

DESENVOLVIMENTO DE MODELO TÉRMICO PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE CHAMA NA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS E CORREÇÕES PARA A RELAÇÃO ÓTIMA AR/COMBUSTÍVEL ¹

Marcelo Lucas Pereira Machado²
Clara Gonçalves Pugirá³

Resumo

O trabalho apresenta um modelo térmico desenvolvido em linguagem de programação C++ baseado no conceito de balanço térmico com a finalidade de determinar a temperatura de máxima chama, a temperatura de chama em relação ao volume de ar ou de oxigênio e de combustível fornecidos, a relação ótima, volume de ar ou de oxigênio / volume de combustível, fornece os valores a serem corrigidos no volume de ar ou de oxigênio e/ou combustível para a obtenção da máxima temperatura de chama e também fornece a possibilidade de enriquecimento de oxigênio no volume de ar para melhor queima de combustível, aumentando a temperatura de máxima chama. Com o modelo pode-se fazer o uso de gasolina, álcool e gás natural como combustíveis. O modelo mostrou que aumentos na temperatura de pré-aquecimento do ar e do gás natural aumenta a temperatura de chama, que desvios da condição ideal sempre reduzem a temperatura de chama. Observou-se que variações na temperatura de pré-aquecimento do combustível resulta em maiores alterações na temperatura de chama.

Palavras-chave: Temperatura de chama; Balanço térmico; Modelo térmico.

DEVELOPMENT OF THERMAL MODEL TO CALCULATE OF THE FLAME TEMPERATURE IN THE FUEL COMBUSTION AND CORRECTIONS FOR THE IDEAL RATIO AIR/FUEL

Abstract

The work shows a thermal model developed in programming language C++ based on the thermal balance theory with the purpose to determine the maximum flame temperature, the flame temperature in ratio to the air volume, oxygen and fuel supplied, the ideal ratio, air volume or oxygen/fuel volume and also supplies the values to be corrected in the air volume or oxygen and/or fuel the attainment of the maximum flame temperature. The model also has the possibility of air enrichment by oxygen to improve combustion, increasing the maximum flame temperature. With the model can be made the use of gasoline, alcohol and natural gas as combustible. The model showed that increases in the air pre-heating temperature and the natural gas increase of the flame temperature and that disturbances of the ideal condition always reduces the flame temperature. It was observed that variations in the fuel pre-heating temperature results in greater variations in the flame temperature.

Key words: Flame temperature, Thermal balance, Thermal model.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, D.Sc. Coordenador do Curso de Engenharia Metalúrgica do CEFET-ES, Vitória-ES, E-Mail: marcelolucas@cefetes.br.

³ Aluna do curso de Tecnologia em Metalurgia e Materiais do CEFET-ES, bolsista de iniciação científica, Vitória-ES, E-Mail: clarapugira@walla.com.

1 INTRODUÇÃO

O primeiro passo no desenvolvimento do trabalho foi elaborar um balanço térmico escolhendo como temperatura de referência 25°C a partir da qual serão avaliadas todas as entradas e saídas de calor para o cálculo da temperatura de chama. Foi escolhido para este trabalho o gás natural (90% CH₄ e 10% C₂H₆), gasolina (76% C₈H₁₈ e 24% C₂H₆O) e álcool hidratado (96% C₂H₅OH e 4% H₂O) como combustíveis a serem analisados.

Depois de levantados todos os dados termodinâmicos, foi desenvolvido um modelo térmico em programação C++. O modelo utiliza dados termodinâmicos para calcular a temperatura de chama ideal e a temperatura de chama não ideal para diferentes variações de ar ou de oxigênio e combustível e também a relação ótima ar ou oxigênio/combustível, conforme as condições externas de temperatura do ar ou oxigênio e do combustível, permite também a possibilidade de enriquecimento do ar com O₂ e a utilização de 100% O₂ como comburente. O modelo fornece os valores a serem corrigidos no volume de ar e/ou combustível para a obtenção da máxima temperatura de chama, levando em consideração as temperaturas de pré-aquecimento dadas e permite também variações individuais das mesmas.

