

MON
536.24
C331d
tes/mem

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO E
COMPUTACIONAL DE UM FORNO DE RECOZIMENTO**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

SOLIDÔNIO RODRIGUES DE CARVALHO

como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica

tendo como banca examinadora:

Prof. Dr. Gilmar Guimarães – (FEMEC-UFU) – Orientador

Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva – (FEMEC-UFU)

Prof. Dr. Carlos Roberto Ribeiro – (FEMEC-UFU)

Dr. Paulo S. S. Bálamo – (ACESITA)

SISBI/UFU



1000215485

BIBLIOTECA 2003 270

Uberlândia, 28 de novembro de 2003



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila, 2121 - 38400-902 Fone: 0XX(34)32394149 Ramal 42
FAX: 0XX(34)32394282 - Campus Santa Mônica - Uberlândia MG

ALUNO: Solidônio Rodrigues de Carvalho

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5021563-6

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“ DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL DE UM FORNO DE RECOZIMENTO ”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco E, Campos Santa Mônica, em 28 de novembro de 2003, às 09:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Gilmar Guimarães, Prof. Dr.	UFU	
Carlos Roberto Ribeiro, Prof. Dr.	UFU	
Sandros M. M. Lima e Silva, Prof Dr.	UFU	
Paulo Sérgio Sairre Bálamo, Dr	ACESITA	

Uberlândia, 28 de novembro de 2003

Dedico este trabalho aos meus pais
Hélio e Maracy, ao meu irmão
Marcelo e à minha esposa Luciana.

Agradecimentos

Ao Prof. Gilmar Guimarães pela orientação, paciência, amizade e confiança depositada na condução deste trabalho.

Aos amigos Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva e Eng. Msc. Valério Luiz Borges pelo convívio e apoio técnico.

Ao Renato Drumond Guerra pelo apoio técnico durante as visitas à ACESITA.

À ACESITA pelo apoio financeiro.

Ao CNPq através do projeto 130554/02 – 2.

“A ciência é o refino do conhecimento diário.”

Albert Einstein - Físico (1879-1975)

Sumário

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
Resumo.....	xix
Abstract.....	xx
Capítulo I – Introdução.....	1
Capítulo II – Fundamentos Teóricos.....	5
2.1 – Introdução.....	5
2.2 – O Processo de Recozimento.....	7
2.3 – O Balanço de Energia e a Combustão dos Gases.....	8
2.3.1 – Percentual Volumétrico dos Elementos que Compõem os Gases de Combustão.....	12
2.3.2 - O Cálculo Estequiométrico.....	13
2.3.3 – Entalpia Aplicada ao Processo de Combustão.....	20
2.4 - Cálculo da Temperatura das Fumaças.....	25
2.5 - Cálculo da Temperatura Adiabática de Chama.....	29
2.6 - Cálculo da Vazão Mássica das Fumaças.....	30
2.7 - Cálculo da Vazão Volumétrica das Fumaças.....	30
2.8 - O Problema Direto: Formulação Numérica para a Distribuição de Temperatura na Tira de Aço.....	31
2.9 - Problema Inverso: Determinação do Fluxo de Calor Útil (Qu) Usando a Técnica de Otimização Seção Áurea (Golden Section).....	32

Capítulo III – SIMCO - RB2 – Software para Simulação e Controle do Forno RB2.....	35
3.1 – Introdução.....	35
3.2 – O Algoritmo para a Simulação do Processo de Combustão.....	37
3.3 – O Algoritmo para a Determinação do Rendimento do Forno – Problema Inverso.....	39
3.4 – O Algoritmo para a Simulação do Processo de Recozimento – Problema Direto.....	40
3.5 – Funcionamento do Programa.....	41
3.5.1 - <i>Configuração Mínima</i>	41
3.5.2 - <i>Como usar o Software</i>	42
Capítulo IV – Resultados Experimentais.....	49
4.1 – Introdução.....	49
4.2 - Testes Experimentais.....	49
4.2.1 – <i>Teste Experimental Nº 1</i>	49
4.2.2 – <i>Teste Experimental Nº 2</i>	57
4.2.3 - <i>Teste Experimental Nº 3</i>	61
Capítulo V – Análise de Erros: Uma Discussão.....	61
5.1 – Introdução.....	61
5.2 – Incerteza no Modelo Matemático.....	61
5.3 - Incerteza na Medição dos Parâmetros Fornecidos pelo Forno.....	61
Capítulo VI – Conclusão.....	61
Referências Bibliográficas.....	61
Anexo I: Seção Áurea (Golden Section).....	61

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema do alto-forno RB2.....	5
Figura 2.2 – Recozimento da tira de aço - processo de aquecimento.....	6
Figura 2.3 - Balanço de energia em um forno de recozimento (zona 1 e pré-aquecimento).....	8
Figura 2.4 – Balanço térmico de uma zona típica do forno RB2.....	9
Figura 2.5 – Volume de controle aplicado no interior do forno RB2 em uma zona típica.....	10
Figura 2.6 - Balanço térmico do forno RB2 incluindo todas as zonas de aquecimento.....	10
Figura 2.7 – Volume de controle aplicado ao recuperador de calor.....	11
Figura 2.8 – Modelo de combustão usado para simulação da temperatura das fumaças.....	26
Figura 2.9 – Algoritmo de Newton-Raphson.....	28
Figura 2.10 – Modelo de combustão usado para a simulação da temperatura adiabática de chama.....	29
Figura 2.11 – Modelo usado para o problema térmico aplicado à tira de aço.....	31
Figura 2.12 – Gráfico apresentando o menor valor da função objetivo.....	34
Figura 3.1 – Fluxograma para combustão.....	37
Figura 3.2 – Fluxograma apresentando o algoritmo do processo de combustão.....	38
Figura 3.3 – Fluxograma apresentando o algoritmo de otimização do processo de recozimento.....	40
Figura 3.4 – Fluxograma apresentando o algoritmo de cálculo da temperatura na tira.....	41
Figura 3.5 – Janela de informações gerais sobre o programa SIMCO – RB2.....	42
Figura 3.6 – Janela de “Calibração do Programa”.....	43
Figura 3.7 – Janela “Estação de Mistura”.....	44
Figura 3.8 – Janela “Poder Calorífico Inferior”.....	45
Figura 3.9 – Janela “Combustão”.....	46
Figura 4.1 – Estação de mistura (Teste N° 1).....	50
Figura 4.2 – Poder calorífico inferior (Teste N° 1).....	51
Figura 4.3 – Calibração do programa (Teste N° 1).....	52
Figura 4.4 – Rendimento de cada processo (Teste N° 1).....	53
Figura 4.5 – Distribuição da temperatura na tira de aço (Teste N° 1).....	54

Figura 4.6 – Distribuição do calor no interior do forno (Teste N° 1).....	55
Figura 4.7 – Temperatura em posições específicas da tira em função do tempo de aquecimento (Teste N° 1).....	55
Figura 4.8 – Resultados do processo de combustão (Teste N° 1).....	56
Figura 4.9 – Estação de mistura (Teste N° 2).....	57
Figura 4.10 – Poder calorífico inferior (Teste N° 2).....	58
Figura 4.11 – Rendimento de cada processo (Teste N° 2).....	59
Figura 4.12 – Distribuição da temperatura na tira de aço (Teste N° 2).....	60
Figura 4.13 – Distribuição do calor no interior do forno (Teste N° 2).....	60
Figura 4.14 – Resultados do processo de combustão (Teste N° 2).....	61
Figura 4.15 – Terceiro teste - estação de mistura.....	62
Figura 4.16 – Poder calorífico inferior (Teste N° 3).....	63
Figura 4.17 – Rendimento de cada processo (Teste N° 3).....	63
Figura 4.18 – Distribuição da temperatura na tira de aço (Teste N° 3).....	64
Figura 4.19 – Resultados do processo de combustão (Teste N° 3).....	64
Figura 4.20 – Análise do rendimento dos processos.....	65
Figura 5.1 – Modelo tridimensional aplicado à tira de aço.....	68
Figura 5.2 – Fluxo de calor útil aplicado à tira em cada zona do forno.....	69
Figura 5.3 – Distribuição da temperatura na tira.....	70
Figura 5.4 – Distribuição da temperatura na tira em 3 etapas: 20, 60 e 100 segundos.....	70
Figura 5.5 – Evolução da temperatura ao longo da espessura e largura da tira.....	71
Figura 5.6 – Variação da difusividade e condutividade térmica do aço silício.....	72

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Percentual volumétrico dos elementos.....	13
Tabela 2.2 - Peso molecular dos elementos, [Kg].....	14
Tabela 2.3 – Vazão volumétrica dos elementos que compõem o GM.....	16
Tabela 2.4 – Combustão estequiométrica dos elementos.....	17
Tabela 2.5 – Cálculo da combustão estequiométrica dos elementos.....	17
Tabela 2.6 – Cálculo estequiométrico total para o GM.....	18
Tabela 2.7 – Cálculo da combustão simulando o excesso de ar.....	19
Tabela 2.8 – Cálculo da combustão do GM com excesso de ar.....	20
Tabela 2.9 – Calor específico dos elementos em função da temperatura (Himmelblau, 1982).....	21
Tabela 2.10 – Entalpia padrão de formação do elementos (Himmelblau, 1982).....	22
Tabela 4.1 – Parâmetro que considera o excesso ou escassez de ar (Teste N° 1).....	50
Tabela 4.2 – Excesso ou escassez de ar (Teste N° 2).....	58
Tabela 4.3 – Excesso ou escassez de ar (Teste N° 3).....	62
Tabela 5.1 – Dados de entrada para a simulação numérica.....	69
Tabela 5.2 - Propriedades Térmicas do Aço Silício 2%.....	72

Lista de Símbolos

Letras Latinas

		Unidades
$C_p(T^*)$	Calor específico da mistura de vários elementos	$J/gmol^{\circ}C$
e	Espessura da tira de aço	m
GAF	Gás de alto-forno	
GLP	Gás liqüefeito de Petróleo	
GM	Gás misto	
$h_{1..6}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção no modelo 3D	$W/m^2 K$
h_{forno}	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre a tira da aço e a atmosfera controlada do forno	$W/m^2 K$
$k(T)$	Condutividade térmica em função da temperatura da tira	$W/m K$
L	Comprimento da tira de aço	m
m	Parâmetro que leva em consideração o excesso ou escassez de ar	
$\dot{m}_{Elemento}$	Vazão mássica do elemento	kg/s
\dot{m}_T	Vazão mássica total das fumaças	kg/s
N_C	Rendimento do processo de combustão	%
N_F	Rendimento do forno	%
N_{moles}	Número de moles	
n_p	Número de sensores de temperatura - pirômetros	
N_R	Rendimento do recuperador de calor	%
P_e	Pressão absoluta do elemento	kPa
PM	Peso molecular do elemento	kg
Q_{ar}	Quantidade de calor fornecido pelo ar de entrada no recuperador	W
Q_{Ar}	Quantidade de calor recuperado pelo ar de combustão	W
Q_f	Quantidade de calor perdido pelas paredes e aberturas do forno	W
Q_{Fu}	Quantidade de calor contido nas fumaças que saem do forno	W

Q_{fu}	Quantidade de calor contido nas fumaças após o recuperador	W
Q_g	Quantidade de calor fornecido pelo combustível	W
Q_o	Quantidade de calor gerado pela combustão	W
Q_r	Quantidade de calor perdido pelas paredes do recuperador e dos condutos até o recuperador	W
Q_u	Quantidade de calor utilizado para aquecer a carga – calor útil	W
q_T	Calor total fornecido ao processo de combustão	W
T_0	Temperatura inicial da tira	°C
T	Temperatura calculada pelo modelo térmico	°C
t	Variável temporal	s
T^*	Temperatura na qual o elemento se encontra	°C
T_{ar}	Temperatura do ar antes do recuperador	°C
T_{Ar}	Temperatura do ar após o recuperador	°C
T_{chama}	Temperatura adiabática de chama	°C
T_e	Temperatura do elemento	K
T_{Fu}	Temperatura das fumaças antes do recuperador	°C
T_{fu}	Temperatura das fumaças após o recuperador	°C
T_g	Temperatura dos combustíveis	°C
T_∞	Temperatura ambiente	°C
V	Velocidade da tira de aço	m/s
\dot{V}_{ar}	Vazão de ar estequiométrica	m ³ /s
$\dot{V}_{Elemento}$	Vazão volumétrica de cada elemento	m ³ /s
\dot{V}_{GM}	Vazão volumétrica do gás misto	m ³ /s
\dot{V}_T	Vazão volumétrica total das fumaças	m ³ /s
x	Direção axial	
x	Variável espacial na direção x	m
y	Direção axial	
y	Variável espacial na direção y	m
Y	Temperatura experimental	°C
z	Direção axial	
z	Variável espacial na direção z	m

Letras Gregas

Unidades

$\alpha(T)$	Difusividade térmica em função da temperatura da tira	m^2/s
ε	Posição do fluxo de calor em função da velocidade da tira e do tempo de simulação	m
ΔH_f^o	Entalpia padrão de formação dos compostos	$kJ/gmol$
$\Delta H_{produtos}$	Varição da entalpia dos produtos da combustão	W
$\Delta H_{reagentes}$	Varição da entalpia dos reagentes da combustão	W
$\Delta H^o_{reação}$	Varição da entalpia de reação nas condições padrões	W
ρ	Densidade do elemento	kg/m^3

CARVALHO, S. R., 2003, "Desenvolvimento de um modelo matemático e computacional de um forno de recozimento", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um modelo matemático e computacional capaz de simular e controlar o processo de recozimento de tiras de aço silício no interior de um forno tipo túnel. A metodologia proposta simula o processo de combustão no alto-forno e o aquecimento da tira de aço que se move em seu interior. O algoritmo computacional de simulação e controle do forno RB2 (SIMCO – RB2) permite ao usuário a reprodução do processo de combustão, prevendo a composição, vazão e massa das fumaças a partir de parâmetros medidos no forno como vazão, pressão, temperatura e composição dos gases combustíveis. O programa também calcula a temperatura adiabática de chama e a temperatura de "set-point" no interior de cada zona do forno. Por fim, o usuário tem acesso à distribuição de temperatura na tira de aço em qualquer instante ou posição no interior do forno. Para se garantir a precisão do simulador, um procedimento de calibração do software, determinando o rendimento do recuperador de calor, do forno e do processo de combustão a partir de parâmetros medidos no forno é necessário. Esse processo de calibração, bem como a eficiência da metodologia proposta são apresentados através da análise de três testes experimentais nos quais modificam-se as condições no interior do forno. O software SIMCO – RB2 apresenta-se como uma ferramenta eficiente e poderosa para a simulação do processo de recozimento de chapas metálicas.

CARVALHO, S. R., 2003, "Development of a mathematical and computational model of furnaces for continuous steel strip processing", M. Sc Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Abstract

This study presents the development of a mathematical and computational model for simulating and controlling of an annealing process of silicon steel strip that occurs in a combustion industrial furnace. Both the combustion process and the strip heating are simulated by using energy and mass balances inside the industrial furnace. These balances are performed considering important variables such as composition, temperature and pressure of gas components, adiabatic flame and environmental temperature. Besides the balances, an optimization technique is implemented in order to estimate the temperature distribution of the strip at any time. The optimization technique used is the golden section algorithm that minimizes a least square error function based on difference of the experimental and theoretical temperature in two different locations of the strip. All steps of the software development are presented here: the combustion and annealing process, the energy and mass balance and the fundamentals of the optimization process. The efficiency of the software is then demonstrated through an analysis and application of data acquired from operational conditions in continuous annealing lines of a steel Company. This study is concluded showing a discussion about uncertainty and error sources that can be present in the results. The software SIMCO seems to be a very powerful tool in the simulation of metal annealing processes.

Keywords: Industrial Oven. Optimization. Annealing. Combustion. Temperature.

CAPÍTULO I

Introdução

Na segunda metade do século XVIII houve um grande desenvolvimento industrial na Inglaterra, o que causou um impacto em todas as esferas da atividade humana. Foi neste período que ocorreu a Revolução Industrial; o que proporcionou a substituição das ferramentas pelas máquinas, da energia humana pela energia motriz e do modo de produção doméstico pelo sistema fabril (revoindus, 2003).

Para os historiadores, a Revolução Industrial começa em 1733 com a invenção de novos equipamentos para os teares, o que contribuiu para o aumento da capacidade de produção dos artesãos. Já a partir de 1767 começaram a surgir as máquinas hidráulicas e mecânicas e dezoito anos depois James Watt, aperfeiçoando a máquina a vapor, chegou à máquina de movimento duplo, com biela e manivela, que transformava o movimento linear do pistão em movimento circular. Com isso tornou-se necessário aumentar a resistência das máquinas, a madeira das peças foi então substituída por metal e isto estimulou o avanço da siderurgia. No início, o ferro era o elemento base utilizada nas siderúrgicas, mas em 1850 a indústria passou a produzir aço, o que proporcionou o desenvolvimento de novas máquinas e equipamentos (culturabrasil, 2003).

Mas o desenvolvimento da indústria não parou por aí. Com o avanço da ciência e engenharia, a eletricidade e os derivados do petróleo suplantaram o vapor, o que possibilitou o desenvolvimento de máquinas automáticas e a produção em larga escala. Entretanto, o uso de equipamentos elétricos aumentou o custo de produção; tornou-se então necessário aumentar a eficiência e economia de energia elétrica nos equipamentos metálicos. Nesse sentido, com o auxílio da tecnologia, a indústria passou a investir em tratamentos térmicos para os aços utilizados em núcleos de transformadores, reatores de potência, hidrogeradores e turbo geradores.

No Brasil, três siderúrgicas passaram a operar no segmento: Acesita, Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e Usiminas. Estas usinas atualmente desenvolvem aços elétricos com teores cada vez menores de carbono, o que aumenta a propriedade magnética do material e reduz o tempo de processamento do produto final, com a conseqüente redução de custos e aumento substancial do desempenho dos equipamentos.

