

ESTUDO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM CÂMARAS DE COMBUSTÃO

Rafael Eduardo da Cruz

Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLAR/NCTS – Campus Universitário Trindade, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil - 88040-900
rafael@labsolar.ufsc.br

Profa. Marcia Barbosa Henriques Mantelli, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLAR/NCTS – Campus Universitário Trindade, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil - 88040-900
marcia@labsolar.ufsc.br

***Resumo.** Câmaras de combustão podem ser encontradas em vários tipos de equipamentos, desde domésticos, como fornos de cocção, até industriais, como geradores de vapor e fornos industriais de alimentos. A combustão do combustível, que no presente trabalho é GLP (gás liquefeito de petróleo), ocorre dentro destas câmaras. O presente trabalho tem por objetivo medir temperaturas dentro de uma câmara de combustão, bem como da parede da câmara, por conseguinte obtendo a distribuição interna de temperatura. Para tal, parâmetros como altura do queimador com relação ao teto da câmara, vazão de gás combustível e volume da câmara de combustão foram testados em um aparato experimental especialmente projetado e construído para este fim. Os testes foram realizados segundo planejamento fatorial 2^3 , onde os efeitos das variações dos fatores podem ser calculados, bem como os efeitos das interações entre os fatores. Assim, pode-se determinar não somente as distribuições de temperatura, mas também conhecer alguns parâmetros que influenciam estas distribuições. É esperado que, a partir do presente trabalho, sejam conhecidos os fatores, que mais influenciam as temperaturas e sua respectiva distribuição, em determinados níveis de operação, para diferentes configurações de operação. Espera-se também que este conhecimento seja utilizado no projeto de câmaras de combustão mais eficientes para a aplicação a que se destinam.*

Palavras chave: Câmara de combustão, distribuição de temperatura, temperatura média.

1. Introdução

Câmaras de combustão podem ser encontradas em vários tipos de equipamentos, desde domésticos, como fornos de cocção, até industriais, como geradores de vapor e fornos industriais de alimentos. A combustão do combustível, que no presente trabalho é o GLP (gás liquefeito de petróleo), ocorre dentro destas câmaras. Um bom desempenho térmico de câmaras de combustão é obtido quando uma quantidade balanceada de combustível (gás) e comburente (ar) é fornecida para queima, de maneira que seja garantida uma queima completa do gás disponível. Por sua vez, a câmara de combustão deve ser projetada para permitir que o equipamento possa absorver eficientemente a energia térmica disponível, por convecção e radiação, após a ocorrência da combustão.

O presente trabalho, que está em andamento no Laboratório de Tubos de Calor (Labtucal/Lepten), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tem aplicações em equipamentos como fornos de cocção de pães, fornos domésticos, fornos de pizzas, fornos de secagem de biscoitos, fornos de secagem de grãos (arroz, soja, e cereais em geral), aquecedores de tanques de armazenamento de óleos pesados como asfalto (aplicações na Refinaria LUBNOR, Fortaleza), etc. Em uma aplicação desenvolvida no laboratório, termossifões verticais foram adaptados dentro de câmaras de cocção de fornos de padaria. O objetivo principal foi obter um melhor desempenho térmico do forno, através da melhor distribuição de temperatura dentro da câmara e também do aumento da absorção do calor liberado, durante o processo de combustão, pelos evaporadores dos termossifões.

O calor necessário para cocção nos fornos tem sua origem na queima gás, realizada em queimadores de pequeno porte (queimadores domésticos), sendo estes queimadores localizados dentro da câmara de combustão. Este calor deve ser absorvido pelo termossifão, que se constitui em um tubo, o qual tem uma parte dentro do forno e outra parte dentro da câmara de combustão.

Portanto, o termossifão transfere energia térmica da câmara de combustão para o interior do forno, através do fluido de trabalho (água), sem misturar os gases da combustão com os gases do interior do forno (Mantelli 2004). Um esquema deste tipo de forno, existente nas dependências do Labtucal, está representado na Fig.1.