2 DADOS TERMODINÂMICOS

$$C_p^{CH_4} = 5,65 + 5,72 \times 2 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{C_2H_6} = 15,64 + 2,94 \times 2 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{O_2} = 7,16 + 0,5 \times 2 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{N_2} = 6,83 + 0,45 \times 2 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{CO_2} = 10,57 + 1,05 \times 2 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{H_2O} = 7,3 + 1,23 \times 2 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{C_8H_{18}} = 53,74 + 11,32 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{C_2H_6O} = 19,22 + 3,54 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{C_2H_5OH} = 19,22 + 3,54 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

$$C_p^{H_2O} = 6,52 + 0,78 \times 10^{-3} T \text{ cal/mol}$$

3 FLUXOGRAMA DO MODELO TÉRMICO

O modelo térmico primeiramente necessita como dado de entrada, o volume do combustível e as temperaturas de pré-aquecimento do ar e do combustível, assim o modelo calcula o valor do volume de ar ideal e o valor das demais variáveis necessárias para o cálculo da máxima temperatura de chama.

Caso se forneça também o volume de ar como dado de entrada, o mesmo calcula a temperatura de chama conforme os volumes fornecidos, caso estejam fora da condição ideal.

Com isso, o modelo mostra a correção necessária no volume de ar e/ou combustível para a obtenção da máxima temperatura de chama. O fluxograma do modelo térmico está mostrado na Figura 1. O mesmo serviu de base para o desenvolvimento do modelo para os demais combustíveis e também para a inclusão do oxigênio como comburente, além do ar.