Para se ter uma idéia da complexidade tecnológica necessária a produção dos aços elétricos, é suficiente dizer que a produção mundial deste material é estimada em 11 milhões

de t/ano, enquanto que todo o aço produzido no mundo ultrapassa 800 milhões de t/ano (revistametalurgia, 2003). O papel estratégico que o aço elétrico ocupa no interior dos equipamentos explica a tamanha exigência de qualidade e performance. Eles são normalmente empregados para a confecção de rotores e estatores, componentes que integram o núcleo dos motores e compressores elétricos ou usados sob a forma de lâminas de aço nos transformadores. Ou seja, os aços elétricos zelam pela inviolabilidade, estabilidade energética e, indiretamente, pelo próprio desempenho eletromecânico dos equipamentos. Portanto, quanto melhor o aço, melhor será o motor, pois mesmo um pequeno ganho de rendimento – por exemplo de 84% para 85% – faz enorme diferença na área metal-mecânica (revistametalurgia, 2003).

O Brasil atualmente fabrica todos os tipos tradicionais de aço elétrico, que formam duas famílias: a do aço de grão não orientado (GNO) - usado em equipamentos com exigências menores - e a do aço de grão orientado (GO) - um tipo mais refinado e produzido para motores de alta performance. Segundo a revistametalurgia (2003) a Acesita é a única usina que opera com as duas famílias de aço, produzindo pouco mais de 140 mil t/ano. A CSN e a Usiminas atualmente produzem em maior quantidade o aço elétrico – o correspondente a 200 mil t/ano -, mas trabalham apenas com algumas modalidades de GNO. O desenvolvimento inesperado dos aços elétricos brasileiros deve-se não apenas às siderúrgicas, mas também aos centros de pesquisa e à própria demanda das indústrias, que lutam para reduzir a defasagem tecnológica com os concorrentes do Primeiro Mundo. Recentemente, percebe-se uma maior preocupação no desenvolvimento de novos fornos com o objetivo de se melhorar o processo de produção e assim obter aços com a melhor orientação cristalina possível.

Observa-se que a qualidade e a produtividade do aço dependem fortemente das condições em que este é processado no interior dos fornos. O controle das condições de operação como a velocidade da tira, o processo de combustão ou as características construtivas e geométricas do forno, são fatores cruciais para a obtenção do produto final desejado. Neste trabalho tem-se como objetivo específico o desenvolvimento de um modelo que controle e simule a passagem de um aço em um forno de recozimento. Devido às características fortemente específicas e ao grande interesse tecnológico envolvido nesses processos, poucas informações sobre o tema estão disponíveis na literatura. Dentre os poucos trabalhos existentes, destaca-se o de Fedorov (1998).

Fedorov (1998) apresenta uma metodologia para a simulação do aquecimento de chapas no interior de fornos industriais usando uma formulação em diferenças finitas de um modelo térmico "quasi-tridimensional" transiente. Observa-se que a metodologia proposta por Fedorov (1998) envolve o uso de equações empíricas para a simulação do processo de radiação e convecção. De fato, esse procedimento implica no conhecimento da emissividade

da chapa metálica, do comprimento de onda característico do processo de radiação e do coeficiente de transferência de calor por convecção. Entretanto, em se tratando de um ambiente industrial, estas variáveis são de difícil acesso.

Neste trabalho propõe-se uma nova metodologia para a simulação do processo de recozimento do aço silício no interior de fornos tipo túnel, prevendo a composição, vazão e massa das fumaças a partir de parâmetros medidos no forno como vazão, pressão, temperatura e composição dos combustíveis. Para tanto, desenvolveu-se o software "SIMCO – RB2", simulação e controle do forno RB2, que determina ainda a distribuição de temperatura na tira de aço silício.

Uma vez que o principal objetivo desse trabalho é o controle e a modelagem física do forno RB2, torna-se necessário uma descrição detalhada de todo o processo de recozimento. Assim, apresenta-se no Capítulo II o forno RB2 e suas zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque, bem como o processo de recozimento da tira de aço silício, a partir da combustão dos gases. Na seqüência, a partir do balanço térmico aplicado no Forno RB2, no recuperador e no processo de combustão, apresentam-se as equações que envolvem o processo de combustão dos gases. Por meio dessas equações, são identificados três parâmetros de ajuste do software "SIMCO – RB2": o rendimento do forno RB2; o rendimento do recuperador de calor; e o rendimento do processo de combustão. Como a proposta procura considerar o problema térmico da forma mais realista possível, o software desenvolvido simula os gases de combustão em qualquer composição e o excesso ou a escassez de ar. Conclui-se o Capítulo II apresentando o problema direto por meio da formulação numérica da distribuição de temperatura na tira de aço silício e o problema inverso que usa a técnica de otimização Seção Áurea (Golden Section), descrita em detalhes no Anexo I, para a determinação do fluxo de calor útil ao aquecimento da tira.

No Capítulo III apresenta-se o algoritmo computacional para a simulação do processo de combustão, o algoritmo para a simulação do aquecimento da tira de aço, assim como o procedimento de uso do software SIMCO - RB2. Considera-se que, a partir dos fundamentos teóricos apresentados no Capítulo II e da compreensão dos princípios demonstrados no Capítulo III, o usuário do programa esteja apto a inserir os parâmetros medidos no forno e a analisar os resultados apresentados pelo programa.

Três testes experimentais em condições normais de operação são apresentados no Capítulo IV. Nestes testes são determinados os rendimentos de cada processo, propondo-se uma comparação entre os dados experimentais medidos no forno e os resultados estimados pelo programa SIMCO – RB2. Um dos objetivos deste capítulo é a verificação do comportamento constante dos rendimentos do recuperador de calor, do forno e do processo de combustão.

Apresenta-se no Capítulo V uma análise qualitativa das principais fontes embutidas no cálculo do processo de combustão e na determinação da temperatura. Ressalta-se que estas fontes de erro devem ser conhecidas e minimizadas para garantir a precisão dos resultados calculados pelo programa. Observa-se que as fontes de erro estão relacionadas à incerteza no modelo matemático (tipo de modelo adotado, incerteza quanto às propriedades térmicas e incerteza no cálculo estequiométrico, incerteza na medição dos parâmetros fornecidos pelo forno).

Conclui-se esse trabalho no Capítulo VI onde algumas sugestões são propostas para sua continuidade e otimização.

CAPÍTULO II

Fundamentos Teóricos

2.1 - Introdução

Este trabalho visa simular em condições reais o processo de recozimento de tiras de aço silício no interior de um forno tipo túnel denominado RB2.

Inicialmente, apresenta-se uma breve descrição do forno RB2. Construído a partir de materiais refratários, o forno é composto por uma zona de pré-aquecimento, três zonas de aquecimento e três zonas de encharque. Cada zona possui uma determinada quantidade de queimadores que, a partir da combustão de gases, geram o calor no interior do forno. A tira de aço silício é inserida na zona de pré-aquecimento e por meio de uma esteira é conduzida às demais zonas. A partir de dois pirômetros (sensores de temperatura) posicionados no interior do forno, tem-se acesso à temperatura da tira em duas posições distintas. Um esquema do forno é mostrado na Fig. (2.1).

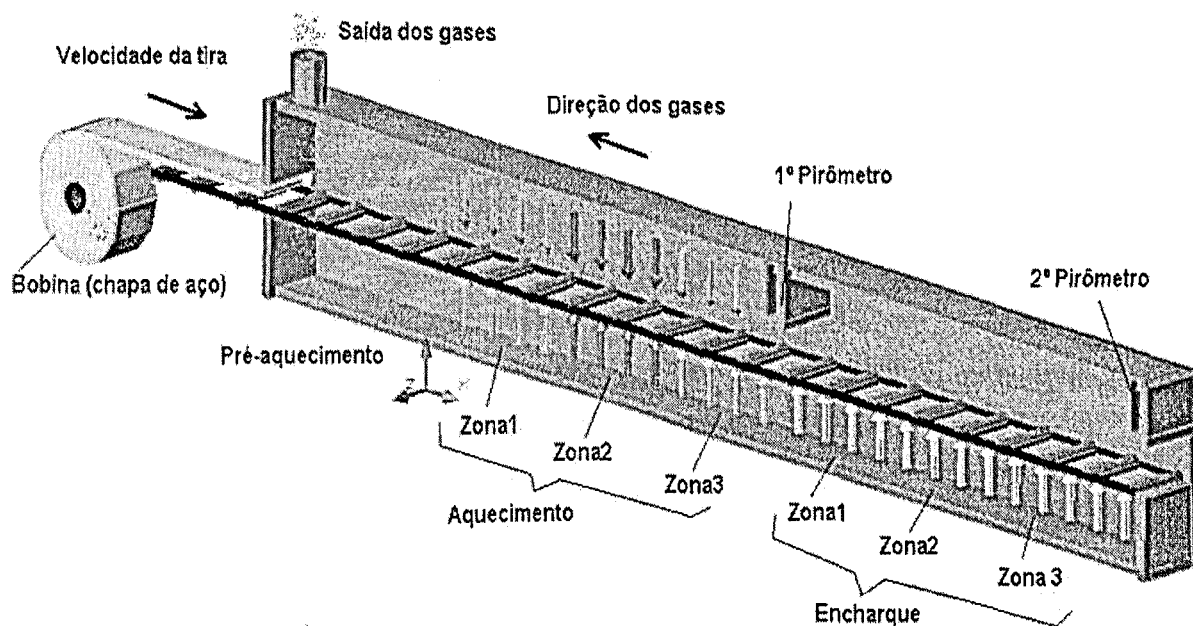


Figura 2.1 – Esquema do alto-forno RB2

A simulação deste forno se dá a partir do desenvolvimento do software "SIMCO - RB2". Este programa reproduz o processo de recozimento da tira de aço silício devido a combustão em todas as zonas do forno e pelo processo de transferência de calor do forno para a tira de aço.

Para um perfeito domínio deste processo, deve-se entender inicialmente o processo de recozimento. Considerado como uma técnica de tratamento térmico, o recozimento é feito aquecendo-se o aço e, em seguida, resfriando-o lentamente. Este é considerado um dos métodos mais comuns de se modificar a microestrutura de um material metálico. Por meio deste tratamento térmico, pode-se controlar o crescimento do grão ou aliviar tensões, entre outras alterações (Van Vlack, 1970).

A Figura 2.2, apresenta o processo de recozimento da tira de aço silício.

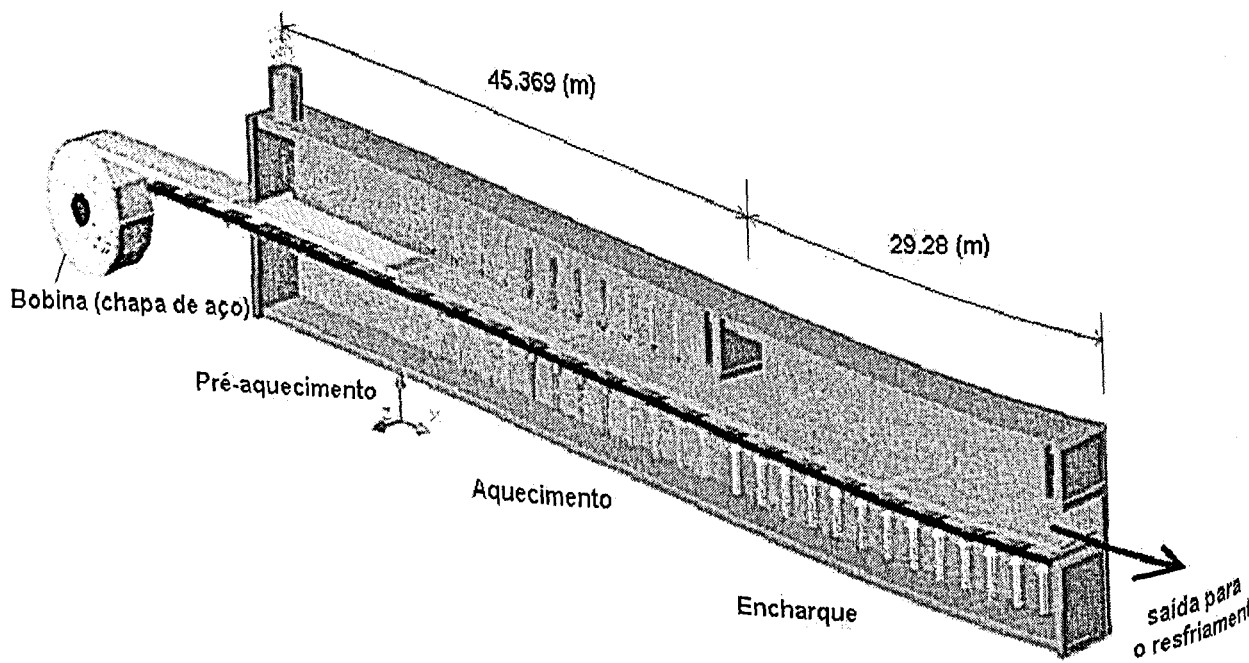


Figura 2.2 – Recozimento da tira de aço - processo de aquecimento

Para o processo de combustão consideram-se os seguintes combustíveis: gás de alto forno (GAF) (em qualquer composição), gás liquefeito de petróleo (GLP), gás misto (GAF + GLP) e combustível líquido (Diesel). Além disso, adota-se que o ar fornecido ao processo de combustão é composto de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Ressalta-se que são simulados o excesso e a escassez de ar no processo de combustão. O software determina ainda a composição, a vazão e a massa das fumaças antes e após o recuperador de calor usado para pré-aquecer o ar fornecido ao processo de combustão.

Uma vez definidos os parâmetros e a metodologia para a simulação do processo de combustão, finaliza-se este capítulo apresentando o modelo térmico de transferência de calor

para a tira de aço (problema direto) e o algoritmo de otimização usado na solução do problema inverso.

2.2 – O Processo de Recozimento

Como mencionado, o recozimento é um tratamento térmico que objetiva aliviar tensões, limitar o crescimento de grão e proporcionar uma leve redistribuição de carbono nos aços.

Neste trabalho, o recozimento é feito em um forno contínuo dividido em seis zonas de atmosfera e temperaturas controladas. As tiras de aço silício passam no interior do forno e ao final de cada bobina é soldada a uma outra tira para se garantir a continuidade do processo. Após o forno, o material é resfriado por ventiladores e água.

Os aços especiais que passam no interior do forno são denominados aço silício GO (grãos orientados) e aço silício GNO (grãos não-orientados). O aço silício GO, desenvolvido para alcançar baixas perdas e elevada permeabilidade magnética, possui características que proporcionam maior eficiência e economia de energia elétrica em equipamentos, tais como núcleos de transformadores, reatores de potência, hidrogeradores e turbo geradores. A principal característica deste produto é apresentar excelentes propriedades magnéticas na direção de laminação.

Por sua vez, o aço silício GNO apresenta propriedades magnéticas plenamente desenvolvidas e é usado na maioria das suas aplicações sem qualquer tratamento térmico posterior. O produto possui excelente valor de permeabilidade em altas induções, baixo valor de perdas magnéticas e pode ser produzido com revestimento isolante. Além disso, possui boa punccionabilidade, excelente planicidade e alto fator de empilhamento. O aço silício GNO é a matéria-prima usada na fabricação dos núcleos de geradores e motores elétricos, reatores para sistemas de iluminação, medidores de energia, pequenos transformadores, compressores herméticos para geladeiras e freezers, além de outros equipamentos.

Com o objetivo de se controlar e ter acesso à temperatura da tira no interior do forno, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento do software "SIMCO – RB2". Uma das principais funções desse programa é a possibilidade de simulação e controle do processo de recozimento. Este procedimento deve, portanto, gerar produtos de melhor qualidade e baixo custo de produção.

2.3 – O Balanço de Energia e a Combustão dos Gases

As leis de conservação de massa e energia ocupam um lugar especial na ciência e também na engenharia. Dentre os enunciados comuns destas leis têm-se (Lavoisier): "massa (energia) não é criada ou destruída". Entretanto no ambiente industrial, apesar de considerável esforço, não é possível obter-se um balanço de massa com precisão maior que 99.9%. Isto ocorre principalmente devido a erros na pesagem e medição da quantidade de materiais no interior de tubulações (Himmelblau,1982).

A crença nas leis de conservação está apoiada nas experiências de Lavoisier e em muitos outros cientistas. Estes pesquisadores estudaram quantitativamente as transformações químicas e descobriram que, invariavelmente, a soma dos pesos das substâncias que entram numa reação é igual à soma dos pesos dos produtos desta reação.

Neste sentido, baseando-se na lei de conservação da massa e energia, será apresentado o balanço térmico do forno RB2. A Figura (2.3) apresenta os principais componentes envolvidos no balanço térmico do forno de recozimento. São eles: as perdas de calor através das paredes do forno devido a convecção e radiação (1); as perdas de calor devido a vazão de fumaça (2); a geração de calor por combustão (3); a quantidade de energia necessária para o aumento de temperatura na tira (4); a quantidade de energia necessária para o aumento de temperatura interna do forno (5) e; a quantidade de energia perdida pelas aberturas do forno (6).