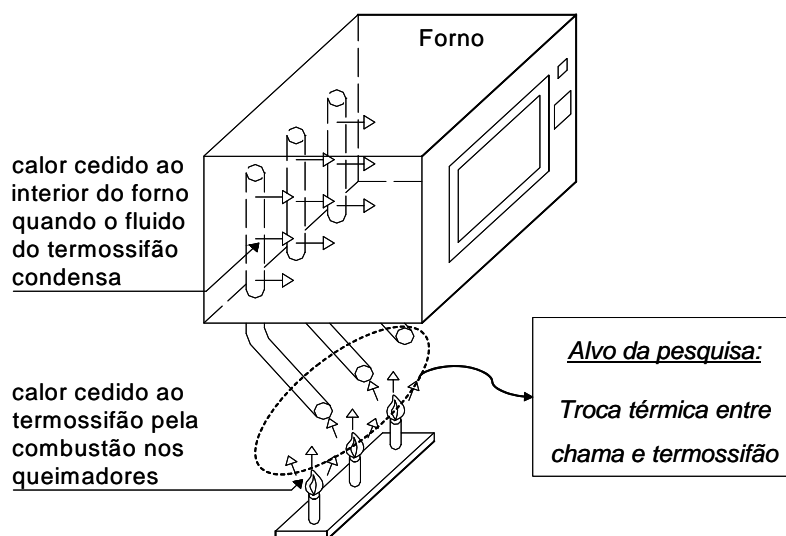


Figura 1: Esboço de um forno assistido por termossifões.

O presente trabalho tem o objetivo de medir as temperaturas dentro de uma câmara de combustão, bem como da parede da câmara, por conseguinte obtendo a distribuição interna de temperatura. Para tal, três parâmetros considerados importantes, segundo a literatura, foram testados em um aparato experimental especialmente projetado e construído para este fim, de forma que não somente fossem determinadas as distribuições de temperatura, mas também que pudessem ser conhecidas algumas variáveis que influenciam estas distribuições. Estes parâmetros, ou fatores (Neto, Scarminio e Bruns, 2002), foram testados em dois níveis. Abaixo, na Tabelas 1, seguem os fatores testados, bem como os seus respectivos níveis.

Tabela 1: Parâmetros e respectivos níveis de teste.

Fatores	Níveis	
	(-)	(+)
1 Altura queimador	0	1
2 Vazão	1 l/min	2 l/min
3 Volume Câmara	0,0445 m ³	0,089 m ³

É esperado que, a partir do presente trabalho, dados sejam disponibilizados, que permitam um melhor conhecimento da distribuição de temperatura dentro de câmaras de combustão, bem como o efeito dos fatores que, em determinados níveis, mais influenciem as temperaturas e respectivas distribuições, para diferentes configurações de operação.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Taxas de transferência de Calor

A taxa de liberação de energia térmica em processos de combustão consiste da taxa de geração de energia das reações químicas de combustão do gás (combustível) com o oxigênio do ar (oxidante). Esta taxa é conhecida como “taxa química de liberação de calor” (Tewarson, 1995), e se divide em taxa radiativa e taxa convectiva de liberação de calor, tendo, portanto, dois componentes.

A eficiência da combustão de combustíveis alifáticos, que são aqueles que contêm carbono, oxigênio e hidrogênio, é próxima a 95%, onde as parcelas convectiva e radiativa são aproximadamente iguais a 60% e 35%, respectivamente. Ainda segundo Tewarson (1995), o processo de combustão é sempre incompleto, ou seja, os resultados da queima (produtos) apresentam monóxido de carbono (CO), sendo o índice de liberação de CO uma medida da eficiência da queima do gás.

2.2. O processo de combustão

Constitui-se em reação química exotérmica entre o combustível e o oxidante (que na maior parte das aplicações de combustão é o ar atmosférico), formando os produtos da combustão, que são gases e cinzas. Diz-se exotérmica devido à liberação de energia decorrente do processo de combustão (De Carvalho Jr., 2004).

Isto se deve ao fato de que a nova matéria formada (gases e cinzas) tem menor energia (denominada entalpia a pressão constante para o presente caso) que a matéria original da combustão (combustível e oxigênio). Este excesso de energia é liberado na forma de luz e calor.

Apenas parte desta energia é utilizada para o processo de aquecimento aqui desejado. Isto se deve a perdas de parte da energia através dos fumos (gases produzidos na combustão), resíduos, perdas de calor pelas paredes dos equipamentos, entre outros.

Analogamente ao presente experimento a ser realizado, os processos de combustão geralmente de interesse caracterizam-se pelo fato de ocorrerem a pressões próximas a do ambiente. Portanto, não se tem afastamentos apreciáveis em relação ao comportamento ideal dos gases (Gomide, 1924).

Pela 1ª lei da termodinâmica, a lei da conservação da energia, pode-se inferir que a diferença entre as entalpias de formação dos reagentes (combustível + oxidante) e dos produtos é a entalpia ou calor de combustão (ΔH), também chamado de poder calorífico do combustível (De Carvalho Jr., 2004). A partir daí, pode ser calculada a energia liberada no processo de combustão e a temperatura adiabática da chama, sendo o maior valor que se pode obter para os produtos de combustão, conforme detalhado no trabalho de De Carvalho Jr. (2004).

