A., Edwards, G., Greenhalgh, D. **“A combustion temperature and species standard for the calibration of laser diagnostic techniques”**, Combustion and Flame, vol. 147, pp 39-48, 2006.

Tropea, C., Yarin, A. L., Foss, J. F. **“Springer Handbook of experimental fluid mechanics”**, 1st edition, Springer, 2007.

Turns, S. R. **“An introduction to combustion: concepts and applications”**, 2nd edition, McGraw-Hill, 2000.

Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. W. **“Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation”**, 4th edition, Springer, 2006.

ANEXO I

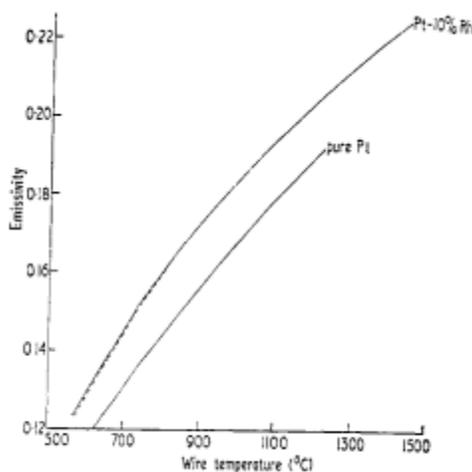


Fig. 4. Emissivity at different temperatures.

Figura I – Emissividade dos materiais Pt e Pt-Rh10% em função da temperatura [Bradley e Entwistle, 1961].

ANEXO II

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade
32 to 2642°F
0 to 1450°C

Extension Grade
32 to 300°F
0 to 150°C

LIMITS OF ERROR
(whichever is greater)
Standard: 1.5°C or 0.25%
Special: 0.6°C or 0.1%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:
Oxidizing or Inert; Do Not Insert in Metal Tubes;
Beware of Contamination; High Temperature

TEMPERATURE IN DEGREES °C
REFERENCE JUNCTION AT 0°C



Thermocouple
Grade

NONE
ESTABLISHED

Platinum-13% Rhodium
VS.
Platinum

Extension
Grade



Revised Thermocouple
Reference Tables

TYPE R
Reference
Tables
N.I.S.T.
Monograph 175
Revised to
ITS-90

Figura II – Termopar tipo R [Omega Engineering].

ANEXO III



Figura III – Agilent 34972a, equipamento para aquisição de dados [Agilent].

ANEXO IV

Tabela I – Critério de Chauvenet para descartar uma leitura [adaptado de Holman, 2012].

Número de leituras, n	Razão de desvio máximo, d_{\max}/σ
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,8
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

APÊNDICE I

Cálculo da incerteza na medição da chama pré-misturada:

Utilizando a Eq. 4.3, é possível quantificar a incerteza total da medição na chama pré-misturada, u_{pm} .

$$u_{pm} = \pm \left[\left(\frac{dT}{dt} u_t \right)^2 + \left(\frac{dT}{dsa} u_{sa} \right)^2 + \left(\frac{dT}{d\varphi} u_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{dT}{dv} u_v \right)^2 + \left(\frac{dT}{dS} u_s \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{pm} = \pm [(1721 K * 0,0025)^2 + (1,2 K)^2 + (1721 K * 0,002)^2 + (1721 K * 0,001)^2 + (1721 K * 0,006)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 11,9 K \approx \pm 0,7\%$$

APÊNDICE II

Cálculo da incerteza na medição da chama não pré-misturada:

A maior incerteza registrada que foi na temperatura de 1317 K. Utilizando a Eq. 4.3, é possível quantificar a incerteza que será considerada como a total da medição da chama, u_{np} .

$$u_{np} = \pm \left[\left(\frac{dT}{dt} u_t \right)^2 + \left(\frac{dT}{dsa} u_{sa} \right)^2 + \left(\frac{dT}{dv} u_v \right)^2 + \left(\frac{dT}{dS} u_s \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{np} = \pm [(1317 K * 0,0025)^2 + (1,2 K)^2 + (1317 K * 0,001)^2 + (1317 K * 0,01)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 13,7 K \approx \pm 1,0\%$$

APÊNDICE III

O cálculo da temperatura adiabática da mistura de gás natural e ar, com relação de equivalência igual a 0,7. As condições iniciais da mistura são consideradas 293,13 K para a temperatura e 1 atm para a pressão. A temperatura adiabática resultante é de 1836,5 K.

The screenshot shows the Gaseq software interface. The 'Problem Type' is set to 'Adiabatic T and composition at const P'. The 'Reactants' table lists species with their respective moles and mole fractions. The 'Products' table lists species with their respective moles and mole fractions. The 'Calculate (F10)' button is highlighted. The main window displays a table of thermodynamic properties for both reactants and products.

Species	No. Moles	MolFrac	K
N2	11,2376	0,73890	
O2	2,98500	0,19627	
CH4	0,90800	0,05970	
C2H6	0,06100	4,01e-03	
C3H8	0,01200	7,89e-04	
CO2	0,00500	3,29e-04	

Species	No. Moles	MolFrac	K
N2	11,2183	0,73538	
H2O	2,04077	0,13378	
CO2	1,06969	0,07012	
CO	0,00131	8,60e-05	
O2	0,87406	0,05730	
OH	0,01114	7,30e-04	
H	4,738e-05	3,11e-06	
O	6,173e-04	4,05e-05	
H2	6,361e-04	4,17e-05	
NO	0,03857	2,53e-03	
HCO	2,108e-12	1,38e-13	
CH2O	3,778e-14	2,48e-15	
CH4	1,100e-22	7,21e-24	
CH3	2,025e-22	1,33e-23	
H02	1,068e-05	7,00e-07	
NO2	4,417e-05	2,90e-06	
NH3	9,856e-11	6,46e-12	
NH2	1,995e-11	1,31e-12	
N	8,992e-10	5,89e-11	
HCN	3,979e-15	2,61e-16	
CN	6,499e-18	4,26e-19	
N2O	1,907e-06	1,25e-07	
C2	1,196e-35	7,84e-37	
CH	5,437e-24	3,56e-25	

Property	Reactants	Products
Temperature, K	293,15	1836,5
Pressure, atm	1,0	1,0
Volume Products/Reactants		6,2871
Moles Products/Reactants		1,00306
H0, kcal/mol	-1,236	-1,232
S0, cal/mol/K	47,734	62,748
Cp, cal/mol/K	7,068	9,413
Gamma, Cp/Cv	1,391	1,268
Mean Molecular Weight, g	28,11	28,02
Density, kg/m3	1,1691	0,18595
Sound speed, m/s	347,1	830,9
Enthalpy, H, kcal/kg	-43,97	-43,97
Entropy, S, cal/kg/K	1698,18	2239,14
Intern Energy, U, kcal/kg	-64,68	-174,20
Free Energy, G, kcal/kg	-541,53	-4156,12
Cp, cal/kg/K	251,45	335,91
Volume/mole, m3	24,0434	150,701
Molecules/cc	2,50E+19	4,00E+18
Moles/cc	4,16E-05	6,64E-06
Viscosity, kg/m/s	1,78E-05	6,26E-05
KinematicVisc, m2/s	1,53E-05	3,37E-04
ThermCond, cal/m/K/s	5,61E-03	2,58E-02
ThDiffusivity, m2/s	1,91E-05	4,14E-04

Figura IV – Programa Gaseq para o cálculo de temperatura adiabática da chama pré-misturada de GNV e ar.