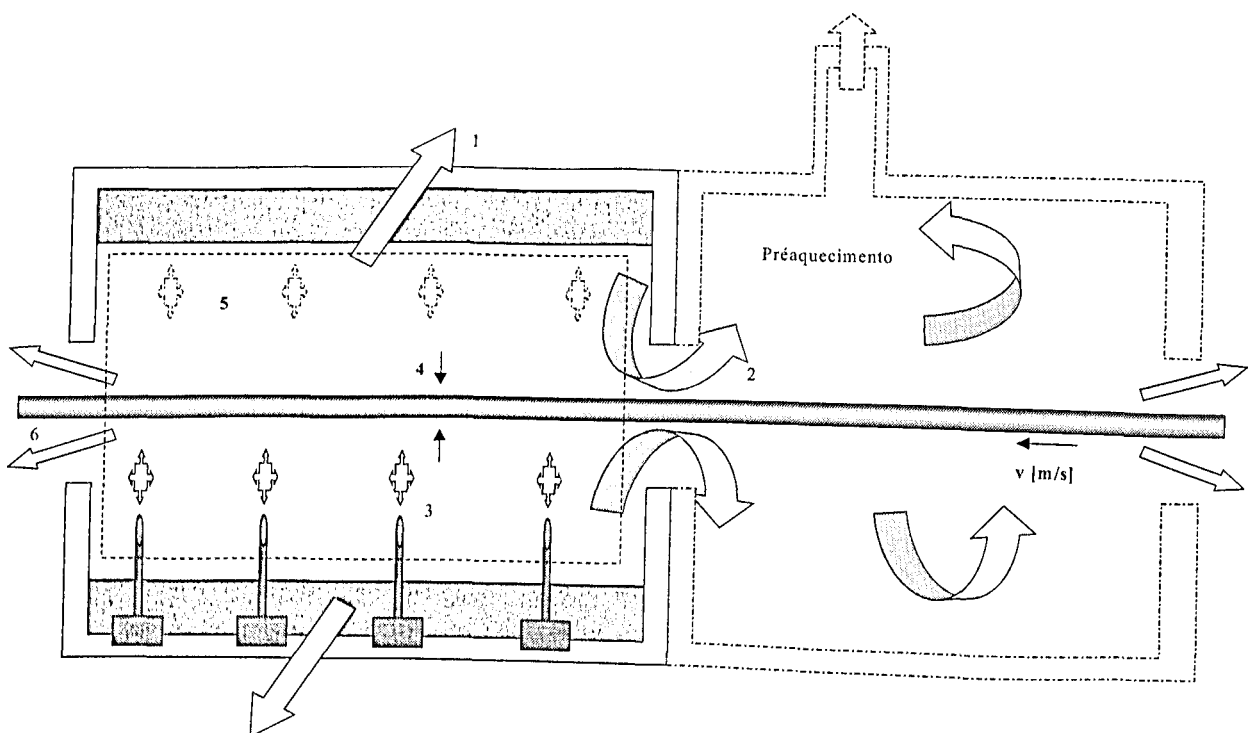


Figura 2.3 - Balanço de energia em um forno de recozimento (zona 1 e pré-aquecimento)

Segundo Machado et al. (1961), o processo de combustão deve levar em consideração as seguintes variáveis: a quantidade de calor fornecido pelo combustível (Q_g), a quantidade de calor recuperado pelo ar de combustão (Q_{Ar}), a quantidade de calor gerado pela combustão (Q_o), a quantidade de calor utilizado para aquecer a carga – calor útil (Q_u), a quantidade de calor perdido pelas paredes e aberturas do forno (Q_f), a quantidade de calor contido nas fumaças que saem do forno (Q_{Fu}), a quantidade de calor contido nas fumaças após o recuperador (Q_{fu}), a quantidade de calor fornecido pelo ar de entrada no recuperador (Q_{Ar}) e a quantidade de calor perdido pelas paredes do recuperador e dos condutos até o recuperador (Q_r).

A Figura (2.4) apresenta em detalhes as notações sobre o processo de combustão.

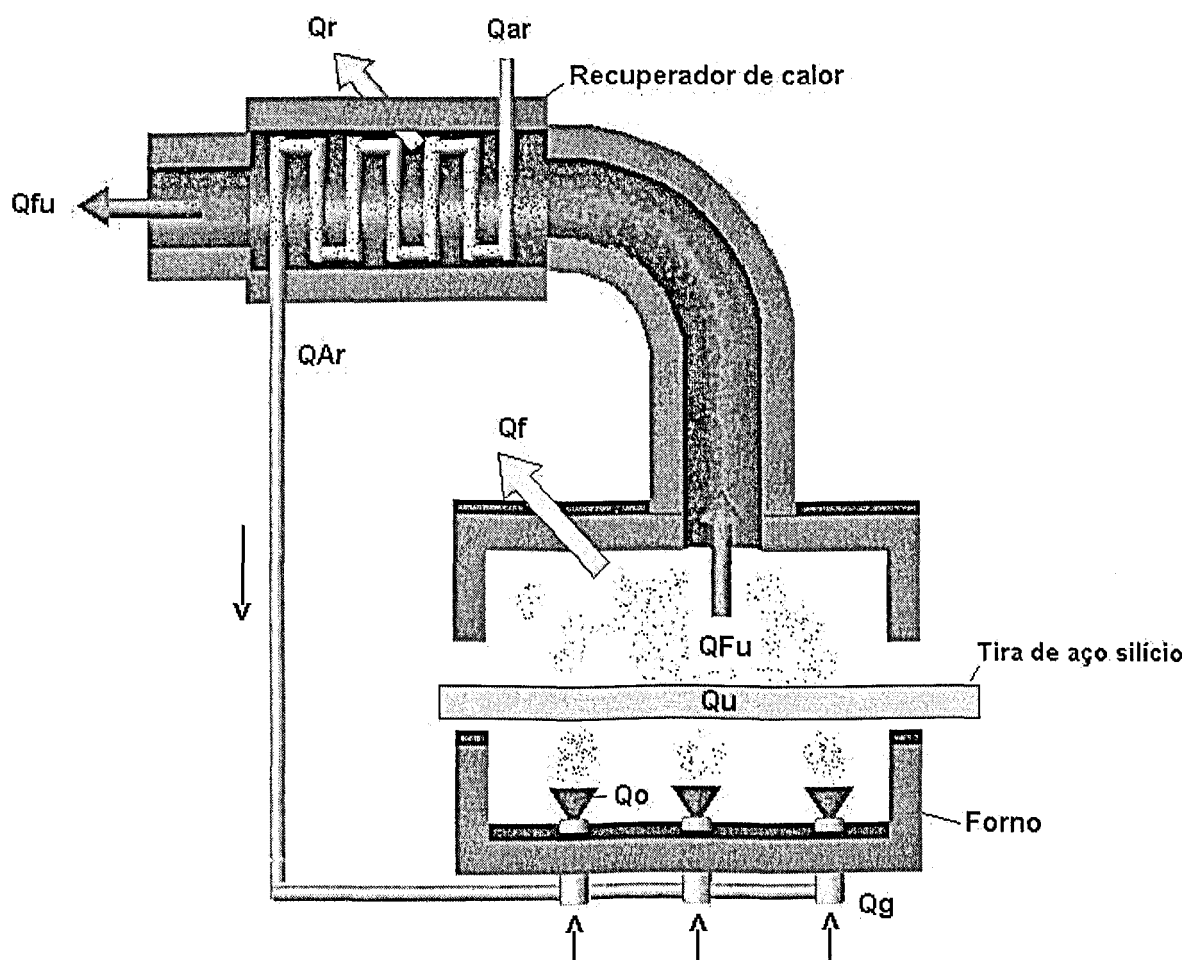


Figura 2.4 – Balanço térmico de uma zona típica do forno RB2

Observando-se a Figura (2.4) verifica-se que o balanço de energia deve ser realizado a partir de um volume de controle que envolva o equipamento a ser considerado. Portanto, serão realizados dois balanços: o balanço de energia no forno e o balanço de energia no recuperador de calor.

A Figura (2.5) apresenta o volume de controle aplicado no interior do forno RB2.

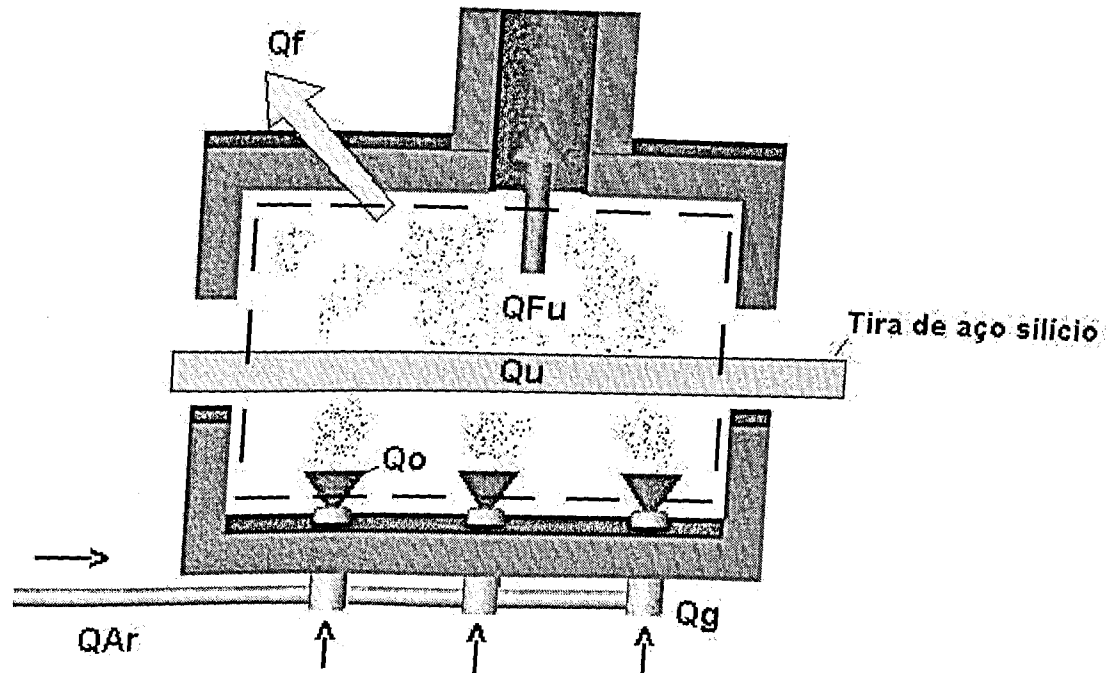


Figura 2.5 – Volume de controle aplicado no interior do forno RB2 em uma zona típica.

Assim, fazendo o balanço de energia no forno RB2, tem-se a seguinte equação (Machado et al., 1961).

$$Q_g + Q_{Ar} + Q_o = Q_{Fu} + Q_u + Q_f \quad (2.1)$$

Ressalta-se que o balanço térmico do Forno RB2 deve considerar todas as zonas. A Figura (2.6) mostra que o calor fornecido pelas fumaças da zona 6 contribui para o aquecimento da zona 5 e assim por diante. Portanto, a cada zona, deve-se acrescentar a parcela de calor fornecida pelas fumaças da zona anterior, sendo que o termo Q_{Fu} considera o efeito de todas as parcelas de fumaça de cada zona.

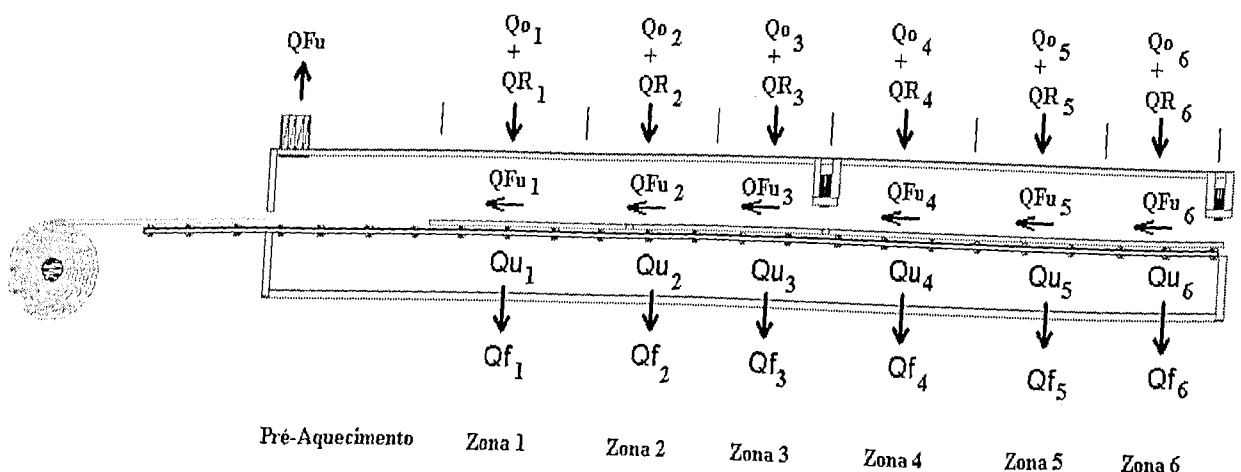


Figura 2.6 - Balanço térmico do forno RB2 incluindo todas as zonas de aquecimento

Apresenta-se a seguir o balanço de energia de cada zona de aquecimento, sendo que este se inicia na zona 6 e se encerra no pré-aquecimento. Assim:

$$\text{Zona 6: } Qg_6 + QAr_6 + Qo_6 = QFu_6 + Qu_6 + Qf_6 \quad (2.2)$$

$$\text{Zona 5: } Qg_5 + QAr_5 + Qo_5 + QFu_6 = QFu_5 + Qu_5 + Qf_5 \quad (2.3)$$

$$\text{Zona 4: } Qg_4 + QAr_4 + Qo_4 + QFu_5 = QFu_4 + Qu_4 + Qf_4 \quad (2.4)$$

$$\text{Zona 3: } Qg_3 + QAr_3 + Qo_3 + QFu_4 = QFu_3 + Qu_3 + Qf_3 \quad (2.5)$$

$$\text{Zona 2: } Qg_2 + QAr_2 + Qo_2 + QFu_3 = QFu_2 + Qu_2 + Qf_2 \quad (2.6)$$

$$\text{Zona 1: } Qg_1 + QAr_1 + Qo_1 + QFu_2 = QFu_1 + Qu_1 + Qf_1 \quad (2.7)$$

$$\text{Pré-aquecimento: } QFu_1 = QFu_o + Qu_o + Qf_o \quad (2.8)$$

Ressalta-se que o pré-aquecimento, Eq. (2.8), não possui queimadores o que explica a ausência das componentes Qg_o , QAr_o e Qo_o .

Concluído o balanço de energia para o forno RB2, realiza-se o balanço de energia para o recuperador de calor (Fig. 2.7).

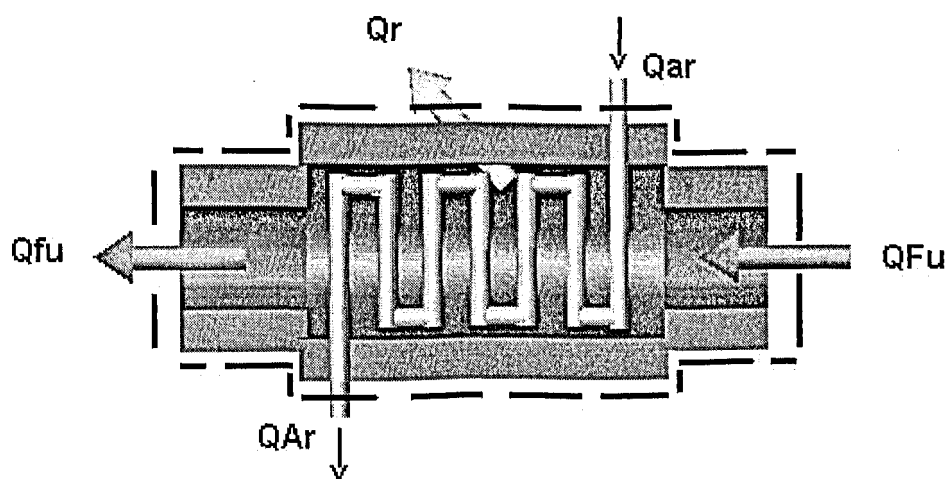


Figura 2.7 – Volume de controle aplicado ao recuperador de calor

Considerando o volume de controle na Fig. (2.7), tem-se a seguinte equação (Machado et al., 1961).

$$QFu + QAr = Qfu + QAr + Q_r \quad (2.9)$$

Verifica-se nas Eqs. (2.1) e (2.9) que algumas variáveis podem ser calculadas conhecendo-se as características físicas do processo como vazão, pressão, temperatura e composição química. Dentre estas variáveis estão a quantidade de calor fornecido pelo combustível (Q_g), a quantidade de calor recuperado pelo ar de combustão (Q_{Ar}), a quantidade de calor gerado pela combustão (Q_o), a quantidade de calor contido nas fumaças que saem do forno (Q_{Fu}), a quantidade de calor contido nas fumaças após o recuperador (Q_{fu}) e a quantidade de calor fornecido pelo ar de entrada no recuperador (Q_{ar}). Entretanto, outras variáveis são de difícil acesso pois dependem das propriedades térmicas de todos os materiais usados na construção do forno e do recuperador, da forma como esses materiais estão dispostos e unidos (resistência térmica de contato), além de outros problemas térmicos mais complexos, como por exemplo a troca de calor com o ambiente por convecção e radiação. Dentre as variáveis não disponíveis diretamente estão as perdas de calor através das paredes do forno (Q_f), o calor útil para aquecer a carga (Q_u) e a quantidade de calor perdido pelas paredes do recuperador e dos condutos até o recuperador (Q_r).

A partir destes conceitos, propõe-se o pré-processamento das variáveis conhecidas e um procedimento para a determinação das variáveis desconhecidas.

2.3.1 – Percentual Volumétrico dos Elementos que Compõem os Gases de Combustão

Os combustíveis usados no forno são: gás de alto forno (GAF), gás liqüefeito de petróleo (GLP), diesel e gás misto composto de GAF e GLP.

A composição química desses gases é apresentada na Tab. 2.1 a partir dos percentuais volumétricos dos elementos que os compõe.

Ressalta-se que o gás misto (GM) é obtido a partir dos elementos que constituem o GAF e o GLP. Um caso típico pode ser descrito pelo seguinte exemplo: para um gás misto (GM) composto de 93.9 % de GAF e 6.1% de GLP, o valor percentual de H_2 (Hidrogênio) na mistura é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Percentual de } H_2 \text{ no GM} &= 0.939 \times \text{Percentual de } H_2 \text{ no GAF} + \\ &+ 0.061 \times \text{Percentual de } H_2 \text{ no GLP} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Tabela 2.1 - Percentual volumétrico dos elementos

ELEMENTOS	COMBUSTÍVEIS			MISTURA
	GAF	GLP	DIESEL	GM
S			0.7	
C			86.0	
H ₂	3.5		13.3	3.29
CO	22.0			20.66
CH ₄	0.2			0.19
C ₂ H ₆		0.03		0.0
C ₃ H ₆		30.47		1.85
C ₃ H ₈		14.34		0.87
C ₄ H ₈		31.76		1.93
C ₄ H ₁₀		23.33		1.42
C ₅ H ₁₂		0.07		0.0
O ₂				
N ₂	59.2			55.6
CO ₂	11.1			10.43
H ₂ O	4.0			3.76
TOTAL	100.0	100.0	100.0	100.0

Assim, através dos percentuais volumétricos de H₂ definidos na Tab. (2.1), tem-se que:

$$\text{Percentual de H}_2 \text{ no GM} = \overset{\text{GAF}}{0.939} \times 3.5 + \overset{\text{GLP}}{0.061} \times 0.0 = 3.2865 \%$$

Repete-se este procedimento para todos os outros elementos.