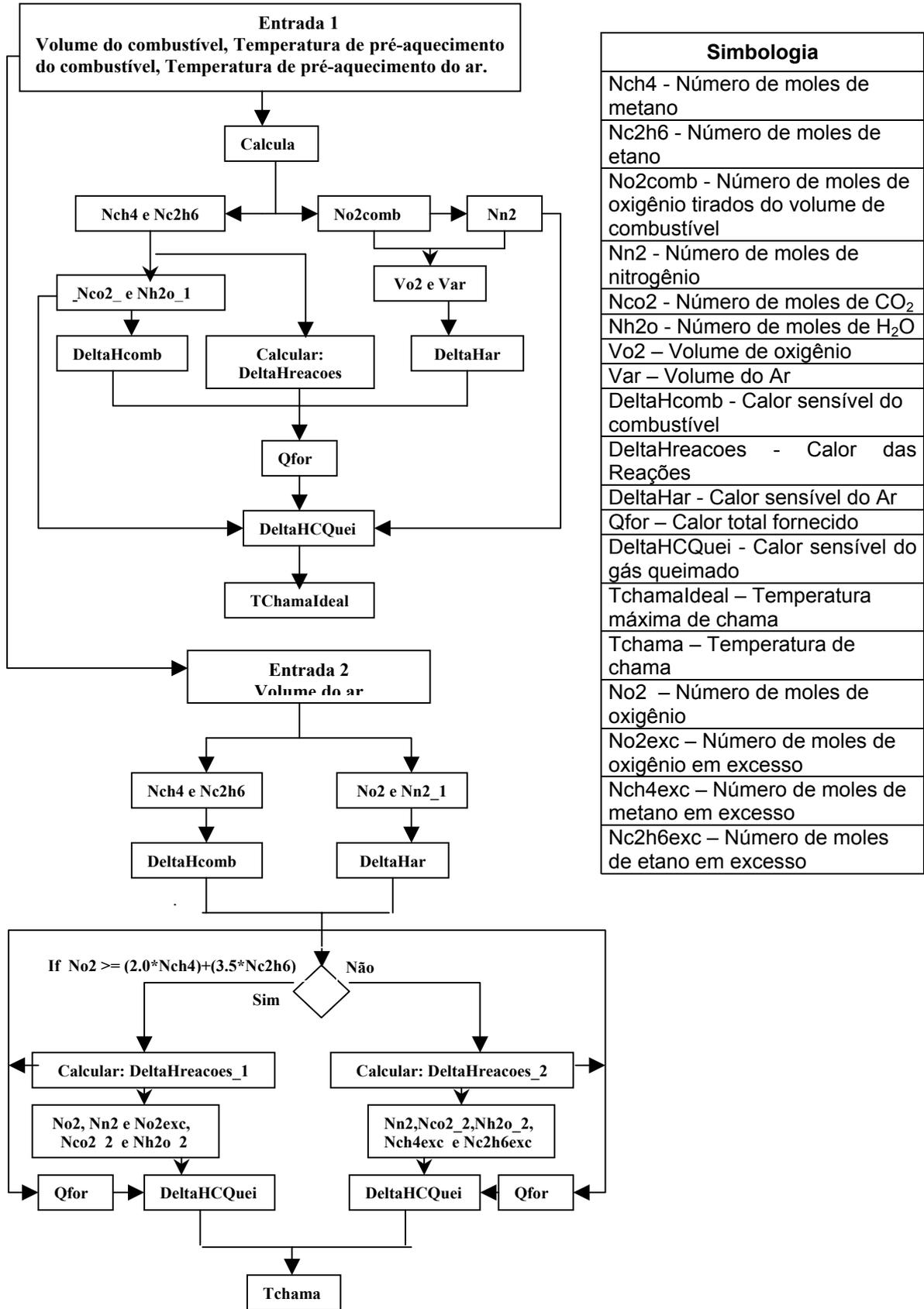


Figura 1. Fluxograma do Modelo Térmico

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o modelo térmico, foi possível fazer simulações por meio de variações individuais ou de ambos nos volumes de ar e combustível e nas temperaturas de pré-aquecimento.

4.1. Efeito da Variação na Temperatura de Chama para Diferentes Temperaturas de Pré-aquecimento

Observe nas Figuras 2 e 3 que o comportamento da temperatura de chama é o mesmo, ou seja: ao usar um volume de ar menor que a idealidade, o combustível (CH₄ e C₂H₆) fica em excesso e observa-se que a temperatura de chama diminui. O mesmo acontece quando o volume de ar é maior, tem-se um excesso de oxigênio, ou seja, falta de combustível, e a temperatura também diminui.

Nota-se que o excesso de oxigênio tem uma influência maior na temperatura de chama que a sua falta, visto que seu excesso provoca uma queda mais acentuada na temperatura de chama.

Observa-se que maiores temperaturas de pré-aquecimento do ar e combustível resulta sempre em maiores temperaturas de chama.

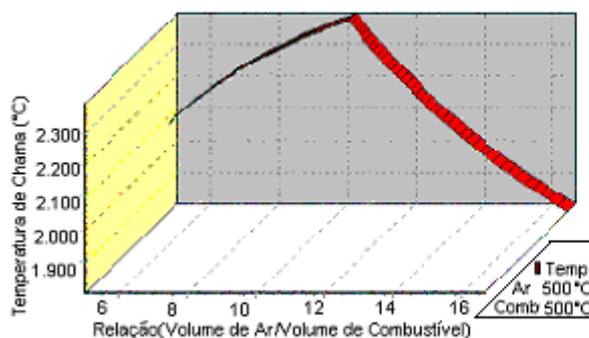


Figura 2. Comportamento da temperatura de chama para temperaturas de pré-aquecimentos do ar e combustível iguais a 500°C.

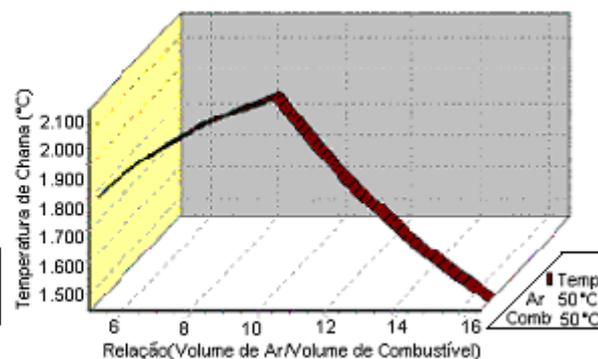


Figura 3. Comportamento da temperatura de chama para temperaturas de pré-aquecimentos do ar e combustível a 50°C.

4.2 Efeito da Variação da Temperatura de Chama para uma Temperatura de Pré-aquecimento Fixa e outra Variando

4.2.1 Gás natural

Como pode ser visto nas Figuras 4 e 5, a temperatura de chama varia, visto que a mesma é influenciada pela temperatura de pré-aquecimento. Portanto, quanto maior a temperatura de pré-aquecimento maiores são as temperaturas de chama. Analisando essas duas figuras observa-se ainda que a temperatura de pré-aquecimento do combustível tem uma maior sensibilidade, pois ocasionou uma maior variação na temperatura de chama e proporciona maiores aumentos da mesma. Esta variação também está mostrada na Tabela 1.