2.2.1. Os queimadores

Queimador é o equipamento que processa a queima do combustível em uma fornalha. Para o presente caso, tem-se combustível gasoso (GLP). A principal função do queimador é promover uma mistura eficiente entre o ar e o combustível, de tal maneira que a chama seja estável e bem conformada (Garcia 2002). Ainda, deve garantir que não haverá retorno e nem deslocamento de chama.

Seguem algumas definições importantes:

- Ar primário: é o ar que entra misturando diretamente com o gás combustível.
- Ar secundário: é o ar que entra no queimador pela sua periferia, junto ao bloco refratário.
- Razão de redução de queima (ou Turn-Down Ratio): é uma medida da flexibilidade de variação de cargas do queimador, definindo-se como a razão entre a liberação máxima e mínima de calor.
- Retorno de chama: é o fenômeno que ocorre quando a velocidade de propagação da chama é maior do que a velocidade de saída da mistura ar primário e combustível, fazendo com que a chama venha a ocorrer dentro do queimador.
- Deslocamento de chama: é o contrário do retorno, isto é, ocorre quando a velocidade da mistura combustível e ar é muito maior do que a de propagação da chama, assim a chama ocorre a uma distância grande do queimador. Também é chamado de Lift-Off (Ghosal e Vervisch, 2001).

Os queimadores de gases combustíveis podem ser divididos em aspirantes e de queima direta (Garcia 2002). Nos aspirantes, que constitui o tipo de queimador utilizado no presente trabalho, a maior parte do ar de combustão é aspirada pela expansão do gás combustível dentro de um venturi, onde se realiza a mistura de ar e gás combustível. Estes são de chama curta, baixa capacidade e baixa razão de redução de queima. A Fig.2 trás um croqui em escala para ilustrar o queimador que será utilizado.



Figura 2: Esboço em escala do queimador.

Alguns testes já realizados no laboratório utilizaram um queimador aspirante. Estes testes também forneceram embasamento para a construção deste experimento. Contudo, foram testes preliminares de apenas medição de temperatura nos evaporadores dos termosifões.

Para a seleção de um queimador, se faz necessária à análise de alguns parâmetros (Garcia 2002), tais como:

- Excesso de ar para a combustão.
- Liberação de calor de cada queimador.
- Distância entre os queimadores.
- Pressão disponível de gás combustível.

O excesso de ar é a quantidade de ar adicionado, além do volume estequiométrico, que se introduz na região de queima, de modo a se ter certeza de que todo o combustível foi queimado (Garcia 2002). Isto acarreta em teores de monóxido de carbono (CO) desprezíveis nos produtos da combustão, o que é desejável. A distribuição homogênea do ar em volta do queimador, e de forma igualitária para todos os queimadores, é fundamental para se evitar má queima ou excessos de ar em uns e falta em outros pontos de queima. Para isto, devem-se usar baixas velocidades de escoamento de ar na entrada de cada queimador. Por outro lado, na saída do queimador (onde ocorre a chama), deve-se ter alta turbulência, de forma a se ter grande eficiência da mistura ar e combustível (Garcia 2002). Isto minimiza a exigência de excesso de ar e possibilita a queima com chama mais curta. Entretanto, deve-se ressaltar que a turbulência na saída do queimador não deve ser excessiva, pois pode haver apagamento da chama ou instabilidades da mesma. A partir destas informações obtidas, conclui-se que o ideal é que se tenha turbulência na área de mistura e não junto à chama. Normalmente, os queimadores convencionais demandam de 15% a 20% de excesso de ar (Garcia 2002), para a queima de gás combustível de maneira mais eficiente.

3. A bancada experimental

A Fig. 3 apresenta um croqui em escala da bancada experimental. Para melhor ilustração do experimento, as tampas frontal e traseira não estão sendo mostradas, assim como a estrutura em arames que contém os 26 termopares para medição das temperaturas em planos ortogonais ao comprimento do queimador.

Após o início da queima, a câmara de combustão acomoda os gases de combustão, até que seja atingido o regime permanente. Quando isto ocorre, a configuração do sistema (gás de combustão e troca térmica) não muda mais, permanecendo as temperaturas e a composição dos gases de combustão constantes.

Neste instante iniciam os testes, com a tomada das temperaturas, em seções ortogonais ao queimador e ao longo do comprimento do forno, paralelas ao plano xy da figura 3. Para cada configuração dos fatores, são tomadas cinco seções ao longo do forno, espaçadas 80 mm umas das outras, desta forma fazendo uma varredura das temperaturas no interior da câmara, na direção z da Fig. 3. Os testes terminam sempre quando as temperaturas nas seções permanecerem constantes, ou seja, quando regime permanente é atingido.