Conhecido o percentual volumétrico do GM, pode-se realizar o cálculo estequiométrico para a simulação do processo de combustão.

2.3.2 - O Cálculo Estequiométrico

A estequiometria lida com os pesos de elementos e compostos que se combinam. As razões obtidas dos coeficientes numéricos na equação química são as razões estequiométricas que permitem o cálculo do número de moles de uma substância em relação ao número de moles de outra substância na equação química.

Assim, para iniciar-se o cálculo estequiométrico, devem-se converter os pesos volumétricos (Tabela 2.1) em unidade de massa. Neste sentido, a densidade dos elementos que compõem os gases é determinada.

A densidade de um gás é definida como sendo a massa por unidade de volume, vez que a densidade contida num volume varia com a temperatura e a pressão, estas devem ser especificadas. A Eq. (2.11) pode então ser usada para a determinação da densidade dos elementos em função da pressão e temperatura de trabalho (Himmelblau, 1982), ou seja,

$$\rho = \frac{273.15 [K] \times Pe [KPa] \times 1.0 [Kgmol] \times PM [kg]}{Te [K] \times 101.325 [KPa] \times 22.41 [m^3] \times 1.0 [Kgmol]}$$

onde Pe é a pressão absoluta do elemento, PM é o peso molecular do elemento e Te a temperatura do elemento.

Para a solução da Eq. (2.11), deve-se conhecer o peso molecular dos elementos que compõem o gás. O PM é apresentado na Tab. (2.2).

Tabela 2.2 - Peso molecular dos elementos, [Kg].

Elemento	Peso molecular
S (Enxofre)	32.07
C (Carbono)	12.01
H ₂ (Hidrogênio)	2.016
CO (Monóxido de Carbono)	28.01
CH ₄ (Metano)	16.04
C ₂ H ₆ (Etano)	30.07
C ₃ H ₆ (Propeno)	42.08
C ₃ H ₈ (Propano)	44.09
C ₄ H ₈ (n buteno)	56.10
C ₄ H ₁₀ (n butano)	58.12
C ₅ H ₁₂ (n pentano)	72.15
SO ₂ (Dióxido de Enxofre)	64.06
O ₂ (Oxigênio)	32.00
N ₂ (Nitrogênio)	28.02
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	44.01
H ₂ O (Vapor D'água)	

Conhecidos os percentuais volumétricos e adotando-se como base de cálculo a vazão volumétrica de gás de cada zona, tem-se a vazão volumétrica de cada elemento da combustão definida por:

$$\dot{V}_{Elemento} = PercV * \dot{V}_{GM} \quad (2.12)$$

onde $\dot{V}_{Elemento}$ é a vazão volumétrica do elemento e \dot{V}_{GM} é a vazão total de gás.

Para explicar estes conceitos fundamentais e as equações envolvidas, propõe-se um exemplo representando o cálculo estequiométrico para a zona 6 do forno RB2. Neste sentido, faz-se a simulação do processo de combustão de 60 m³/h de GM a 30°C a partir de uma vazão de ar de 201 m³/h pré-aquecido a 297.6°C. Adotando-se a composição do GM apresentada na Tab. (2.1) e sabendo-se que o GM é composto de 3.29% de H₂ (Tab. 2.1), a vazão volumétrica de H₂ pode ser dada por

$$\dot{V}_{H_2} = 0.0329 \times 60 = 1.974 [m^3 / h] \quad (0.0329[m^3 / s])$$

Repetindo-se este procedimento para todos os elementos, obtém-se a vazão volumétrica de cada um e a vazão mássica dada por:

$$\dot{m}_{Elemento} = \dot{V}_{Elemento} * \rho \quad (2.13)$$

onde $\dot{m}_{Elemento}$ é a vazão mássica do elemento e ρ é a densidade do elemento.

Desprezando-se a variável tempo, pode-se fazer o cálculo estequiométrico dos elementos determinando o número de moles de cada um através de

$$N_{moles} = \frac{m_{Elemento}}{PM} \quad (2.14)$$

onde N_{moles} representa o número de moles.

A partir das Eqs. (2.11) – (2.14), calcula-se as vazões volumétricas, as densidades e as vazões mássicas dos elementos que compõem o GM, Tab. (2.3).

Tabela 2.3 – Vazão volumétrica dos elementos que compõem o GM

Elemento	Vazão Volumétrica [m ³ /s]	Densidade [Kg/m ³] T = 30°C P = 1 atm	Vazão Mássica [Kg/s]
S (Enxofre)	0	1.43	0
C (Carbono)	0	0.53	0
H ₂ (Hidrogênio)	5.43 x 10 ⁻⁴	0.089	4.88 x 10 ⁻⁵
CO (Monóxido de Carbono)	3.41 x 10 ⁻³	1.24	4.26 x 10 ⁻³
CH ₄ (Metano)	3.10 x 10 ⁻⁵	0.71	2.22 x 10 ⁻⁵
C ₂ H ₆ (Etano)	3.41 x 10 ⁻⁷	1.34	4.57 x 10 ⁻⁷
C ₃ H ₆ (Propeno)	3.46 x 10 ⁻⁴	1.87	6.50 x 10 ⁻⁴
C ₃ H ₈ (Propano)	1.63 x 10 ⁻⁴	1.96	3.20 x 10 ⁻⁴
C ₄ H ₈ (n buteno)	3.61 x 10 ⁻⁴	2.5	9.04 x 10 ⁻⁴
C ₄ H ₁₀ (n butano)	2.65 x 10 ⁻³	2.59	6.88 x 10 ⁻³
C ₅ H ₁₂ (n pentano)	7.96 x 10 ⁻⁷	3.21	2.56 x 10 ⁻⁶
SO ₂ (Dióxido de Enxofre)	0	0	0
O ₂ (Oxigênio)	0	1.42	0
N ₂ (Nitrogênio)	9.26 x 10 ⁻³	1.24	1.11 x 10 ⁻²
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	1.73 x 10 ⁻³	1.96	3.39 x 10 ⁻³
H ₂ O (Vapor D'água)	6.26 x 10 ⁻⁴	0.80	5.00 x 10 ⁻⁴
TOTAL	1.66 x 10 ⁻²	21.469	2.80 x 10 ⁻²

Conhecida a vazão mássica dos elementos, efetua-se o cálculo estequiométrico obtendo-se assim a vazão de ar necessária à combustão completa do GM. Nesse caso a vazão de ar estequiométrica é comparada à vazão de ar fornecida, determinando-se o excesso ou escassez da vazão de ar fornecida à zona 6 (exemplo proposto).

As reações de combustão estequiométrica são apresentadas na Tab. (2.4).

Ressalta-se que a Tab. (2.4) apresenta as principais reações de combustão estequiométrica considerando 1 (um) mol de cada elemento. Entretanto, para se determinar a vazão estequiométrica de ar necessária à combustão completa de 60 m³/h de GM, refazer o cálculo estequiométrico levando-se em consideração a vazão mássica apresentada na Tab. (2.3).

Tabela 2.4 – Combustão estequiométrica dos elementos

Elemento	Combustão Estequiométrica
S (Enxofre)	$S + O_2 + 3.76 N_2 \rightarrow SO_2 + 3.76 N_2$
C (Carbono)	$C + 0.5 O_2 + 1.88 N_2 \rightarrow CO + 1.88 N_2$
H ₂ (Hidrogênio)	$H_2 + 0.5 O_2 + 1.88 N_2 \rightarrow H_2O + 1.88 N_2$
CO (Monóxido de Carbono)	$CO + 0.5 O_2 + 1.88 N_2 \rightarrow CO_2 + 1.88 N_2$
CH ₄ (Metano)	$CH_4 + 2.0 O_2 + 7.52 N_2 \rightarrow CO_2 + 2.0 H_2O + 7.52 N_2$
C ₂ H ₆ (Etano)	$C_2H_6 + 3.5 O_2 + 13.76 N_2 \rightarrow 2.0 CO_2 + 3.0 H_2O + 13.76 N_2$
C ₃ H ₆ (Propeno)	$C_3H_6 + 4.5 O_2 + 16.92 N_2 \rightarrow 3.0 CO_2 + 3.0 H_2O + 16.92 N_2$
C ₃ H ₈ (Propano)	$C_3H_8 + 5.0 O_2 + 18.8 N_2 \rightarrow 3.0 CO_2 + 4.0 H_2O + 18.8 N_2$
C ₄ H ₈ (n-buteno)	$C_4H_8 + 6.0 O_2 + 22.56 N_2 \rightarrow 4.0 CO_2 + 4.0 H_2O + 22.56 N_2$
C ₄ H ₁₀ (n-butano)	$C_4H_{10} + 6.5 O_2 + 24.44 N_2 \rightarrow 4.0 CO_2 + 5.0 H_2O + 24.44 N_2$
C ₅ H ₁₂ (n-pentano)	$C_5H_{12} + 8.0 O_2 + 30.08 N_2 \rightarrow 5.0 CO_2 + 6.0 H_2O + 30.08 N_2$

Portanto, recalculando o balanço estequiométrico tem-se,

Tabela 2.5 – Cálculo da combustão estequiométrica dos elementos

	Combustão Estequiométrica
1	$0.0 S + 0.0 O_2 + 0.0 N_2 \rightarrow 0.0 SO_2 + 0.0 N_2$
2	$0.0 C + 0.0 O_2 + 0.0 N_2 \rightarrow 0.0 CO + 0.0 N_2$
3	$2.4 \times 10^{-5} H_2 + 1.2 \times 10^{-5} O_2 + 4.5 \times 10^{-5} N_2 \rightarrow 2.4 \times 10^{-5} H_2O + 4.5 \times 10^{-5} N_2$
4	$1.5 \times 10^{-4} CO + 7.6 \times 10^{-5} O_2 + 2.8 \times 10^{-4} N_2 \rightarrow 1.5 \times 10^{-4} CO_2 + 2.8 \times 10^{-4} N_2$
5	$1.3 \times 10^{-6} CH_4 + 2.7 \times 10^{-6} O_2 + 1.0 \times 10^{-5} N_2 \rightarrow 1.3 \times 10^{-6} CO_2 + 2.7 \times 10^{-6} H_2O + 1.0 \times 10^{-5} N_2$
6	$1.5 \times 10^{-8} C_2H_6 + 5.3 \times 10^{-8} O_2 + 2.0 \times 10^{-7} N_2 \rightarrow 3.0 \times 10^{-8} CO_2 + 4.5 \times 10^{-8} H_2O + 2.0 \times 10^{-7} N_2$
7	$1.5 \times 10^{-5} C_3H_6 + 6.9 \times 10^{-5} O_2 + 2.6 \times 10^{-4} N_2 \rightarrow 4.6 \times 10^{-5} CO_2 + 4.6 \times 10^{-5} H_2O + 2.6 \times 10^{-4} N_2$
8	$7.2 \times 10^{-6} C_3H_8 + 3.6 \times 10^{-5} O_2 + 1.3 \times 10^{-4} N_2 \rightarrow 2.1 \times 10^{-5} CO_2 + 2.9 \times 10^{-5} H_2O + 1.3 \times 10^{-4} N_2$
9	$1.6 \times 10^{-5} C_4H_8 + 9.6 \times 10^{-5} O_2 + 3.6 \times 10^{-4} N_2 \rightarrow 6.4 \times 10^{-5} CO_2 + 6.4 \times 10^{-5} H_2O + 3.6 \times 10^{-4} N_2$
10	$1.1 \times 10^{-5} C_4H_{10} + 7.6 \times 10^{-5} O_2 + 2.8 \times 10^{-4} N_2 \rightarrow 4.7 \times 10^{-5} CO_2 + 5.9 \times 10^{-5} H_2O + 2.8 \times 10^{-4} N_2$
11	$3.5 \times 10^{-8} C_5H_{12} + 2.8 \times 10^{-7} O_2 + 1.0 \times 10^{-6} N_2 \rightarrow 1.7 \times 10^{-7} CO_2 + 2.1 \times 10^{-7} H_2O + 1.0 \times 10^{-6} N_2$

Assim, somando todas as linhas da Tab. (2.5) e adicionando os elementos restantes que compõem a combustão (CO_2 , N_2 e H_2O) da Tab. (2.1), tem-se o cálculo estequiométrico total dado por,

Tabela 2.6 – Cálculo estequiométrico total para o GM

Cálculo estequiométrico do gás misto	
$2.4 \times 10^{-5} \text{H}_2 + 1.5 \times 10^{-4} \text{CO} + 1.3 \times 10^{-6} \text{CH}_4 + 1.5 \times 10^{-8} \text{C}_2\text{H}_6 + 1.5 \times 10^{-5} \text{C}_3\text{H}_6 + 7.2 \times 10^{-6} \text{C}_3\text{H}_8 + 1.6 \times 10^{-5} \text{C}_4\text{H}_8 + 1.1 \times 10^{-5} \text{C}_4\text{H}_{10} + 3.5 \times 10^{-8} \text{C}_5\text{H}_{12} + 7.6 \times 10^{-5} \text{CO}_2 + 2.7 \times 10^{-5} \text{H}_2\text{O} + 3.7 \times 10^{-4} \text{O}_2 + 1.8 \times 10^{-3} \text{N}_2$	$\rightarrow 4.1 \times 10^{-4} \text{CO}_2 + 2.5 \times 10^{-4} \text{H}_2\text{O} + 1.8 \times 10^{-3} \text{N}_2$

Conhecido o número total de moles de oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2), tem-se a vazão de ar estequiométrica (Eq. 2.15). Ressalta-se que o *Nº total de moles de N_2* deve ser subtraído do número de moles de nitrogênio que compõem o GM apresentado na Tab. (2.1), pois neste procedimento considera-se que somente o nitrogênio contido no ar é fornecido ao processo de combustão. Assim,

$$\dot{V}_{ar} = \frac{N^\circ \text{ total de moles de } \text{O}_2 \times PM_{\text{O}_2}}{\rho_{\text{O}_2}} + \frac{N^\circ \text{ total de moles de } \text{N}_2 \times PM_{\text{N}_2}}{\rho_{\text{N}_2}} \quad (2.15)$$

ou

$$\dot{V}_{ar} = \frac{3.7 \times 10^{-4} \times 32.0}{1.42} + \frac{1.4 \times 10^{-3} \times 28.0}{1.24} = 3.9 \times 10^{-2} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

ou ainda

$\dot{V}_{ar} = 3.9 \times 10^{-2} \times 3600 = 140.4 \text{ [m}^3/\text{h]}$ de ar para que ocorra a combustão completa do gás.

O valor da vazão de ar estequiométrica para que ocorra a combustão completa pode então ser usado para a verificação do excesso ou escassez de ar na combustão.

Como no início do exemplo definiu-se que a combustão de GM ocorria a partir de 201 m^3/h de ar, tem-se portanto que

$$m = \frac{201}{140.4} = 1.43$$

onde m é o parâmetro que leva em consideração o excesso ou escassez de ar, verificando-se que a combustão do GM ocorre com 43% de excesso de ar. Portanto, refazendo-se todo o cálculo estequiométrico considerando o excesso de ar, obtém-se

Tabela 2.7 – Cálculo da combustão simulando o excesso de ar

Combustão simulando o excesso de ar	
1	$0.0 \text{ S} + 0.0 \text{ O}_2 + 0.0 \text{ N}_2 \rightarrow 0.0 \text{ SO}_2 + 0.0 \text{ N}_2$
2	$0.0 \text{ C} + 0.0 \text{ O}_2 + 0.0 \text{ N}_2 \rightarrow 0.0 \text{ CO} + 0.0 \text{ N}_2$
3	$2.4 \times 10^{-5} \text{ H}_2 + 1.7 \times 10^{-5} \text{ O}_2 + 6.4 \times 10^{-5} \text{ N}_2 \rightarrow 2.4 \times 10^{-5} \text{ H}_2\text{O} + 6.4 \times 10^{-5} \text{ N}_2 + 4.9 \times 10^{-6} \text{ O}_2$
4	$1.5 \times 10^{-4} \text{ CO} + 1.0 \times 10^{-4} \text{ O}_2 + 4.0 \times 10^{-4} \text{ N}_2 \rightarrow 1.5 \times 10^{-4} \text{ CO}_2 + 4.0 \times 10^{-4} \text{ N}_2 + 3.1 \times 10^{-5} \text{ O}_2$
5	$1.3 \times 10^{-6} \text{ CH}_4 + 3.9 \times 10^{-6} \text{ O}_2 + 1.4 \times 10^{-5} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 1.3 \times 10^{-6} \text{ CO}_2 + 2.7 \times 10^{-6} \text{ H}_2\text{O} + 1.4 \times 10^{-5} \text{ N}_2 + 1.1 \times 10^{-6} \text{ O}_2$
6	$1.5 \times 10^{-8} \text{ C}_2\text{H}_6 + 7.5 \times 10^{-8} \text{ O}_2 + 2.8 \times 10^{-7} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 3.0 \times 10^{-8} \text{ CO}_2 + 4.5 \times 10^{-8} \text{ H}_2\text{O} + 2.8 \times 10^{-7} \text{ N}_2 + 2.1 \times 10^{-8} \text{ O}_2$
7	$1.5 \times 10^{-5} \text{ C}_3\text{H}_6 + 9.8 \times 10^{-5} \text{ O}_2 + 3.6 \times 10^{-4} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 4.6 \times 10^{-5} \text{ CO}_2 + 4.6 \times 10^{-5} \text{ H}_2\text{O} + 3.6 \times 10^{-4} \text{ N}_2 + 2.8 \times 10^{-5} \text{ O}_2$
8	$7.2 \times 10^{-6} \text{ C}_3\text{H}_8 + 5.1 \times 10^{-5} \text{ O}_2 + 1.9 \times 10^{-4} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 2.1 \times 10^{-5} \text{ CO}_2 + 2.9 \times 10^{-5} \text{ H}_2\text{O} + 1.9 \times 10^{-4} \text{ N}_2 + 1.4 \times 10^{-5} \text{ O}_2$
9	$1.6 \times 10^{-5} \text{ C}_4\text{H}_8 + 1.3 \times 10^{-4} \text{ O}_2 + 5.1 \times 10^{-4} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 6.4 \times 10^{-5} \text{ CO}_2 + 6.4 \times 10^{-5} \text{ H}_2\text{O} + 5.1 \times 10^{-4} \text{ N}_2 + 3.9 \times 10^{-5} \text{ O}_2$
10	$1.1 \times 10^{-5} \text{ C}_4\text{H}_{10} + 1.0 \times 10^{-4} \text{ O}_2 + 4.0 \times 10^{-4} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 4.7 \times 10^{-5} \text{ CO}_2 + 5.9 \times 10^{-5} \text{ H}_2\text{O} + 4.0 \times 10^{-4} \text{ N}_2 + 3.1 \times 10^{-5} \text{ O}_2$
11	$3.5 \times 10^{-8} \text{ C}_5\text{H}_{12} + 4.0 \times 10^{-7} \text{ O}_2 + 1.5 \times 10^{-6} \text{ N}_2 \rightarrow$ $\rightarrow 1.7 \times 10^{-7} \text{ CO}_2 + 2.1 \times 10^{-7} \text{ H}_2\text{O} + 1.5 \times 10^{-6} \text{ N}_2 + 1.1 \times 10^{-7} \text{ O}_2$

Verifica-se em todas as linhas da Tab. (2.7) a parcela de oxigênio (O_2) fornecida em excesso. Somando-se todos os elementos da Tab. (2.7) e adicionando os elementos restantes da Tab. (2.1) (CO_2 , N_2 e H_2O), tem-se o cálculo da combustão do GM com excesso de ar.