Por outro lado, a variação da temperatura de pré-aquecimento do ar mostrou uma menor influência na temperatura de chama, conforme pode ser visto na Figura 5 e Tabela 2.

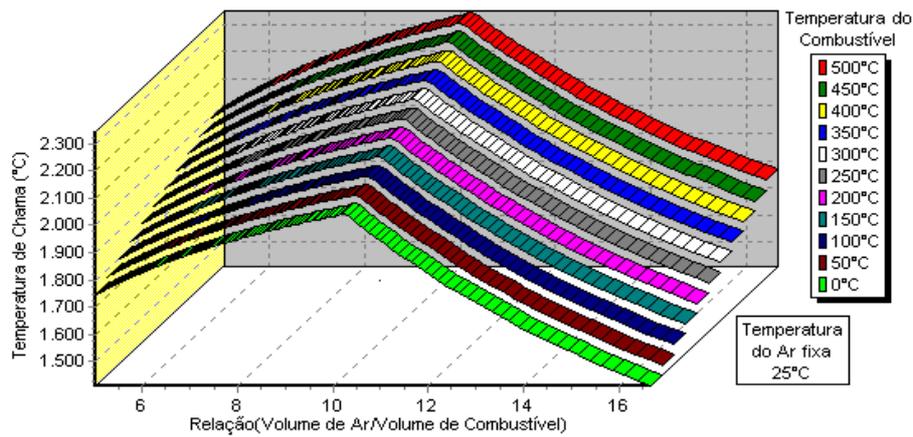


Figura 4. Efeito da variação na temperatura de chama para temperatura de pré-aquecimento do combustível variando e a do ar fixa a 25°C.

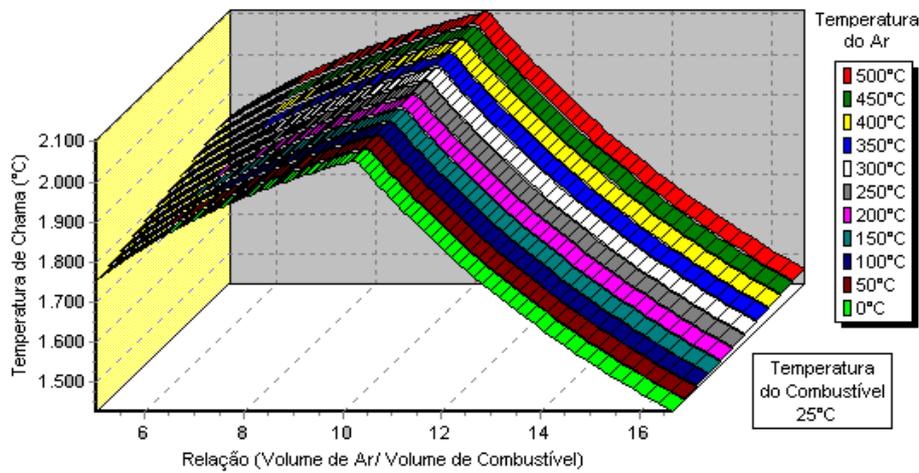


Figura 5. Efeito da variação na temperatura de chama para temperatura de pré-aquecimento do ar variando e a do combustível fixa a 25°C.

Tabela 1. Resultados das Temperaturas de Chama, das Relações (Volume de Ar/Volume de Combustível), variando as temperaturas de pré-aquecimento do Ar e deixando fixas as temp. de pré-aquecimento do Combustível (25°C).

Temp.do Ar (°C)	Temp.do Comb (°C)	Relação (Ar/Comb.)	Temperatura de Chama (°C)
0,0	25,0	6	1367,34
50,0	25,0	7	1562,75
100,0	25,0	8	1753,96
150,0	25,0	9	1941,77
200,0	25,0	10	2126,85
250,0	25,0	10,24	2193,74
300,0	25,0	11	2129,42
350,0	25,0	12	2046,93
400,0	25,0	13	1979,39
450,0	25,0	14	1924,35
500,0	25,0	15	1879,86

Tabela 2. Resultados das Temperaturas de Chama, das Relações (Volume de Ar/Volume de Combustível), variando as temperaturas de pré-aquecimento do Combustível e deixando fixas as temp. de pré-aquecimento do Ar (25°C).