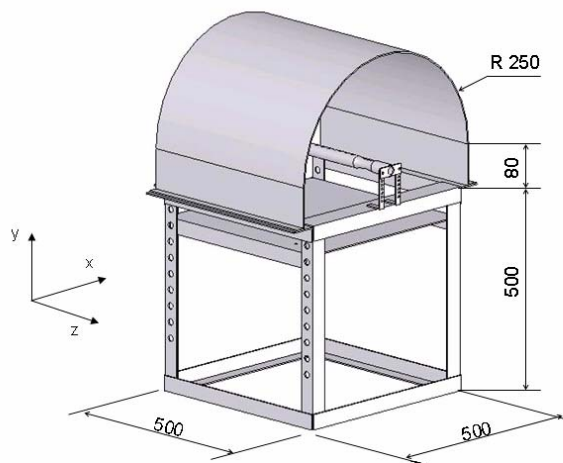


Figura 3: Desenho esquemático em escala da bancada experimental, em mm.

3.1. A estrutura de medição das temperaturas.

Na Fig. 4 segue um desenho ilustrativo em vista frontal, dos 26 termopares que são fixos em uma estrutura de arame, conforme ilustrado na Fig. 5.

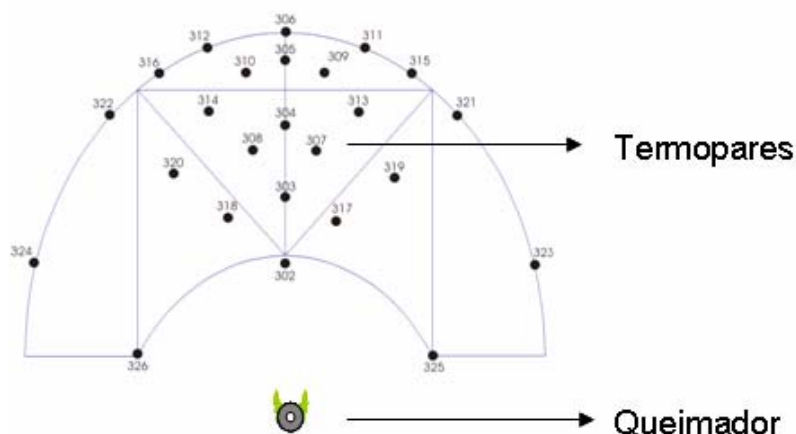


Figura 4: Localização de cada termopar na estrutura que corre ao longo do forno.



Figura 5: Foto ilustrando a estrutura que corre ao longo do comprimento do forno.

4. Testes preliminares

Com a finalidade de conhecer melhor o aparato experimental e inferir aspectos sobre o comportamento do processo de queima, foram realizados testes preliminares. Para se poder realizar a blocagem do teste experimental (verificar quais parâmetros indesejáveis que podem contaminar os dados a serem obtidos), foi necessária a análise de diversos parâmetros que mostraram ser significativamente influentes, os quais são descritos a seguir.

- Ar condicionado: deve ser mantido desligado durante os testes,
- Portas e exaustores da sala, que devem permanecer fechados e desligados, impedindo que correntes repentinas de ar, ou seja, que bolsões de ar frio entrem na câmara pela área de entrada de ar secundário,
- Isolamento térmico da carcaça externa da câmara: a câmara de ser cuidadosamente isolada termicamente do meio exterior executado, pois impede a fuga de calor para o exterior da câmara.

Além dos parâmetros citados acima, durante a realização de testes preliminares, pôde-se observar que:

- Mesmo variando a vazão de gás significativamente, o regime permanente no interior da câmara é sempre atingido em, no máximo, aproximados 30 minutos, todavia se dando a temperaturas diferentes para vazões diferentes.
- O processo de aquecimento da chapa de aço calandrada que constitui a câmara de combustão é contínuo, sem oscilações relevantes e apresentam curvas de aquecimento semelhantes as dos termopares. Porém, o processo de aquecimento do ar no interior da câmara, medido pelos termopares apresenta grande oscilação. Entretanto, não é interesse do presente trabalho conhecer a fundo o regime transiente, uma vez que os testes se dão em regime permanente.
- O gradiente térmico no interior da câmara de combustão é bastante elevado, podendo ser de 200 °C (diferença entre termopar 302 e 326 para o ensaio 3, ver Fig. 4, Seção 3).

- O comportamento das temperaturas no interior da câmara em regime permanente é bastante oscilante. Por exemplo, pode-se observar variação de quase ± 20 °C em posições logo acima do queimador, para condições de teste onde maiores níveis de temperatura são atingidos (Ensaio 3, ver Seção 5).