Tabela 2.8 – Cálculo da combustão do GM com excesso de ar

Balanço total da combustão de GM com excesso de ar	
$2.4 \times 10^{-5} \text{ H}_2 + 1.5 \times 10^{-4} \text{ CO} + 1.3 \times 10^{-6} \text{ CH}_4 + 1.5 \times 10^{-8} \text{ C}_2\text{H}_6 + 1.5 \times 10^{-5} \text{ C}_3\text{H}_6 + 7.2 \times 10^{-6} \text{ C}_3\text{H}_8 + 1.6 \times 10^{-5} \text{ C}_4\text{H}_8 + 1.1 \times 10^{-5} \text{ C}_4\text{H}_{10} + 3.5 \times 10^{-8} \text{ C}_5\text{H}_{12} + 7.6 \times 10^{-5} \text{ CO}_2 + 2.7 \times 10^{-5} \text{ H}_2\text{O} + 5.2 \times 10^{-4} \text{ O}_2 + 2.3 \times 10^{-3} \text{ N}_2$	→
	$4.1 \times 10^{-4} \text{ CO}_2 + 2.5 \times 10^{-4} \text{ H}_2\text{O} + 2.3 \times 10^{-3} \text{ N}_2 + 1.5 \times 10^{-4} \text{ O}_2$

Uma vez conhecido o número de moles dos reagentes e produtos da combustão na forma estequiométrica e simulando o processo real de combustão com excesso de ar, tem-se a informação necessária para o cálculo das variáveis de processo que são: a quantidade de calor fornecido pelo combustível (Q_g), a quantidade de calor recuperado pelo ar de combustão (Q_{Ar}), a quantidade de calor gerado pela combustão (Q_o), a quantidade de calor contido nas fumaças que saem do forno (Q_{Fu}), a quantidade de calor contido nas fumaças após o recuperador (Q_{fu}) e a quantidade de calor fornecido pelo ar de entrada no recuperador (Q_{ar}). Apresenta-se na seqüência o procedimento de cálculo destas variáveis.

2.3.3 – Entalpia Aplicada ao Processo de Combustão

O processo de combustão do forno RB2, envolve combinações de propriedades termodinâmicas como pressão, volume e temperatura. Neste sentido, para o cálculo do balanço de energia, será usada a propriedade termodinâmica entalpia.

Verifica-se na Eq. (2.1) que $Q_g + Q_{Ar}$ representam a variação da entalpia dos reagentes da combustão ($\Delta H_{reagentes}$), Q_o representa a entalpia de reação nas condições padrões (25°C e 1 atm) expressa por $\Delta H^o_{reação}$ e Q_{Fu} representa a variação da entalpia dos produtos da combustão ($\Delta H_{produtos}$). Assim, reescrevendo a Eq. (2.1), tem-se

$$\Delta H_{reagentes} + \Delta H^o_{reação} = \Delta H_{produtos} + Q_u + Q_f \quad (2.16)$$

Sabe-se que (Himmelblau, 1982),

$$\Delta H_{reagentes} = \int_{25^\circ\text{C}}^{T_g} C_p(T) dT + \int_{25^\circ\text{C}}^{T_{Ar}} C_p(T) dT \quad (2.17)$$

onde T_g representa a temperatura do combustível, T_{Ar} representa a temperatura do ar pré-aquecido e $C_p(T)$ representa o calor específico dos elementos químicos que compõem o gás,

ar e as fumaças sendo expresso na forma de um polinômio definido por $C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$. A Tabela 2.9 apresenta os calores específicos dos elementos.

Tabela 2.9 - Calor específico dos elementos em função da temperatura (Himmelblau, 1982).

Calor específico de cada elemento $C_p(T)$ $\left(\frac{J}{gmol \text{ } ^\circ C}\right)$	T
$C_{pS_2} = 23.52 + 1.84 \times 10^{-1} T$	$^\circ C$
$C_{pC} = 87.5 + 0.31 \times 10^{-2} T - 0.00297 \times 10^{-5} T^2 + 0.000144 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pH_2} = 28.84 + 0.00765 \times 10^{-2} T + 0.3288 \times 10^{-5} T^2 - 0.8698 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pCO} = 28.95 + 0.411 \times 10^{-2} T + 0.3548 \times 10^{-5} T^2 - 2.22 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pCH_4} = 34.31 + 5.469 \times 10^{-2} T + 0.3661 \times 10^{-5} T^2 - 11.0 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pC_2H_6} = 49.37 + 13.92 \times 10^{-2} T - 5.816 \times 10^{-5} T^2 + 7.28 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pC_3H_6} = 59.58 + 17.71 \times 10^{-2} T - 10.17 \times 10^{-5} T^2 + 24.6 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pC_3H_8} = 68.032 + 22.59 \times 10^{-2} T - 13.11 \times 10^{-5} T^2 + 31.71 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pC_4H_8} = 82.88 + 25.64 \times 10^{-2} T - 17.27 \times 10^{-5} T^2 + 50.5 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pC_4H_{10}} = 89.46 + 30.13 \times 10^{-2} T - 18.91 \times 10^{-5} T^2 + 49.87 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pC_5H_{12}} = 114.8 + 34.09 \times 10^{-2} T - 18.99 \times 10^{-5} T^2 + 42.26 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pO_2} = 29.1 + 1.158 \times 10^{-2} T - 0.6076 \times 10^{-5} T^2 + 1.311 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pN_2} = 29.0 + 0.2199 \times 10^{-2} T + 0.5723 \times 10^{-5} T^2 - 2.871 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pH_2O} = 33.46 + 0.688 \times 10^{-2} T + 0.7604 \times 10^{-5} T^2 - 3.593 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pCO_2} = 36.11 + 4.233 \times 10^{-2} T - 2.887 \times 10^{-5} T^2 + 7.464 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$
$C_{pSO_2} = 38.91 + 3.904 \times 10^{-2} T - 3.104 \times 10^{-5} T^2 + 8.606 \times 10^{-9} T^3$	$^\circ C$

* T representa a temperatura em graus Celsius na qual o elemento se encontra.

Para se obter o calor específico da mistura de vários elementos usa-se a equação (Himmelblau, 1982)

$$C_p(T) = 1000 \times \sum_{i=1}^n \left[N_{moles_i} \times (A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^3) \right] \left[\frac{J}{^\circ C} \right] \quad (2.18)$$

onde n representa o número de elementos da mistura.

Tabela 2.10 – Entalpia padrão de formação dos elementos (Himmelblau, 1982).

Elemento	$\Delta H_f^\circ \left(\frac{kJ}{gmol} \right)$
S (Enxofre)	0.0
C (Carbono)	0.0
H ₂ (Hidrogênio)	0.0
CO (Monóxido de Carbono)	110.520
CH ₄ (Metano)	74.840
C ₂ H ₆ (Etano)	84.667
C ₃ H ₆ (Propeno)	-20.410
C ₃ H ₈ (Propano)	103.85
C ₄ H ₈ (n buteno)	-1.172
C ₄ H ₁₀ (n butano)	124.73
C ₅ H ₁₂ (n pentano)	173.1
SO ₂ (Dióxido de Enxofre)	296.90
O ₂ (Oxigênio)	0.0
N ₂ (Nitrogênio)	0.0
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	393.51
H ₂ O (Vapor D'água)	241.826

A entalpia padrão da reação ($\Delta H^\circ_{reação}$) representa a escolha inicial de um estado de referência, no qual o calor da reação é conhecido. Para se determinar a entalpia padrão de reação, representada pela Eq.(2.19), deve-se conhecer o cálculo estequiométrico dos reagentes envolvidos (Tabela 2.6) e a entalpia padrão de formação dos elementos. Assim,

$$\Delta H_{\text{reação}25^{\circ}\text{C}} = 1.0 \times 10^6 \times \sum_{i=1}^n \left(N^{\circ} \text{ de moles}_i \times \Delta H_{f_i}^{\circ} \right) \quad (2.19)$$

onde ΔH_f° representa a entalpia padrão de formação dos compostos à 25°C e 1 atm (Himmelblau, 1982). A Tabela 2.10, apresenta a entalpia padrão de formação.

A variação da entalpia dos produtos da combustão ($\Delta H_{\text{produtos}}$) pode ser dada por (Himmelblau, 1982),

$$\Delta H_{\text{produtos}} = \int_{25^{\circ}\text{C}}^{TFu} Cp(T) dT \quad (2.20)$$

onde TFu representa a temperatura das fumaças.

Substituindo as Eqs. (2.17), (2.19) e (2.20) na Eq. (2.16), tem-se:

$$\int_{25^{\circ}\text{C}}^{Tg} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}\text{C}}^{TAr} Cp(T) dT + \Delta H_{\text{reação}}^{\circ} = \int_{25^{\circ}\text{C}}^{TFu} Cp(T) dT + Q_u + Q_f \quad (2.21)$$

A Eq. (2.21) representa o balanço de energia aplicado ao forno RB2.

Analogamente, pode-se reescrever a Eq. (2.9), obtendo-se o balanço de energia para o recuperador como:

$$\int_{25^{\circ}\text{C}}^{TFu} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}\text{C}}^{TAr} Cp(T) dT = \int_{25^{\circ}\text{C}}^{Tfu} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}\text{C}}^{TAr} Cp(T) dT + Q_r \quad (2.22)$$

onde Q_r é o calor perdido pelas paredes do recuperador de calor.

Verifica-se na Eq. (2.22) que Q_r pode ser determinado a partir do conhecimento das temperaturas de entrada e saída de ar e de fumaças. Considerando que a capacidade do recuperador pode ser observada pelo ganho de energia do ar a ser entregue para a combustão, propõe-se a definição do parâmetro rendimento do recuperador de calor como,

$$N_R = \frac{\int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{fu}} C_p(T) dT}{\int_{25^{\circ}C}^{T_{Fu}} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT} \quad (2.23)$$

ou seja, o rendimento do recuperador é dado pela razão entre a soma do calor das fumaças e do ar na saída e na entrada do recuperador. Uma vez que as perdas de calor através das paredes do recuperador são difíceis de se modelar, essa equação torna-se fundamental para a sua identificação, determinando-se Q_r através de:

$$Q_r = \left(\int_{25^{\circ}C}^{T_{Fu}} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT \right) \times (1 - N_R)$$

Para a obtenção da solução da Eq. (2.21) deve-se conhecer o calor útil fornecido a tira (Q_u) e as perdas de calor no processo de combustão (Q_f). Ressalta-se que essas perdas dependem fortemente das características físicas e geométricas do forno, o que torna o cálculo muito complexo. Portanto, optou-se pelo cálculo do calor útil fornecido à tira de aço. O uso de técnicas de problemas inversos em condução de calor representa uma boa alternativa para se determinar o calor útil. Medindo-se 2 (duas) temperaturas em regiões acessíveis da tira de aço, por meio de 2 (dois) pirômetros calibrados (Figura 2.1), e conhecendo-se o calor gerado pelo processo de combustão, tem-se a informação necessária para que a técnica consiga resgatar o fluxo de calor aplicado a tira. Logo, a partir do cálculo do calor útil (Q_u), pode-se calcular o calor perdido pelas paredes e aberturas do forno (Q_f) e assim, determinar o rendimento do forno, que por sua vez é definido por:

$$N_F = \frac{Q_u}{\int_{25^{\circ}C}^{T_g} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT + \Delta H_{reação}^o} \quad (2.24)$$

ou seja, o rendimento do forno é definido como a razão entre o calor útil entregue a tira e a soma do calor dos gases e do ar pré-aquecido e o calor perdido pelo forno pode ser obtido por

$$Q_f = \left(\int_{25^{\circ}C}^{Tg} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{TAr} Cp(T) dT + \Delta H_{reação}^{\circ} \right) \times (1 - N_F - N_{Fu})$$

onde N_{Fu} representa o calor perdido nas fumaças que saem do forno e é dado por

$$N_{Fu} = \frac{\int_{25^{\circ}C}^{TFu} Cp(T) dT}{\int_{25^{\circ}C}^{Tg} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{TAr} Cp(T) dT + \Delta H_{reação}^{\circ}}$$

Tanto o rendimento do forno como o do recuperador são usados como parâmetros de ajuste do software "SIMCO – RB2". Ou seja, a partir da definição de um rendimento fixo para o forno RB2, pode-se simular o processo de transferência de calor para a tira de aço e prever a temperatura adquirida pelos dois pirômetros.

Nas equações apresentadas anteriormente, admitiu-se que a temperatura das fumaças (TFu) era um parâmetro conhecido, ou seja, medido no interior do forno. Entretanto, o ideal é que o software "SIMCO – RB2" simule o processo de combustão no interior do forno RB2 independente da medição desta temperatura. Esse objetivo pode ser alcançado por meio da determinação da temperatura das fumaças.

2.4 - Cálculo da Temperatura das Fumaças

A temperatura das fumaças é definida como a temperatura no interior de um processo quando a reação transcorre sob condições de troca de calor entre o frasco reacional e o exterior. Neste sentido, supõe-se que os produtos são descarregados na temperatura da reação e assim, se é conhecida a temperatura dos produtos, conhece-se automaticamente a temperatura da reação. A Fig. (2.6) apresenta o modelo de combustão usado para a simulação da temperatura das fumaças.

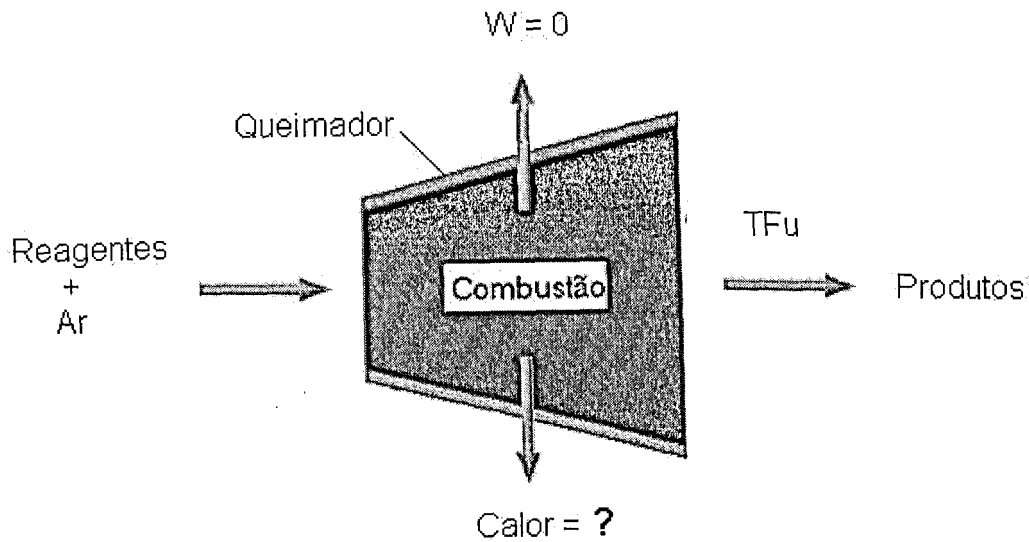


Figura 2.8 – Modelo de combustão usado para simulação da temperatura das fumaças

Observa-se na Figura (2.8) que TFu representa a temperatura das fumaças, e que o modelo de combustão desconsidera qualquer trabalho (W) realizado no processo de combustão. Entretanto, deve-se considerar o calor perdido nas paredes do queimador devido à troca de calor com o ambiente. Assim o restante da energia liberada é destinada a aumentar a entalpia dos produtos da reação e o balanço de energia no queimador, ou seja

$$\Delta H_{reagentes} + \Delta H_{reação}^o = \Delta H_{produtos} + Q_c \quad (2.25)$$

onde Q_c representa o calor perdido pelas paredes do queimador durante o processo de combustão.