Temp.do Ar (°C)	Temp.do Comb (°C)	Relação (.Ar/Comb.)	Temperatura de Chama (°C)
25,0	0,0	6	1375,35
25,0	50,0	7	1553,43
25,0	100,0	8	1722,52
25,0	150,0	9	1883,73
25,0	200,0	10	2038,07
25,0	250,0	10,24	2077,85
25,0	300,0	11	1982,74
25,0	350,0	12	1866,43
25,0	400,0	13	1763,82
25,0	450,0	14	1672,68
25,0	500,0	15	1591,24

4.2.2 Gasolina

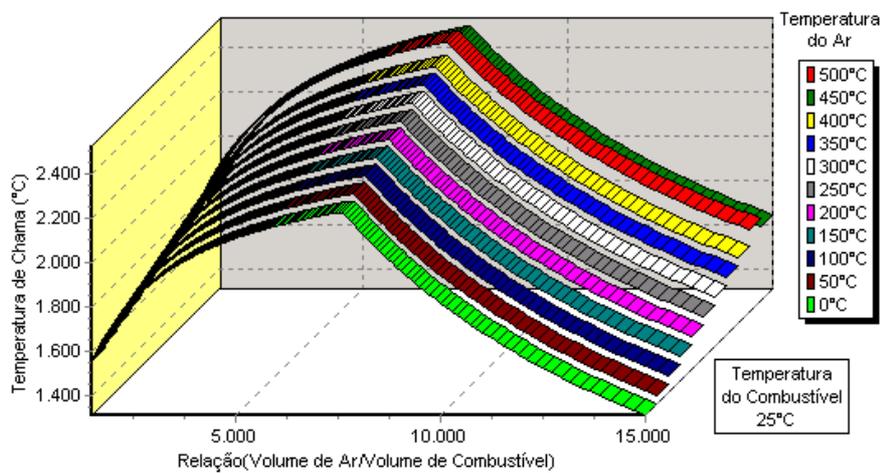


Figura 6. Efeito da variação na temperatura de chama para temperatura de pré-aquecimento do combustível variando e a do ar fixa a 25°C.

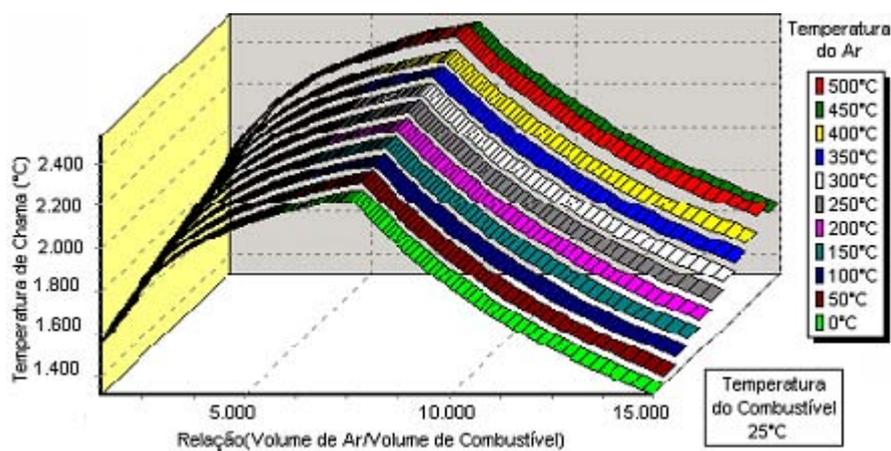


Figura 7. Efeito da variação na temperatura de chama para temperatura de pré-aquecimento do ar variando e a do combustível fixa a 25°C.

Ao observar as Figuras 8 e 9, a temperatura de chama tem-se um pico da máxima temperatura de chama que é obtido quando a relação volume de ar/ volume de combustível é ótima e ao sair dessa idealidade observa-se quedas na temperatura de chama. Analogamente ao gás natural observou-se que a temperatura de pré-aquecimento do combustível tem uma maior sensibilidade, pois ocasionou uma maior variação na temperatura de chama e proporciona maiores aumentos da mesma.

5 EFEITO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE CHAMA PARA VARIAÇÕES IGUAIS NAS TEMPERATURAS DE PRÉ-AQUECIMENTO DO AR E DO COMBUSTÍVEL

Nota-se na Figura 8 que as temperaturas de pré-aquecimento iguais influenciam mais na temperatura de chama, quando comparados com as dadas nas figuras anteriores, devido a maiores entradas de calor com pré-aquecimentos iguais do ar e do combustível.