5. Testes realizados por planejamento fatorial 2^3

Os testes são realizados sob o princípio experimental da aleatorização, ou seja, em ordem aleatória, o que permite impedir que fatores indesejáveis e de não conhecimento do pesquisador contaminem os resultados. Experimentos com apenas dois níveis são muito úteis em investigações preliminares, quando se deseja saber se alguns fatores têm ou não influência significativa sobre a resposta do sistema (Neto, Scarminio e Bruns, 2002). Desta forma, utilizando dois níveis extremos e opostos podem ser detectadas grandes influências por parte de determinados fatores e respectivos níveis. Conseqüentemente, tais influências podem ser posteriormente testadas mais detalhadamente, através de novos ensaios em torno da região de resposta destes fatores e níveis. Analogamente, influências insignificantes podem ser logo descartadas não atrasando o trabalho de pesquisa, sendo assim denominadas variáveis inertes. Por esta razão, como se conhece pouco sobre o comportamento térmico do presente no experimento, bem como a variabilidade deste com relação aos parâmetros a serem controlados, uma triagem das variáveis pode ser feita numa primeira bateria de testes com dois níveis.

De acordo com um planejamento fatorial 2^3 , segue a matriz de planejamento contida na Tabela 2, a qual contém os ensaios a serem realizados, os níveis de cada fator em que os ensaios serão feitos e o espaço para anotar as temperaturas encontradas para cada ensaio.

Tabela 2: matriz de planejamento fatorial 2^3 .

PLANEJAMENTO FATORIAL 2^3										
Ensaio	fator 1	fator 2	fator 3	Resultados [°C]						
	altura	vazão	volume	T1 _m	T2 _m	T3 _m	T4 _m	T5 _m	T _m	T _{m cone}
1	-	-	-							
2	+	-	-							
3	-	+	-							
4	+	+	-							
5	-	-	+							
6	+	-	+							
7	-	+	+							
8	+	+	+							

Na tabela acima, T1_m significa a temperatura média na primeira seção do forno, contando a partir do começo do queimador, onde gás é injetado. De forma semelhante, seguem T2_m, T3_m, T4_m e T5_m, sendo também calculadas fazendo uma média simples entre as 26 temperaturas medidas. T_m significa temperatura média das médias nas seções medidas, calculada analogamente, através da seguinte equação:

$$T_m = \frac{T1_m + T2_m + T3_m + T4_m + T5_m}{5} \quad (1)$$

Por sua vez, T_{m cone} significa também uma temperatura média na respectiva seção, porém desconsiderando-se os termopares 323, 324, 325 e 326 (vide figura 4), representando, portanto a região em forma de cone invertido, localizada logo acima do queimador. A palavra cone é utilizada apenas para melhor ilustrar esta área acima do queimador, uma vez que não se trata de um volume e sim de uma região bidimensional. Esta região é a de interesse do presente trabalho, uma vez que nas aplicações presentes nos fornos e nas pesquisas do Labtucal – UFSC, é nesta região que se localizam os evaporadores que devem absorver a energia proveniente da queima de combustível. Por esta razão, os resultados são feitos para esta temperatura T_{m cone}.

6. Resultados: Cálculo dos efeitos

Segue tabela com os ensaios realizados, a configuração dos fatores nos respectivos ensaios e as temperaturas médias calculadas a partir dos valores de temperatura medidos em cada seção.

Tabela 3: Temperaturas médias encontradas para cada ensaio.

PLANEJAMENTO FATORIAL 2 ³										
Ensaio	altura	vazão	volume	Resultados [°C]						
				T1 _m	T2 _m	T3 _m	T4 _m	T5 _m	T _m	T _{m cone}
1	-	-	-	167,0	164,0	168,8	165,0	165,4	166,0	169,1
2	+	-	-	171,7	175,4	177,9	171,8	185,7	176,5	185,3
3	-	+	-	259,1	258,9	277,5	265,7	265,8	265,4	271,7
4	+	+	-	244,0	247,7	271,8	264,9	273,2	260,3	275,0
5	-	-	+	151,4	155,1	161,5	155,8	155,5	155,9	160,6
6	+	-	+	153,3	157,6	161,8	154,7	151,7	155,8	159,9
7	-	+	+	216,2	218,7	229,4	221,1	225,7	222,2	229,7
8	+	+	+	220,2	224,5	255,6	235,7	233,3	233,9	248,4

Para cálculo dos efeitos de cada fator bem como das interações entre os fatores, deve-se multiplicar cada coeficiente de contraste (mostrados na Tabela 4) pelo valor da temperatura correspondente (mostradas em amarela na Tabela 3), somar todos estes termos e posteriormente dividir o resultado por quatro, conforme descrito detalhadamente por Neto, Scarminio e Bruns (2002). Exemplificando, é calculado abaixo o efeito decorrente do aumento da vazão, que constitui o Fator 2.

$$Efeitoda\ vazão = \frac{-1 \times 169,1 - 1 \times 185,3 + 1 \times 271,7 + 1 \times 275,0 - 1 \times 160,6 - 1 \times 159,9 + 1 \times 229,7 + 1 \times 248,4}{4} = 87,5^{\circ}C$$

Todos os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4, tendo todos os cálculos sido feitos em planilhas do software EXCEL, do Microsoft Office, não se fazendo necessário mostrá-los no presente trabalho. Assim a Tabela 4 apresenta os coeficientes de contraste, para cálculo dos efeitos dos fatores e também dos efeitos causados pelas interações entre os fatores, bem como todos os efeitos calculados.