Substituindo as Eqs. (2.17), (2.19) e (2.20) na Eq. (2.25), tem-se:

$$\int_{25^{\circ}C}^{T_g} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT + \Delta H_{reação}^o = \int_{25^{\circ}C}^{TFu} C_p(T) dT + Q_c \quad (2.26)$$

A Eq. (2.26) representa o balanço de energia aplicado a um queimador do forno RB2. Conhecidas as temperaturas dos gases (T_g) e do ar pré-aquecido (T_{Ar}), verifica-se nesta equação a existência de duas incógnitas: a temperatura das fumaças (TFu) e o calor perdido no processo de combustão (Q_c). Resta, portanto, a aplicação de uma metodologia que possibilite conhecer uma dessas variáveis. Observa-se que para a determinação de Q_c ,

devem-se conhecer as dimensões dos queimadores e suas propriedades térmicas, além das dimensões e propriedades térmicas dos materiais que entram em contato direto com a superfície externa do queimador e as equações que envolvem o problema térmico. Assim, para facilitar o procedimento de cálculo e considerando que o forno RB2 possui 6 zonas de aquecimento em regime permanente, propõe-se o cálculo do calor perdido no processo de combustão a partir da medição da temperatura das fumaças, por meio de sensores calibrados, posicionados no interior de cada zona de aquecimento do forno. A partir do conhecimento de Q_{Fu} , pode-se então determinar o rendimento e o calor perdido no processo de combustão (Q_c), ou seja:

$$N_c = \frac{Q_{Fu}}{\int_{25^{\circ}C}^{T_g} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT + \Delta H_{reação}^o} \quad (2.27)$$

$$Q_c = \left(\int_{25^{\circ}C}^{T_g} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT + \Delta H_{reação}^o \right) \times (1 - N_c)$$

Ressalta-se que cada região do forno é composta por um número definido de queimadores cujas dimensões variam a cada zona. Portanto, optou-se pela determinação do rendimento do processo de combustão de cada zona. Assim, mantendo o rendimento de cada zona fixo, pode-se simular a combustão e determinar Q_c e a temperatura das fumaças a partir de qualquer vazão de combustível e ar, sendo este outro parâmetro de ajuste do software "SIMCO – RB2".

Para o cálculo da temperatura das fumaças, Eq.(2.26), substitui-se $C_p(T)$ na Eq. (2.26), ou seja,

$$A_g T + B_g \frac{T^2}{2} + C_g \frac{T^3}{3} + D_g \frac{T^4}{4} \Big|_{25^{\circ}C}^{T_g} + A_{Ar} T + B_{Ar} \frac{T^2}{2} + C_{Ar} \frac{T^3}{3} + D_{Ar} \frac{T^4}{4} \Big|_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} + \Delta H_{reação}^o = A_{Fu} T + B_{Fu} \frac{T^2}{2} + C_{Fu} \frac{T^3}{3} + D_{Fu} \frac{T^4}{4} \Big|_{25^{\circ}C}^{T_{Fu}} + Q_c \quad (2.28)$$

onde os índices de A , B , C , D de cada polinômio são calculados de acordo com a Eq. (2.18) e representam o somatório dos elementos que compõem o gás, o ar e as fumaças como já descrito anteriormente.

Conhecida a temperatura dos gases (T_g), a temperatura das fumaças a entalpia padrão de reação ($\Delta H^{\circ}_{reação}$) por meio da Eq.(2.19) e usando determinar o calor perdido no processo de combustão (Q_c), resta resolver determinar a temperatura das fumaças (T_{Fu}). Assim, reescrevendo a Eq.(2.28),

$$F(T) = A_g T + B_g \frac{T^2}{2} + C_g \frac{T^3}{3} + D_g \frac{T^4}{4} \Bigg|_{25^{\circ}C}^{T_g} + A_{Ar} T + B_{Ar} \frac{T^2}{2} + C_{Ar} \frac{T^3}{3} + D_{Ar} T^4 \Bigg|_{25^{\circ}C}^T + \Delta H^{\circ}_{reação} - \left(A_{Fu} T + B_{Fu} \frac{T^2}{2} + C_{Fu} \frac{T^3}{3} + D_{Fu} \frac{T^4}{4} \right) \Bigg|_{25^{\circ}C}^T - Q_c$$

Figura

model
combu
troca c
entalpi

Para a solução da Eq.(2.29) utilizou-se o método de Newton-Raphson. O método de Newton-Raphson é considerado um dos processos mais eficientes para a determinação do zero da função ($F(T) = 0$) que será equivalente a calcular a raiz da Eq.(2.29). O método de Newton-Raphson é considerado um dos processos mais eficientes para o cálculo de raízes de equações. Suas principais características são suas propriedades de convergência e simplicidade de aplicação. A Fig. (2.9) apresenta o algoritmo de Newton-Raphson.

onde
combu

Conh
equaç
no pi
possi

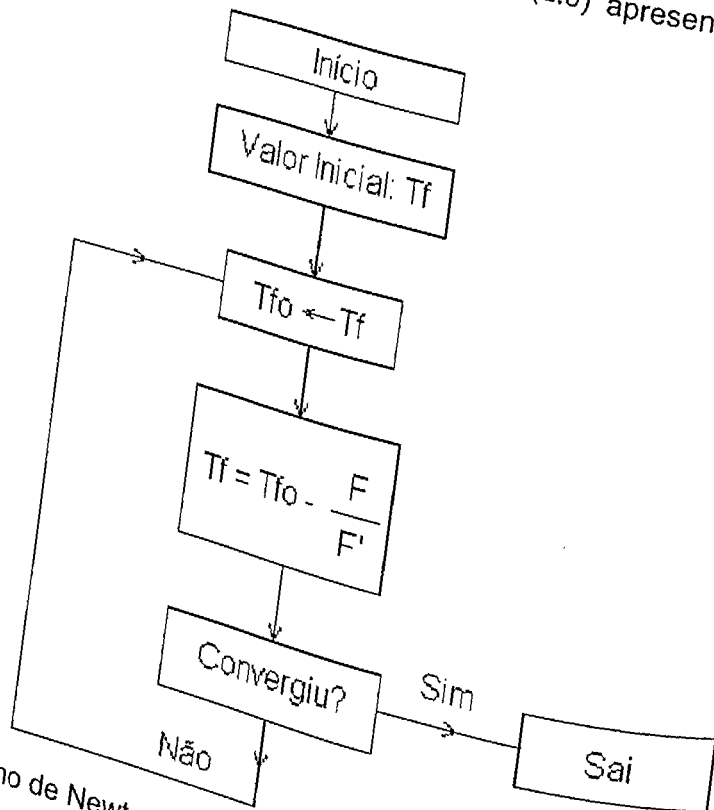


Figura 2.9 – Algoritmo de Newton-Raphson

Pode-se verificar a partir dos fundamentos apresentados, que o software "SIMCO – RB2" necessita do ajuste de três variáveis: o rendimento do forno, o rendimento do recuperador de calor e o rendimento do processo de combustão. Propõe-se o ajuste destas variáveis através da aquisição dos parâmetros de combustão, das temperaturas na tira de aço (por meio de pirômetros) e no interior do forno (termopares calibrados). Assim, conhecidos e definidos o rendimento do forno, o rendimento do recuperador e o rendimento do processo de combustão, pode-se simular as condições internas do forno e determinar a distribuição da temperatura na tira de aço.

Uma vez calculada a temperatura das fumaças, resta o cálculo da temperatura adiabática de chama.

2.5 - Cálculo da Temperatura Adiabática de Chama

A temperatura adiabática de chama é definida como a temperatura no interior de um processo quando a reação transcorre sob condições de ausência de troca de calor entre o frasco reacional e o exterior; e de outros fatores, como efeitos elétricos, trabalho, ionização e formação de radicais livres. Neste sentido, para calcular a temperatura da reação adiabática, supõe-se novamente que toda energia liberada pela reação na temperatura de referência além daquela trazida pela corrente afluyente (em relação à mesma temperatura básica) seja disponível para aumentar a temperatura dos produtos. Pela mesma hipótese, os produtos são descarregados na temperatura da reação e assim, conhecendo a temperatura dos produtos, identifica-se automaticamente a temperatura da reação. A Fig. (2.10) apresenta o modelo de combustão usado para a simulação da temperatura adiabática de chama.

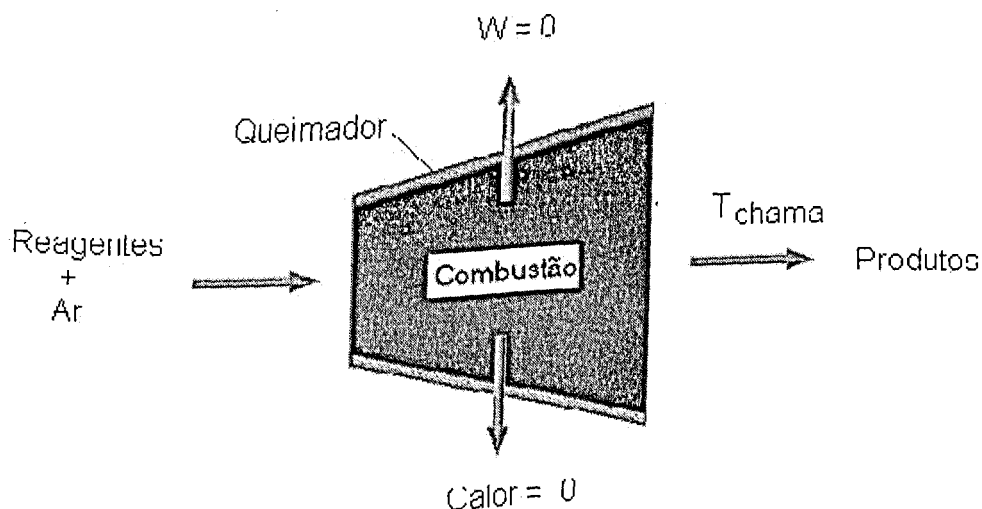


Figura 2.10 – Modelo de combustão usado para a simulação da temperatura adiabática de chama

Portanto, para o cálculo da temperatura adiabática de chama (T_{chama}), o modelo de combustão desconsidera o calor perdido nas paredes do queimador e qualquer trabalho (W) realizado no processo de combustão como proposto por Himmelblau (1982), ou seja,

$$\int_{25^{\circ}C}^{Tg} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{TAr} C_p(T) dT + \Delta H_{reação}^{\circ} = \int_{25^{\circ}C}^{Tchama} C_p(T) dT \quad (2.30)$$

Para a determinação da temperatura adiabática de chama, aplica-se o mesmo procedimento usado na solução da Eq. (2.29).

2.6 - Cálculo da Vazão Mássica das Fumaças

A partir do balanço total estequiométrico (**e.g.**, Tab.(2.8)), pode-se determinar a vazão mássica total das fumaças (Eq. 2.31).

$$\dot{m}_T = \sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{ de moles } (i) \times PM(i) \quad (2.31)$$

onde n representa o número de elementos que compõem as fumaças, $N^{\circ} \text{ de moles}$ o número de moles dos elementos e PM o peso molecular dos elementos definido na Tab. (2.2).

2.7 - Cálculo da Vazão Volumétrica das Fumaças

A vazão volumétrica das fumaças pode ser calculada a partir da Eq. (2.32).

$$\dot{V}_T = \sum_{i=1}^n \frac{PM(i)}{\rho(i)} \quad (2.32)$$

onde o peso molecular (PM) dos elementos é definido na Tab.(2.2) e a densidade dos gases (ρ) é calculada a partir da Eq. (2.11).

Apresenta-se, a seguir, o modelo térmico da tira de aço silício e o algoritmo de otimização usado na solução inversa.

2.8 - O Problema Direto: Formulação Numérica para a Distribuição de Temperatura na Tira de Aço

Na Figura (2.11) apresenta-se um esquema do problema térmico aplicado à tira de aço silício,

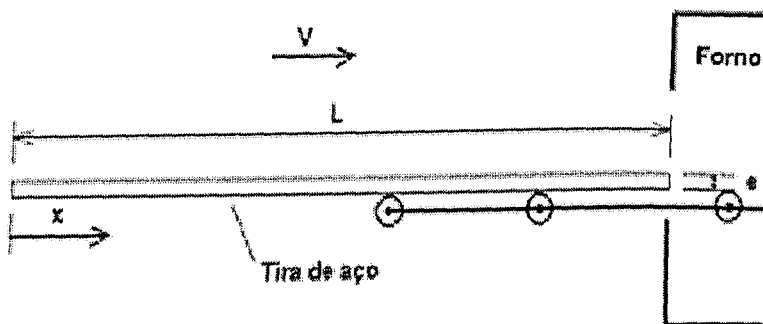


Figura 2.11 – Modelo usado para o problema térmico aplicado à tira de aço

onde L representa o comprimento da tira de aço, e e e V a sua espessura e velocidade, respectivamente.

Observa-se na Figura (2.11) que a tira apresenta uma espessura muito menor que o comprimento. Nesse caso, assume-se que a difusão do calor ocorre somente na direção do comprimento da tira, desprezando-se as variações de temperatura nas outras direções. Ressalta-se que a tira possui um comprimento superior a 80 m e uma espessura inferior a 3 mm.

O modelo térmico é então obtido pela solução numérica da equação da difusão unidimensional transiente descrita por

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{Qu''(\varepsilon,t)}{k(T) \times e} - \frac{h_{forno} A (T(x,t) - T_{\infty})}{k(T) \times e} = \frac{1}{\alpha(T)} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.33)$$

submetido às condições de contorno

$$k(T) \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h_{x=0} (T(0,t) - T_{ambiente}) \quad \text{para } x=0 \quad (2.34)$$

$$k(T) \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{para } x = L \quad (2.35)$$

e à condição inicial

$$T(x, 0) = T_0$$

onde $\varepsilon = V * t$ representa a posição do fluxo de calor em função da velocidade da tira e do tempo de simulação, $Qu''(\varepsilon, t)$ representa o fluxo de calor útil recebido pela tira por radiação, h_{forno} representa o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a tira e as fumaças no interior de cada zona do forno e $k(T)$ e $\alpha(T)$ representam, respectivamente, a condutividade e a difusividade térmica em função da temperatura da tira.

Obtém-se a solução das Eqs. (2.33) – (2.35) através do método de diferenças finitas (Maliska, 1995). Ressalta-se, entretanto, que a solução do problema direto só é possível a partir do conhecimento do fluxo de calor útil recebido pela tira por radiação ($Qu''(\varepsilon, t)$). Esse calor por sua vez é estimado por meio de um procedimento de otimização, denominado problema inverso que por sua vez é descrito a seguir.

2.9 - Problema Inverso: Determinação do Fluxo de Calor Útil (Qu) Usando a Técnica de Otimização Seção Áurea (Golden Section)

O que são problemas inversos? Esta é uma pergunta clássica e a resposta poder ser simples: um problema inverso determina as causas desconhecidas baseando-se na observação de seus efeitos. Os problemas inversos em condução de calor podem ser considerados como uma classe especial dentro das técnicas de problemas inversos. As características principais destes problemas são: usar temperaturas medidas experimentalmente, modelar o problema térmico baseando-se na equação de difusão de calor e ter como objetivo a estimação de algum parâmetro térmico, como por exemplo, a obtenção do fluxo de calor superficial. Observando estas características, verifica-se que o problema envolvendo o forno RB2 se enquadra perfeitamente nesta classe de problema, isto é, deseja-se conhecer a distribuição da temperatura na tira de aço cuja obtenção por medição direta é complicada. Entretanto, pode-se usar a informação de temperaturas medidas em regiões acessíveis para se estimar o fluxo de calor útil aplicado à tira de aço e a partir dele calcular a temperatura em qualquer ponto desejado. Esta é, de fato, a proposta principal deste trabalho, ou seja, aplicar as técnicas inversas de condução de calor para a obtenção do fluxo de calor útil para o aquecimento da tira de aço a partir do calor fornecido pelo processo de combustão.

Assim, apresenta-se a seguir o procedimento de determinação do fluxo de calor útil (Q_u).

Inicialmente, propõe-se o cálculo do calor total gerado por combustão no forno RB2 (Eq. 2.36).

$$q_T = \sum_{i=0}^N q_i \quad (2.36)$$

onde q_T é o calor total gerado pelo forno, q_i é o calor de combustão em cada zona do forno apresentado pelas Eqs. (2.37) a (2.43) e N é o número de zonas do forno.

$$\text{Zona 6: } q_6 = Qg_6 + QAr_6 + Qo_6 \quad (2.37)$$

$$\text{Zona 5: } q_5 = Qg_5 + QAr_5 + Qo_5 + QFu_6 \quad (2.38)$$

$$\text{Zona 4: } q_4 = Qg_4 + QAr_4 + Qo_4 + QFu_5 \quad (2.39)$$

$$\text{Zona 3: } q_3 = Qg_3 + QAr_3 + Qo_3 + QFu_4 \quad (2.40)$$

$$\text{Zona 2: } q_2 = Qg_2 + QAr_2 + Qo_2 + QFu_3 \quad (2.41)$$

$$\text{Zona 1: } q_1 = Qg_1 + QAr_1 + Qo_1 + QFu_2 \quad (2.42)$$

$$\text{Pré-aquecimento: } q_0 = QFu_1 \quad (2.43)$$

Conhecendo-se o calor entregue a cada zona e o calor total gerado no processo de combustão, pode-se determinar o percentual de calor fornecido a cada zona como,

$$qp_i = \frac{q_i}{q_T} \quad \text{para } i = 0, \dots, N; \quad (2.44)$$

Logo, tem-se como variáveis de entrada: i) o valor máximo de calor fornecido ao forno dado por q_T ; ii) o valor mínimo do fluxo de calor, 0.0 (zero), o que representa a ausência de combustão; iii) a distribuição do fluxo de calor no interior do forno (qp_i) e iv) as temperaturas medidas por dois pirômetros posicionados no forno RB2.

Adota-se assim, a seguinte função objetivo a ser minimizada.

$$F = \sum_{i=0}^{np} (Y(x)_i - T(x)_i)^2 \quad (2.45)$$

onde n_p representa o número de pirômetros, Y representa a temperatura medida pelos pirômetros e T a temperatura calculada através do modelo.

Para a minimização deste funcional, representado por uma função erro quadrática, optou-se pela técnica de otimização da Seção Áurea (Vanderplaats et al., 1984). Os principais fatores que influenciaram esta escolha foram: a necessidade de um processo iterativo para a diminuição de um intervalo de incerteza a partir da minimização de um funcional e a baixa complexidade para a implementação computacional.

Basicamente a técnica de otimização Seção Áurea é um processo iterativo em que o comprimento de incerteza vai reduzindo a aproximadamente a 62% do comprimento da iteração anterior, até que se encontre o menor valor da função objetivo (Eq. 2.45). A Fig. (2.12) apresenta um esquema do intervalo de busca e o menor valor encontrado para F .