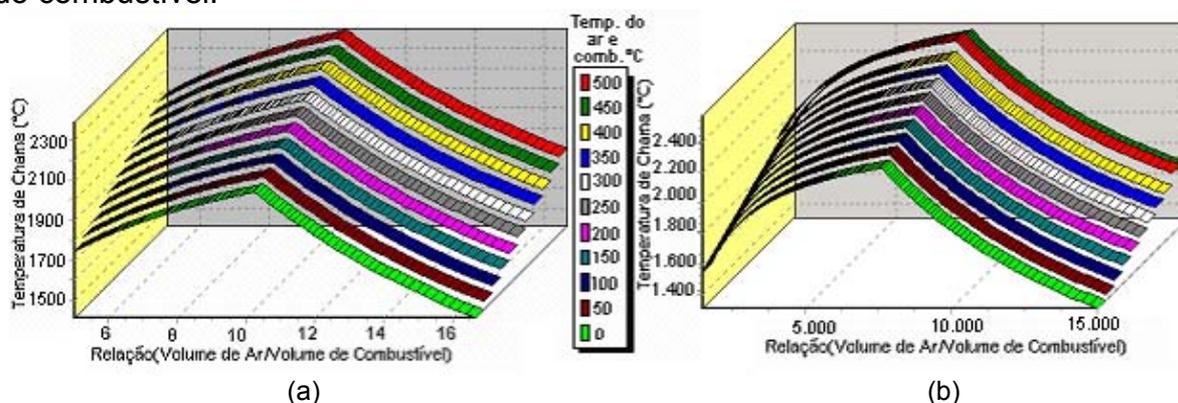


Figura 8. Efeito da variação na temp. de chama para as mesmas variações na temp. de pré-aquecimento do ar e do combustível, a - Gás natural, b - Gasolina.

6 CORREÇÕES NOS VOLUMES DE COMBUSTÍVEL E DO AR PARA OBTENÇÃO DA MÁXIMA TEMPERATURA DE CHAMA

O modelo calcula correções necessárias no volume do ar e/ou combustível, para a obtenção da máxima temperatura de chama e conseqüentemente melhor rendimento térmico e de consumo de combustível. A Tabela 3 mostra alguns resultados destas correções para o gás natural e a Tabela 4 para a gasolina.

Tabela 3. Resultados das correções feitas no volume do ar e do combustível (gás natural) para a obtenção da máxima temperatura de chama, para temperatura de pré-aquecimento do combustível e do ar fixas em 100°C.

Volume Comb (Nm ³)	Volume Ar (Nm ³)	Temp.de Chama (°C)	Temp.de Chama Ideal (°C)	Correção no Volume Combustível (Nm ³)	Correção no Volume Ar (Nm ³)
200,0	1000,0	1755,17	2112,10	- 100,0	+ 1047,62
150,0	1000,0	1936,79	2112,10	- 50,0	+ 535,71
100,0	1000,0	2112,10	2112,10	0,0	0,0
50,0	1000,0	1294,12	2112,10	+ 50,0	- 488,09
25,0	1000,0	748,63	2112,10	+ 75,0	- 744,05

Tabela 4. Resultados das correções feitas no volume do ar e do combustível (gasolina) para a obtenção da máxima temperatura de chama, para temperatura de pré-aquecimento do combustível e do ar fixas em 100°C.

Volume Comb (Nm ³)	Volume Ar (Nm ³)	Temp.de Chama (°C)	Temp.de Chama Ideal (°C)	Correção no Volume Combustível (Nm ³)	Correção no Volume Ar (Nm ³)
200,0	760000,0	2024,55	2245,40	- 100,0	+ 76700,0
150,0	760000,0	2127,20	2245,40	- 50,0	+ 38800,0
100,0	760000,0	2245,40	2245,40	0,0	0,0
50,0	760000,0	1319,13	2245,40	+ 50,0	- 380000,0
25,0	760000,0	728,70	2245,40	+ 75,0	- 570000,0

7 VARIAÇÕES NA TEMPERATURA DE CHAMA COM ENRIQUECIMENTO DE OXIGÊNIO NO VOLUME DE AR.

A elevação da porcentagem de oxigênio no ar de combustão, a partir de 21%, aumenta significativamente a temperatura da chama alcançada com qualquer combustível. A Tabela 5 mostra o enriquecimento do ar com oxigênio na queima do gás natural. Nota-se que a medida em que a porcentagem de oxigênio aumenta, tem-se uma elevação na temperatura de chama.