Tabela 4: Coeficientes de contraste e efeitos.

EFEITOS DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2 ³										
Ensaio	fator 1 altura	fator 2 vazão	fator 3 volume	inter 12	inter 13	inter 23	inter 123	Resultado [°C] para:		
								efeitos	T _m	T _{m cone}
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	fator 1 =	4,2	9,4
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	fator 2 =	81,9	87,5
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	fator 3 =	-25,1	-25,6
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	inter 12 =	-1,0	1,6
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	inter 13 =	1,6	-0,4
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	inter 23 =	-9,7	-8,7
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	inter 123 =	6,8	8,1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1			

A Tabela 4 mostra que a vazão é o parâmetro mais influente no presente experimento, uma vez que o seu aumento de 1 para 2 l/min, aumentou em média a T_{m cone} em 87,5 oC. Observando o efeito causado pela interação entre os fatores, não há evidência significativa de que esse aumento dependa da variação dos outros fatores, ao menos na faixa experimental investigada.

Segue abaixo uma representação gráfica para melhor ilustrar os dois efeitos mais significativos, sendo estes provenientes da variação da vazão de gás GLP e do volume da câmara de combustão. Todos os valores nesta representação estão em graus Celsius, com exceção dos eixos, os quais contêm os níveis de variação destes fatores, conforme apresentado na Tabela 1.

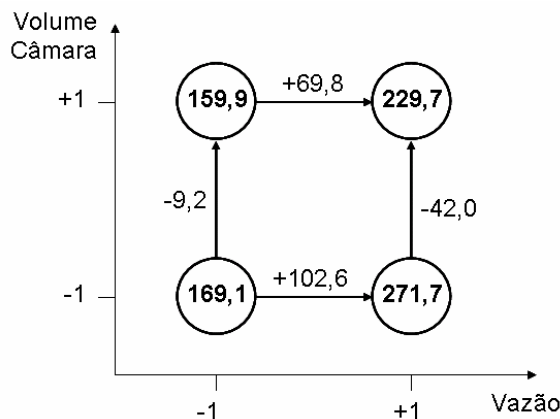


Figura 6: Diagrama para representar os efeitos da vazão e volume de câmara.

6.1. Os perfis de temperatura

De posse dos valores das temperaturas no plano de medição, foram gerados perfis de temperatura para cada seção medida, utilizando o software SURFER (Surface Mapping System, version 8.00, 2002). A partir das cinco seções medidas, foram gerados cinco perfis de temperatura para cada ensaio, totalizando 40 perfis. Por conveniência, apenas um perfil será mostrado, ou seja, o perfil obtido na Seção 3 do Ensaio 3. Este perfil foi escolhido por ilustrar bem o comportamento térmico obtidos pelos outros ensaios e por apresentar um nível maior de temperatura, o que facilita a visualização dos resultados. Desta forma, a Fig. 7 que segue abaixo, ilustra a ferramenta que fornece boa visualização dos campos de temperatura no interior do forno.

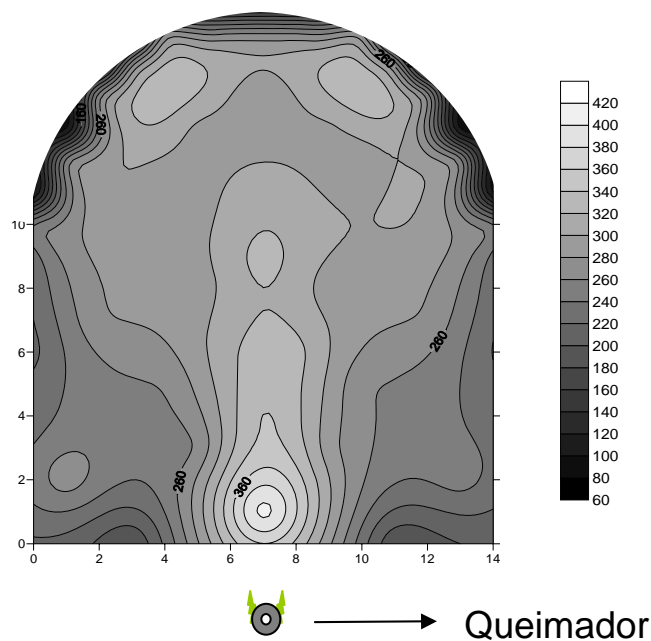


Figura 7: Campo de temperaturas em °C no interior do forno na Seção 3 do Ensaio 3.