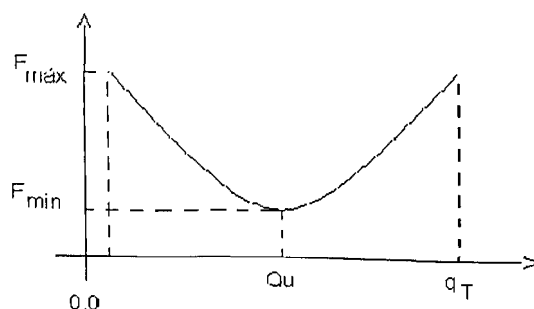


Figura 2.12 – Gráfico apresentando o menor valor da função objetivo

A técnica da Seção Áurea é descrita em detalhes no Anexo I enquanto o algoritmo para a simulação do forno RB2 é apresentado a seguir.

CAPITULO III

SIMCO - RB2 – Software para Simulação e Controle do Forno RB2

3.1 – Introdução

O software SIMCO - RB2 apresenta uma solução para o problema térmico apresentado no Capítulo II, cujo objetivo é o desenvolvimento de um modelo matemático que permita a simulação das condições reais de recozimento no interior do forno RB2 e assim, prever a temperatura da tira considerando as variáveis do processo. As equações que descrevem o fenômeno físico são tratadas numericamente através da técnica de diferenças finitas (Maliska et al., 1995). Por meio deste programa, o usuário poderá definir os parâmetros de combustão, permitindo a avaliação e a otimização do aquecimento da tira. Para tanto, o software considera o tipo de aço, a velocidade da linha, as dimensões da tira, os gases envolvidos no processo de combustão, os comburentes e o excesso ou a escassez de ar.

A partir desses parâmetros de entrada, o modelo matemático fornece o perfil da temperatura de aquecimento da tira, a composição das fumaças, a vazão do ar estequiométrico, a vazão de fumaça, as temperaturas de chamas, a temperatura de "set-point" de cada zona do forno, o consumo específico do forno, o consumo térmico de cada zona e o rendimento do recuperador de calor.

O programa deve ser usado em duas etapas. A primeira representa o processo de calibração do software, ou seja, o programa precisa conhecer as condições de operação, a temperatura da tira de aço em duas posições distintas e a temperatura no interior de cada zona do forno, para assim ajustar o rendimento do forno, o rendimento do recuperador e o rendimento do processo de combustão. O objetivo desta etapa é a determinação das variáveis de difícil acesso definidas por: i) calor perdido no processo de combustão (Q_c); ii) calor perdido nos queimadores do forno (Q_f) e iii) calor perdido no recuperador de calor (Q_r). Estas variáveis são consideradas de difícil acesso porque dependem das propriedades térmicas de todos os materiais usados na construção do forno e do recuperador e da forma como esses materiais estão dispostos e unidos (resistência térmica de contato). Nos queimadores, por exemplo, deve-se conhecer suas dimensões, quantidade em cada zona e suas propriedades térmicas, além das dimensões e propriedades térmicas dos materiais que entram em contato direto com a superfície externa de cada queimador. Cita-se também outros problemas térmicos mais

complexos que levam a equações empíricas, como por exemplo a troca de calor com o ambiente por convecção e radiação. Uma vez que as perdas de calor através das paredes do forno, recuperador e queimador são difíceis de modelar, propõe-se neste trabalho o cálculo do rendimento térmico de cada processo. Estes rendimentos serão determinados a partir de condições de operação medidas no forno o que torna o modelo matemático mais próximo do processo físico real. Espera-se que, independente de modificações nas condições de operação do forno, a taxa de absorção térmica desses equipamentos se mantenha constante, o que significa dizer que o rendimento de cada processo será constante.

A segunda etapa consiste em se utilizar o programa para a simulação das condições definidas pelo usuário, ou seja, a partir da calibração do programa, este se torna apto a simular o processo de combustão e o recozimento da tira. Indica-se a calibração do programa devido a problemas que podem ocorrer no processo físico real, como as perdas de eficiência dos queimadores e do forno e conseqüentemente a diminuição do rendimento destes. Portanto, recomenda-se calibrar o programa uma vez por mês para assim aproximá-lo do processo físico real. O procedimento de calibração do software pode ainda ser útil para o setor de manutenção preditiva do forno, pois a cada calibração, pode-se verificar se o forno ainda continua operando com as mesmas características anteriormente obtidas pelo software. Assim, caso seja constatado uma diminuição do rendimento de algum setor do forno, pode-se agendar a manutenção deste. Este procedimento diminui os custos com possíveis paradas não programadas do forno.

Ressalta-se que o programa se limita essencialmente ao forno RB2, pois as dimensões do forno, número de zonas, número de queimadores e posição dos pirômetros (sensores de temperatura) são valores pré-definidos no código computacional desenvolvido neste trabalho. Alterações nessas variáveis, sem uma prévia análise, pode levar a uma falha nos resultados apresentados pelo software.

A interface gráfica do programa, o código computacional e a modelagem numérica foram desenvolvidos no laboratório de transferência de calor e massa e dinâmica dos fluídos, (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), sobre a plataforma do C++ Builder™.

Neste capítulo serão apresentados o algoritmo computacional para a simulação do processo de combustão e o algoritmo para a simulação do aquecimento da tira de aço. Além disso, será demonstrado o procedimento de uso do software SIMCO - RB2.

3.2 – O Algoritmo para a Simulação do Processo de Combustão

O processo de combustão envolve a solução do seguinte sistema:

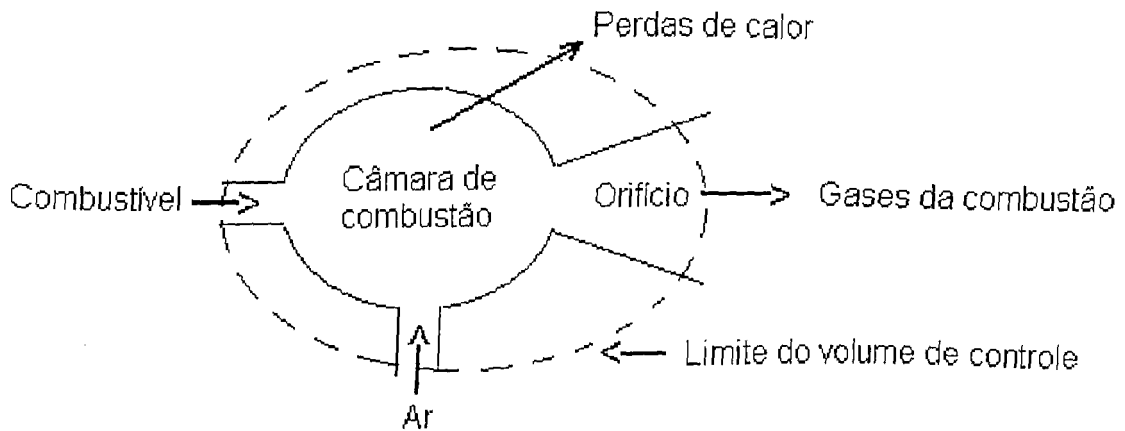


Figura 3.1 – Fluxograma para combustão.

Apresenta-se na Figura (3.1) o processo de combustão para um queimador do forno. Ressalta-se que o software deve simular todos os parâmetros de entrada e saída do sistema. Nesse sentido, desenvolveu-se o algoritmo apresentado pela Fig. (3.2).

Verifica-se no fluxograma, Fig. (3.2), que o usuário inicialmente deve fornecer os parâmetros medidos no forno que são: i) a composição, vazão, pressão e temperatura dos componentes da combustão (ar, GLP, GAF, GM); ii) a pressão no interior do forno; iii) a temperatura das fumaças antes e após o recuperador. Caso o usuário esteja calculando o rendimento do processo de combustão é necessário ainda fornecer a temperatura no interior de cada zona do forno.

A partir dos parâmetros de entrada o programa inicia o cálculo do processo de combustão nos pilotos e queimadores. Portanto, como demonstrado no fluxograma, inicialmente é determinada a vazão de ar estequiométrica nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), ou seja, pressão atmosférica e temperatura igual a 273 K. Essa vazão é comparada à vazão de ar fornecida ao queimador, o que indica se este está operando com excesso ou escassez de ar. Por meio deste cálculo, os resultados obtidos pelo programa com excesso ou escassez de ar. Por meio deste cálculo, os resultados obtidos pelo programa SIMCO - RB2 podem ser comparados aos resultados monitorados no forno que têm como base as CNTP.

Em seguida, o programa determina a vazão de ar estequiométrica nas condições de processo, ou seja, temperatura e pressão medidas no forno, obtendo-se assim o valor real da vazão estequiométrica de ar. Nesta etapa também é calculada a entalpia padrão de reação, Eq. (2.19).

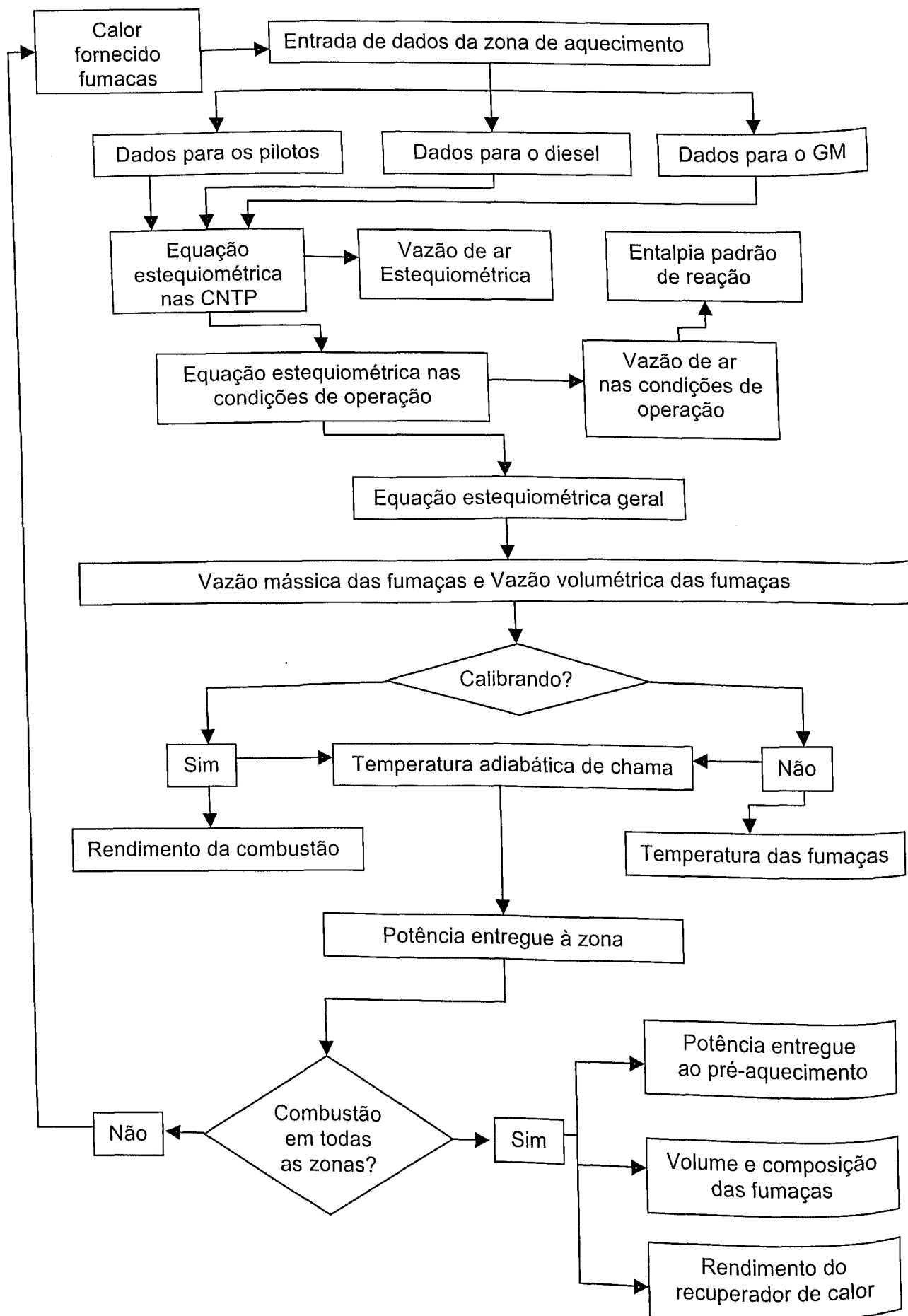


Figura 3.2 – Fluxograma apresentando o algoritmo do processo de combustão.

Assim, conhecendo-se as condições reais nas quais ocorre a combustão, realiza-se o cálculo estequiométrico geral prevendo o excesso ou escassez de ar. Ressalta-se que este cálculo é realizado a partir do percentual volumétrico dos elementos, Tab. (2.1), que por meio da densidade, Eq. (2.11), e peso molecular, Tab. (2.2), fornecem o balanço de massa que será usado para a determinação da vazão mássica, Eq. (2.31) e da vazão volumétrica das fumaças, Eq. (2.32).

Na seqüência, o usuário deve definir se está calibrando ou simulando o processo de combustão. Estas são as duas etapas principais desse algoritmo, pois a exatidão dos cálculos no processo de simulação está diretamente relacionada à qualidade da calibração do processo de combustão. Nesse sentido, para a calibração do software recomenda-se a medição da temperatura no interior de cada zona do forno por meio de termopares calibrados.

Retornando ao fluxograma, caso o usuário esteja calibrando o software, inicialmente será calculado o rendimento do processo de combustão, Eq. (2.27), e em seguida será determinada a temperatura adiabática de chama, Eq. (2.30). Se o usuário optar pela simulação do processo de combustão, deve-se previamente conhecer o rendimento deste processo, pois assim é possível efetuar o cálculo da temperatura das fumaças, Eq. (2.28), e em seguida determinar a temperatura adiabática de chama. Verifica-se no fluxograma que a partir dos cálculos anteriores o algoritmo tem toda informação necessária para a determinação da potência entregue a zona.

Na seqüência, o algoritmo verifica se todas as zonas do forno foram simuladas, caso não tenham sido, o calor presente nas fumaças da zona anterior é fornecido a zona seguinte, até que se atinja a zona de pré-aquecimento quando então se determina a potência entregue ao pré-aquecimento, Eq. (2.43), o volume, Eq. (2.32), e composição das fumaças e o rendimento do recuperador de calor Eq. (2.23).

Portanto, a partir da potência entregue a cada zona do forno, o programa estará apto para a otimização e simulação do processo de aquecimento da tira de aço. Esse procedimento é apresentado a seguir.

3.3 – O Algoritmo para a Determinação do Rendimento do Forno – Problema Inverso

Para a simulação do recozimento, deve-se conhecer o rendimento do forno que, por sua vez, pode ser obtido através do uso de técnicas de problemas inversos em condução de calor. Neste caso, medindo-se a temperatura em regiões acessíveis da tira e conhecendo-se o calor máximo no interior de cada zona (algoritmo anterior), tem-se a informação necessária para a obtenção do calor útil à tira. Propõe-se nesse caso a aplicação da técnica de otimização Seção

Áurea (Vanderplaats et al., 1984) para a obtenção da distribuição do calor útil à tira ao longo do processo de recozimento. Para tanto, usou-se o seguinte procedimento.

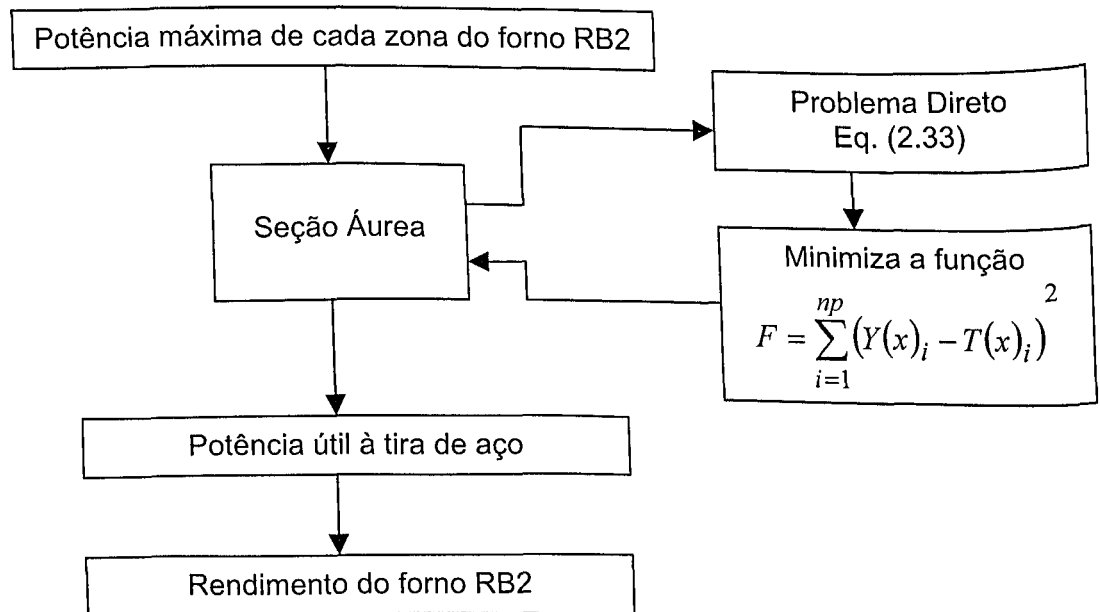


Figura 3.3 – Fluxograma apresentando o algoritmo de otimização do processo de recozimento.

Verifica-se no fluxograma que a partir do fluxo de calor total calculado no processo de combustão, a técnica de otimização Seção Áurea, realiza uma redução no intervalo de incerteza por meio da minimização da função objetivo definida pela Eq. (2.45). Este procedimento leva à determinação do fluxo de calor útil à tira de aço (Q_u) e consequentemente a obtenção do rendimento do forno RB2. Como mencionado, uma descrição detalhada do método da Seção Áurea é apresentada no Anexo I.