Tabela 5. Resultados das Temperaturas de Chama, das Relações (Volume de Ar/Volume de Combustível), deixando fixas as temperaturas de pré-aquecimento do Ar e do gás natural em 25°C com enriquecimento do ar em porcentagem.

Temp.do Ar e do comb(°C)	Relação (.Ar/Comb.)	Temperatura de Chama (°C)	Enriquecimento do ar (%)	Temp de Chama enriquecida (°C)
25,0	10	2047,96	0	2047,96
25,0	9	2008,80	5	2174,03
25,0	8	1962,65	10	2278,57
25,0	7	1907,46	15	2413,83
25,0	6	1842,11	20	2589,22

8 VARIAÇÕES DA TEMPERATURA DE CHAMA USANDO VOLUME DE AR E DE OXIGÊNIO

Como podemos ver na tabela 6 a temperatura máxima de chama usando volume de ar ideal quando comparada com a temperatura máxima de chama usando volume de oxigênio ideal é bem menor, visto que ao usar ar, o nitrogênio participa do processo retirando calor do sistema, fazendo a temperatura de chama diminuir.

Tabela 6. Variações na temperatura de chama ideal usando volume de ar ideal e volume de oxigênio ideal para o mesmo volume de gás natural e temperaturas de pré-aquecimento do ar e combustível.

Temp.do ar e comb. (°C)	Volume comb (Nm ³)	Volume de ar ideal (Nm ³)	Temp.de Chama Ideal (°C)	Volume de oxigênio ideal (Nm ³)	Temp.de Chama Ideal (°C)
0,0	100,0	1000,0	2042,17	210,0	4516,38
50,0	200,0	2047,62	20077,07	430,0	4524,25
100,0	300,0	3071,43	2112,11	645,0	4532,56
150,0	400,0	4095,24	2147,28	860,0	4541,30
200,0	500,0	5119,05	2182,59	1075,0	4550,43

9 CONCLUSÕES

O modelo confirmou que para uma relação ótima de volume de ar/combustível tem-se uma máxima temperatura de chama e volumes em excesso ou falta tanto de ar como de combustível, proporciona uma redução na temperatura de chama, e o excesso de ar, ocasiona maiores variações na temperatura de chama, do que o excesso de combustível;

A variação na temperatura de pré-aquecimento do combustível proporciona maiores temperaturas de chama para a mesma variação na temperatura de pré-aquecimento do ar;

Aumentos nas temperaturas de pré-aquecimento do ar e do combustível aumentam significativamente a temperatura de chama e a variação na temperatura de pré-aquecimento do combustível proporciona maiores temperaturas de chama para a mesma variação na temperatura de pré-aquecimento do ar;

O modelo térmico calcula as correções necessárias nos volumes de ar e/ou combustíveis para obter a máxima temperatura de chama, com isto, será possível um controle automático visando melhor rendimento térmico e de consumo do combustível e/ou oxigênio;

No enriquecimento do ar com oxigênio o modelo confirmou que ocorre aumentos expressivos na temperatura de chama;

A utilização de 100% de oxigênio como comburente mostrou que nas reações de combustão, o mesmo proporciona temperaturas de chama bem superiores quando se utiliza o ar atmosférico como comburente;

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo CEFET-ES por proporcionar uma bolsa de iniciação científica para C.G.P. no desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ADAMIAM, R. **Físico-Química: Uma aplicação aos materiais**, COPPE/UFRJ, São Paulo 2002;
- 2 MACHADO, M.L.P. **Fundamentos da termodinâmica e Físico-Química aplicados a metalurgia**, CEFET-ES, Vitória, 2004;
- 3 HERSKOVIC, J. **Elaboração do aço: Fusão e Refino**, ABM, São Paulo, 1983;
- 4 ASSIS, P.S., SAMPAIO, R.S. **Novos processos de produção de ferro primário**, ABM, São Paulo, 1995.
- 5 ARAKAKI, R. et. al. **Fundamentos de Programação C**, LTC, 2ªed., 1990;
- 6 CARVALHO, J.L.R. **Dados Termodinâmicos para Metalurgistas**, UFMG, Belo Horizonte, MG, 1977.