A Fig. 7 acima mostra que, a partir dos campos de temperatura calculados, é possível confirmar a hipótese de que a região em forma de cone invertido acima do queimador é realmente aquela mais quente. Portanto, esta é a região de interesse da presente pesquisa, onde reside a maior parte da energia disponível liberada pelo processo de combustão.

O método de interpolação escolhido é aquele de função em base radial, consistente com a geometria do forno. A malha utilizada é de 100 linhas por 83 colunas. O tempo para gerar o perfil é menor que 1 segundo e o software fornece um relatório estatístico completo do processo de cálculo e geração dos perfis, o qual será aqui omitido por conveniência. Assim, o software mostra ser uma ferramenta eficiente para o fornecimento dos perfis de temperatura acima do queimador, possibilitando uma boa visualização dos campos de temperatura e do escoamento dos gases,

conforme mostra a Fig. 8 abaixo. Nesta figura, ilustra-se um mapa das temperaturas num plano vertical ao longo e acima do queimador, ou seja, perpendicular às seções de medição das temperaturas médias, o que fornece juntamente com estas seções intermediárias um mapeamento tridimensional do interior do forno.

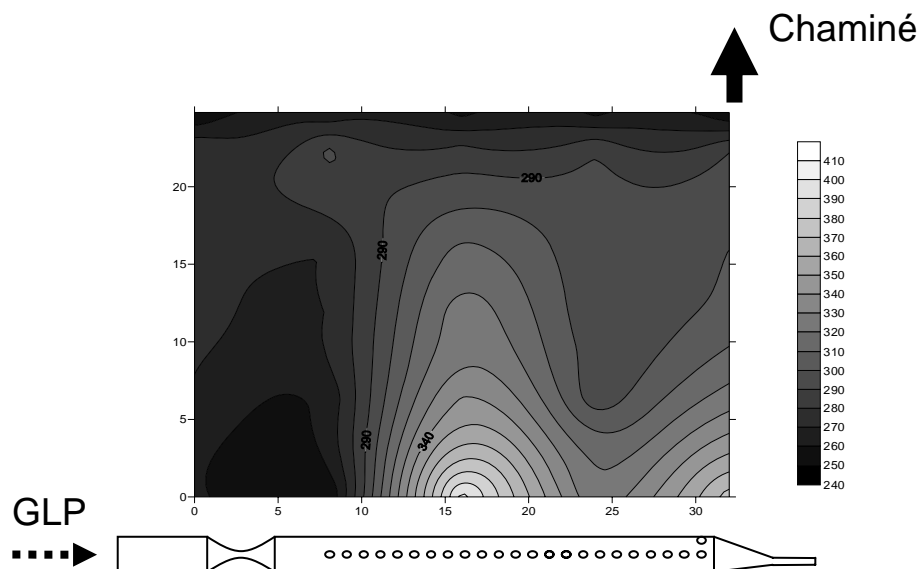


Figura 8: Campo de temperatura em °C ao longo do forno, no plano vertical perpendicular às seções de medição das temperaturas médias.

7. Análise das incertezas experimentais

Os testes foram realizados utilizando uma válvula para medição e controle da vazão de gás que entra no queimador. A válvula utilizada é do fabricante OMEGA, modelo FMA-A2415 com display, e pode operar na faixa de 0 a 40 SLM (Standard Liter per Minute).

A vazão na válvula foi medida durante os testes, através do sistema de aquisição de dados HP34970A e do software HP Bench Link Datalogger Application, em intervalos de 5 segundos. Isto possibilitou conhecer a variação da vazão com relação ao tempo durante os testes. O erro sistemático da válvula não foi considerado, todavia sabe-se que este é constante. Por esta razão, como apenas é essencial impor a mesma vazão em ensaios diferentes, de forma conservadora, assumiu-se uma distribuição retangular para cálculo do erro, considerando apenas o aleatório. Este pôde ser determinado como sendo de $\pm 0,13$ l/min.

Com relação a calibração dos termopares, um calibrador de termopares modelo Omega CL351A, que oferece uma incerteza de ± 1 °C, foi utilizado resultando na calibração do conjunto constituído pelos termopares utilizados (marca Omega tipo K) e a aquisição de dados HP34970A. O resultado foi de ± 5 °C de incerteza de medição da temperatura, as quais variaram de 150 °C até quase 600 °C, representando um erro máximo de 3,4%.

Como as temperaturas médias são obtidas em função de cada medida individual dos termopares, o erro para a média pode ser determinado conforme descrito por Holman (1994), tendo sido encontrado o valor de ± 1 °C para as temperaturas.

8. Conclusão

O experimento em questão possibilita uma investigação do desempenho térmico de um queimador doméstico de pequeno porte, além da verificação de sua performance considerando o equipamento a que se destina, através da determinação da ordem de grandeza das temperaturas que é possível atingir na câmara de combustão. Foram realizados testes variando a altura do queimador com relação ao forno, dobrando a vazão de gás GLP e dobrando o volume da câmara de combustão, no eixo z da Fig. 3.

Pôde-se observar que a potência do queimador, determinada pela vazão de gás GLP, é o fator dominante não só para o nível, mas também para a distribuição da temperatura no interior do forno, na faixa experimental investigada. Ainda, observando-se o efeito causado pela interação entre os fatores, não há evidência significativa de que estas interações exerçam influência significativa nas temperaturas no interior do forno, quando comparadas ao efeito provocado pela variação da vazão.

Mais adiante, serão investigadas as parcelas convectivas e radiativas de transferência de calor a partir do queimador, através do mesmo planejamento fatorial 2^3 , segundo método da capacitância global descrito por Incropera e De Witt (2003). Pequenos cubos de alumínio (15 mm x 15 mm x 15 mm) podem ser utilizados, sendo metade deles

pintados de preto e a outra metade polidos. Devido à baixa absorvidade dos cubos polidos, assume-se que a energia absorvida por eles se dá apenas por convecção. Desta forma, a taxa de transferência de calor radiativa pode ser determinada pela diferença de energia absorvida entre cubos polidos e pretos.

Posteriormente, somando-se estas pesquisas, será possível desenvolver uma câmara de combustão, que proporcione um melhor aproveitamento da energia disponibilizada pela queima, nos evaporadores dos termosifões verticais, que foram adaptados nas câmaras de cocção dos fornos, conforme descrito na introdução.

9. Referências Bibliográficas

- De Carvalho Jr., J. A., "Princípios da Combustão", Departamento de Energia – UNESP/Campus Guaratinguetá, 2004.
- Garcia, R., "Combustíveis e combustão industrial", editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.
- c., "Stability diagram for Lift-Off and Blowout of a round jet laminar diffusion flame", *Combustion and Flame* 123:646-655, 2001.
- Gomide, R., "Estequiometria industrial", 2ª edição, edição do autor, FEI – GRÁFICA, 1924.
- Holman, J. P., "Experimental Methods for Engineers", 6th edition, McGraw-Hill, 1994.
- Incropera, F. P. e De Witt, D. P., "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa", 2003.
- Mantelli, M. B. H. (coordenadora), "Application of thermosyphon technology to domestic ovens - Final Report", LABSOLAR/NCTS, 2004.
- Milanez, F. H. e Mantelli, M. B. H., "A new methodology for measuring heat transfer coefficients – Application to thermosyphon heated enclosures", 13o Congresso de Tubos de Calor (13th IHPC), Shangai, China, 2004.
- Neto, B. B., Scarminio I.S. e Bruns R. E., "Como fazer experimentos", 2ª edição, editora da Unicamp, 2002.
- Tewarson, A., "Heat release rate in diffusion flames", Factorial Mutual Research Corporation, 1995.

EXPERIMENTAL STUDY OF PARAMETERS THAT INFLUENCE THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN COMBUSTION CHAMBERS

Rafael Eduardo da Cruz

Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLAR/NCTS – Campus Universitário Trindade, Florianópolis,
Santa Catarina, Brasil - 88040-900
rafael@labsolar.ufsc.br

Profa. Marcia Barbosa Henriques Mantelli, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLAR/NCTS – Campus Universitário Trindade, Florianópolis,
Santa Catarina, Brasil - 88040-900
marcia@labsolar.ufsc.br

Abstract

Combustion chambers can be found in many types of equipments, from domestic, as cooking ovens, to industrial, as vapor production. Gas combustion takes place inside these chambers, which is LPG (liquefied Petroleum Gas). The current work has the objective of measuring temperatures inside a small combustion chamber and also of its walls, consequently obtaining an internal temperature distribution. In order to do that, parameters such as burner height in the chamber, gas flow and chamber internal volume were tested in an experimental apparatus specially designed for that purpose. The tests were carried out using a 2^3 factorial planning, where the effects of factor's variations can be evaluated, as well as the effects of the interactions related to these factor's variations. Thus, not only temperature distributions can be evaluated, but also some variables that influence these distributions can be better known. It is expected that, from the present work, there will be available data useful to better know the temperatures distributions inside combustion chambers, as well as the influence of some parameters in these distributions, considering some specific operation configurations. Thus, combustion chambers can be better designed.

Keywords: Combustion chamber, temperature distribution, average temperature.