3.4 – O Algoritmo para a Simulação do Processo de Recozimento – Problema Direto

Para a simulação do recozimento, deve-se conhecer o calor útil fornecido à tira de aço. Nesse sentido, a partir de um rendimento pré-definido para o forno e da potência máxima fornecida a cada zona, o software é capaz de simular a potência útil e assim, a partir do modelo térmico de transferência de calor (problema direto), identificar o campo de temperatura ao longo da tira. A Fig. (3.4) apresenta o algoritmo:

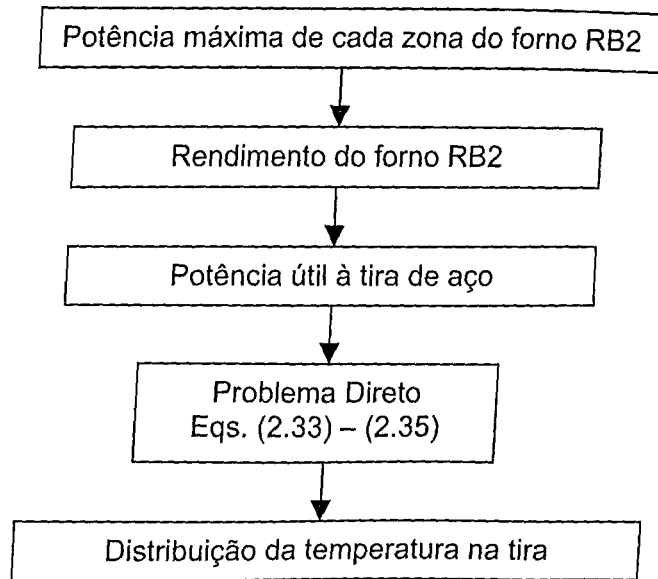


Figura 3.4 – Fluxograma apresentando o algoritmo de cálculo da temperatura na tira.

3.5 – Funcionamento do Programa

3.5.1 - Configuração Mínima

O programa SIMCO - RB2 foi desenvolvido através do C++Builder™ 5 para o sistema operacional Microsoft Windows™. Como configuração mínima para o processador recomenda-se um PC de 500MHz e 64Mb de memória RAM. Na Fig. (3.5) apresenta-se a janela que fornece ao usuário algumas informações sobre o programa. Nessa janela, podem ser verificadas informações sobre a configuração, autores e endereço eletrônico para correspondência.

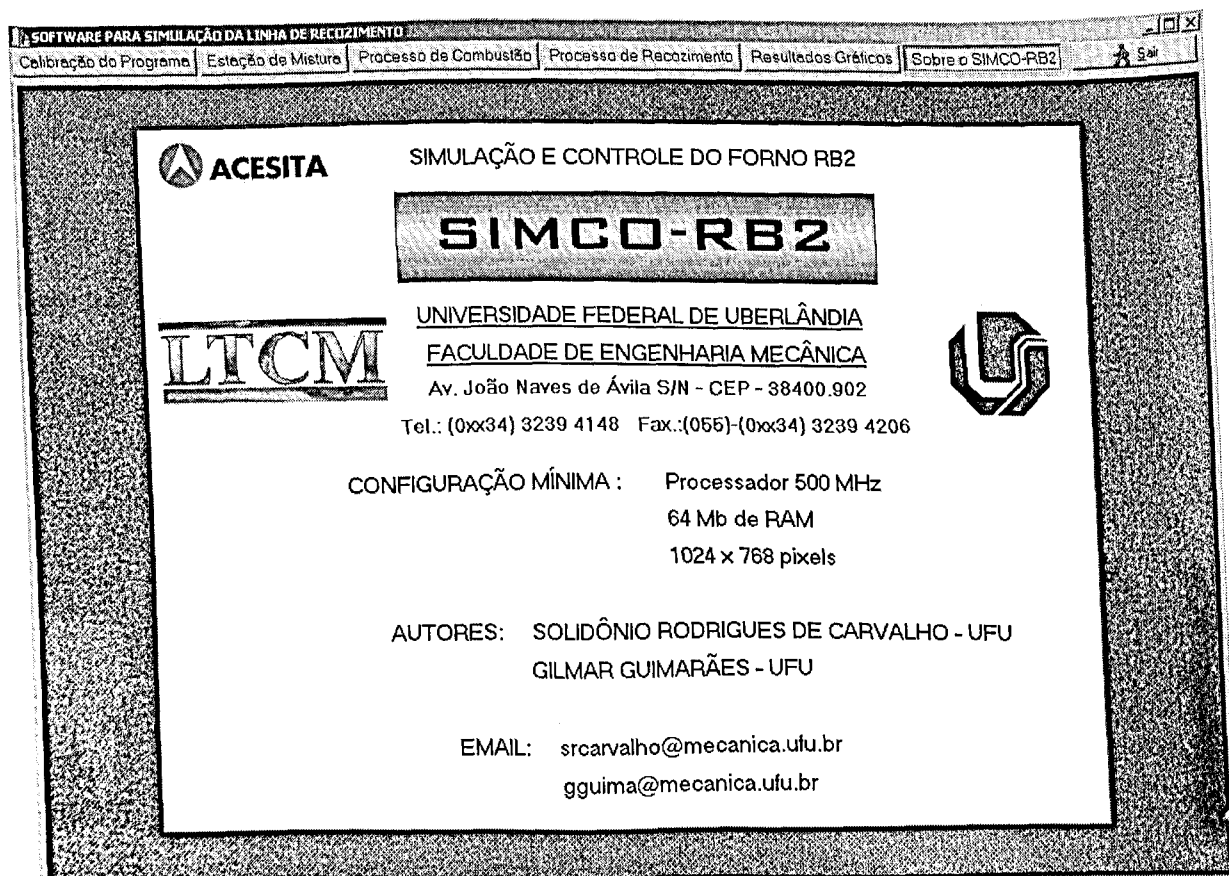


Figura 3.5 – Janela de informações gerais sobre o programa SIMCO – RB2.

3.5.2 - Como Usar o Software

Na execução do programa, é mostrada ao usuário a janela de apresentação, Fig. (3.5). Na barra superior desta janela, verifica-se o menu do programa, onde estão disponíveis as opções: i) Calibração do programa; ii) Estação de mistura; iii) Processo de combustão; iv) Processo de recozimento; v) Resultados gráficos; vi) Sobre o SIMCO –RB2.

Como já mencionado, o programa inicialmente precisa ser calibrado, o que por sua vez, pode ser realizado na tela "Calibração do programa", Fig. (3.6).

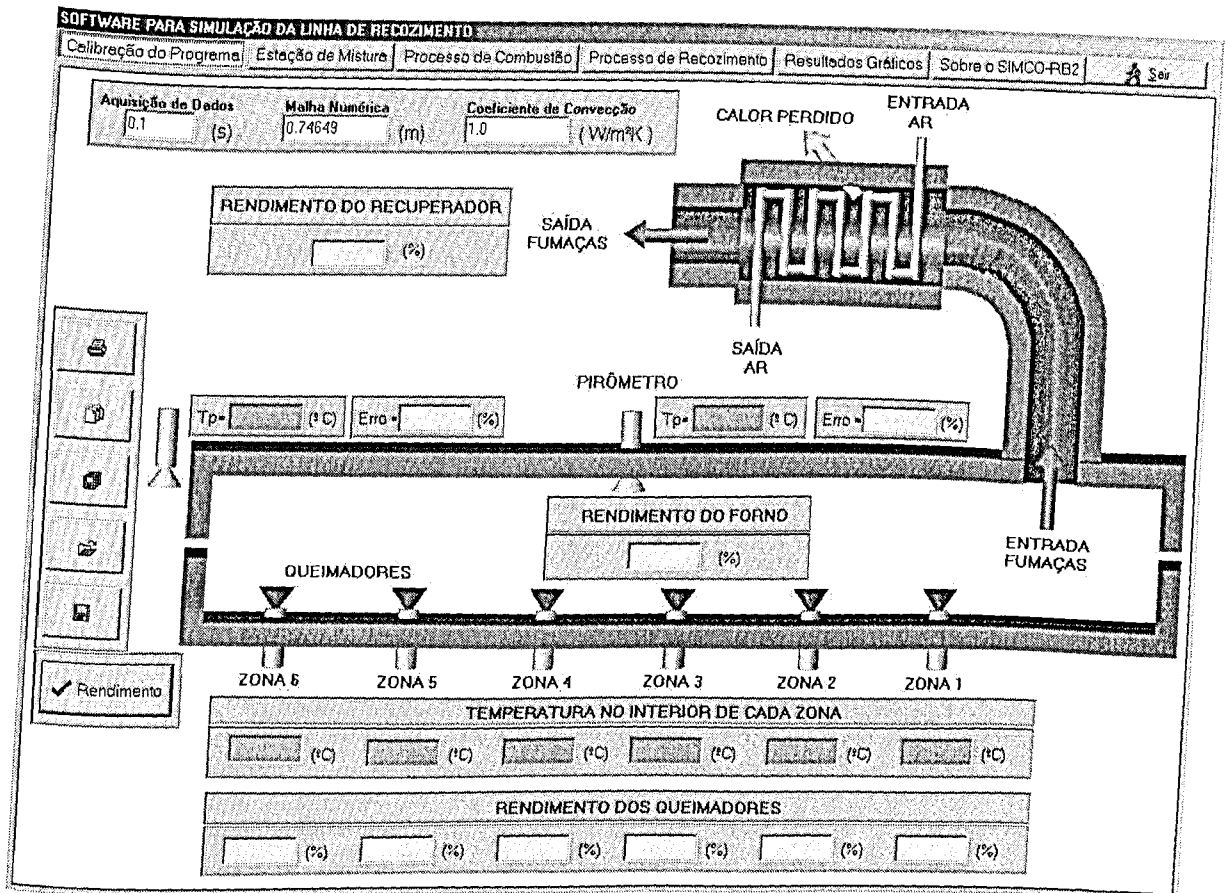


Figura 3.6 – Janela de “Calibração do Programa”.

Nesta janela é possível visualizar-se os equipamentos a serem calibrados. Entre eles, citam-se os queimadores e o forno. Ressalta-se que somente os parâmetros de temperatura podem ser alterados. Após acionar-se a opção “Rendimento” o programa efetua o cálculo do rendimento do recuperador, do processo de recozimento e do processo de combustão, preenchendo as suas respectivas caixas.

Como resultado da calibração (acionar a opção “Rendimento”) é também apresentado o erro relativo entre as temperaturas medidas pelos pirômetros ($T_{pirômetro}$) e a temperatura calculada pelo modelo térmico (T_{modelo}). Este erro é definido por:

$$Erro = 100 \times \left(\frac{T_{pirômetro} - T_{modelo}}{T_{pirômetro}} \right) \quad (3.1)$$

Por meio desta análise de erro, pode-se determinar o quanto o modelo numérico está se afastando ou aproximando do modelo térmico real.

Verificam-se no lado esquerdo da tela as seguintes opções (de baixo para cima): i) Rendimento: esta opção realiza o cálculo direto dos rendimentos, entretanto, todos os

parâmetros acima descritos devem ser preenchidos; ii) Salvar: abre um caixa pedindo o nome do arquivo no qual serão salvas as modificações da tela “Calibração do programa”; iii) Abrir: abre o arquivo salvo na opção anterior; iv) Salvar todos: abre uma caixa pedindo o nome do arquivo no qual serão salvas todas as modificações executadas no programa; v) Abrir todos: abre o arquivo contendo as informações salvas no item “Salvar todos”; vi) Imprimir: imprime a tela “Calibração do programa”.

Ressalta-se que quando o programa é fechado, todas as informações fornecidas são perdidas. Portanto, caso o usuário queira usar estas informações no futuro, recomenda-se salvá-las antes de fechar o programa. Assim, na próxima vez que o programa for executado, basta restaurar os dados a partir das opções “Abrir” ou “Abrir todos”.

Verifica-se na Figura (3.6) que para a calibração do software, devem ser fornecidas as temperaturas medidas na tira (T_p) e a temperatura no interior de cada zona do forno. Entretanto, para que o processo de calibração ou simulação possa ser executado, outros parâmetros também são necessários. A janela “Estação de mistura”, Fig. (3.7), apresentam alguns desses parâmetros.

SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO DA LINHA DE RECOZIMENTO

Calibração do Programa | Estação de Mistura | Processo de Combustão | Processo de Recozimento | Resultados Gráficos | Sobre o SIMCO-RB2 | Air

TEMPERATURA DO DIESEL: TDIESEL = [] (°C)

TEMPERATURA DO GLP: TGLP = [] (°C)

TEMPERATURA DO GAF: TGAF = [] (°C)

TEMPERATURA DO AR ANTES E APÓS O RECUPERADOR

PAR = [] (mmH2O)

TARantes = [] (°C)

TARapós = [] (°C)

Vazão total de AR = [] (Nm³) | Seleção AR/GM []

Vazão total de GM = [] (Nm³)

Zona 6: AR [] (m³/h), GM [] (m³/h), DIESEL [] (m³/h)

Zona 5: AR [] (m³/h), GM [] (m³/h), DIESEL [] (m³/h)

Zona 4: AR [] (m³/h), GM [] (m³/h), DIESEL [] (m³/h)

Zona 3: AR [] (m³/h), GM [] (m³/h), DIESEL [] (m³/h)

Zona 2: AR [] (m³/h), GM [] (m³/h), DIESEL [] (m³/h)

Zona 1: AR [] (m³/h), GM [] (m³/h), DIESEL [] (m³/h)

Pilotos Zona 6: AR [] (m³/h), GLP [] (m³/h)

Pilotos Zona 5: AR [] (m³/h), GLP [] (m³/h)

Pilotos Zona 4: AR [] (m³/h), GLP [] (m³/h)

Pilotos Zona 3: AR [] (m³/h), GLP [] (m³/h)

Pilotos Zona 2: AR [] (m³/h), GLP [] (m³/h)

Pilotos Zona 1: AR [] (m³/h), GLP [] (m³/h)

Temp. Inicial da Tira [] (°C)

Velocidade da Tira [] (m/min)

Pressão no interior do Forno PFORNO = [] (mmH2O)

Espessura da Tira [] (mm)

Temp. das Fumaças Antes e Após o Recuperador [] (°C) [] (°C)

Figura 3.7 – Janela “Estação de Mistura”.

Nesta janela devem-se inserir os demais parâmetros monitorados no forno, ou seja, devem ser fornecidas: as propriedades do ar, a vazão de gás misto (GM) em cada zona, as vazões e a temperatura do diesel e as vazões e a temperatura do GLP, a temperatura inicial da tira (a temperatura das bobinas antes de entrarem no forno), a velocidade da tira, a pressão no interior do forno, a espessura da tira, a temperatura das fumaças antes e após o recuperador e a temperatura do GAF.

Observa-se que a medida que os campos contendo as vazões de GM e ar são preenchidos, o programa automaticamente calcula a vazão total de ar, a vazão total de GM e a relação ar/GM. Este último parâmetro é importante para a análise prévia do processo de combustão e a conseqüente previsão se a combustão dos gases é estequiométrica ou não, ou seja, se todo o gás fornecido foi queimado.

Verifica-se ainda na parte inferior desta janela, as opções: Salvar, Abrir e Imprimir tela.

Na seqüência apresenta-se o menu "Processo de combustão". Este menu é subdividido em outras duas opções: "Poder calorífico inferior" e "Combustão" e são apresentados nas Figs. (3.8) e (3.9).

SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO DA LINHA DE RECOZIMENTO

Calibração do Programa | Estação de Mistura | **Processo de Combustão** | Processo de Recozimento | Resultados Gráficos | Sobre o SIMCO-RB2 | Sair

Poder Calorífico Inferior | Combustão

Percentual Volumétrico dos Gases

Elementos	Combustíveis			Mistura
	GAF	GLP	DIESEL	GM
S	0.0	0.0	0.7	0.0
C	0.0	0.0	86.0	0.0
H2	3.5	0.0	13.3	3.29
CO	22.0	0.0	0.0	20.66
CH4	0.2	0.0	0.0	0.19
C2H6	0.0	0.03	0.0	0.0
C3H6	0.0	30.47	0.0	1.86
C3H8	0.0	14.34	0.0	0.87
C4H8	0.0	31.76	0.0	1.93
C4H10	0.0	23.33	0.0	1.42
C5H12	0.0	0.07	0.0	0.0
CO2	11.1	0.0	0.0	10.43
N2	59.2	0.0	0.0	55.60
H2O	4.0	0.0	0.0	3.76
TOTAL	100.0	100.0	100.0	100.0

MISTURADOR

RELAÇÃO DA MISTURA GAF+GLP

VAZÕES

GAF (m³/h)

GLP (m³/h)

RELAÇÃO

GAF X GLP (%)

Poder Calorífico Inferior dos Gases

Pci GAF	<input type="text"/>	Kcal/Nm³
Pci GLP	<input type="text"/>	Kcal/Nm³
Pci DIESEL	<input type="text"/>	Kcal/Nm³
Pci GM	<input type="text"/>	Kcal/Nm³

Figura 3.8 – Janela "Poder Calorífico Inferior".

No menu “Poder Calorífico Inferior”, o usuário deve fornecer o percentual volumétrico dos elementos que compõem cada combustível e a vazão de GAF e GLP que compõe o GM (gás misto). A partir do preenchimento desses campos o software automaticamente calcula e apresenta o poder calorífico de cada combustível. Observa-se que estes dados são apresentados com base nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

Na Figura (3.8) verifica-se que as composições do GAF, GLP, DIESEL E GM já estão pré-definidas, entretanto, o usuário pode modificá-las de acordo com o combustível que esteja sendo usado. Ressalta-se que a modificação destes parâmetros tem grande influência sobre o cálculo estequiométrico e balanço de massa, portanto caso algum parâmetro referente ao percentual volumétrico seja alterado, recomenda-se verificar se a composição volumétrica total do gás é igual a 100%. Na seqüência, pode-se visualizar novamente as opções salvar, abrir e imprimir.

Na tela “Combustão”, são apresentados os resultados do processo de combustão. Dentre estes, citam-se: i) a composição das fumaças; ii) a vazão volumétrica das fumaças; iii) a relação vazão de ar fornecido / vazão de ar estequiométrico; iv) a relação vazão de ar calculado / vazão de gás misto. A Fig. (3.9) mostra a janela “Combustão”.

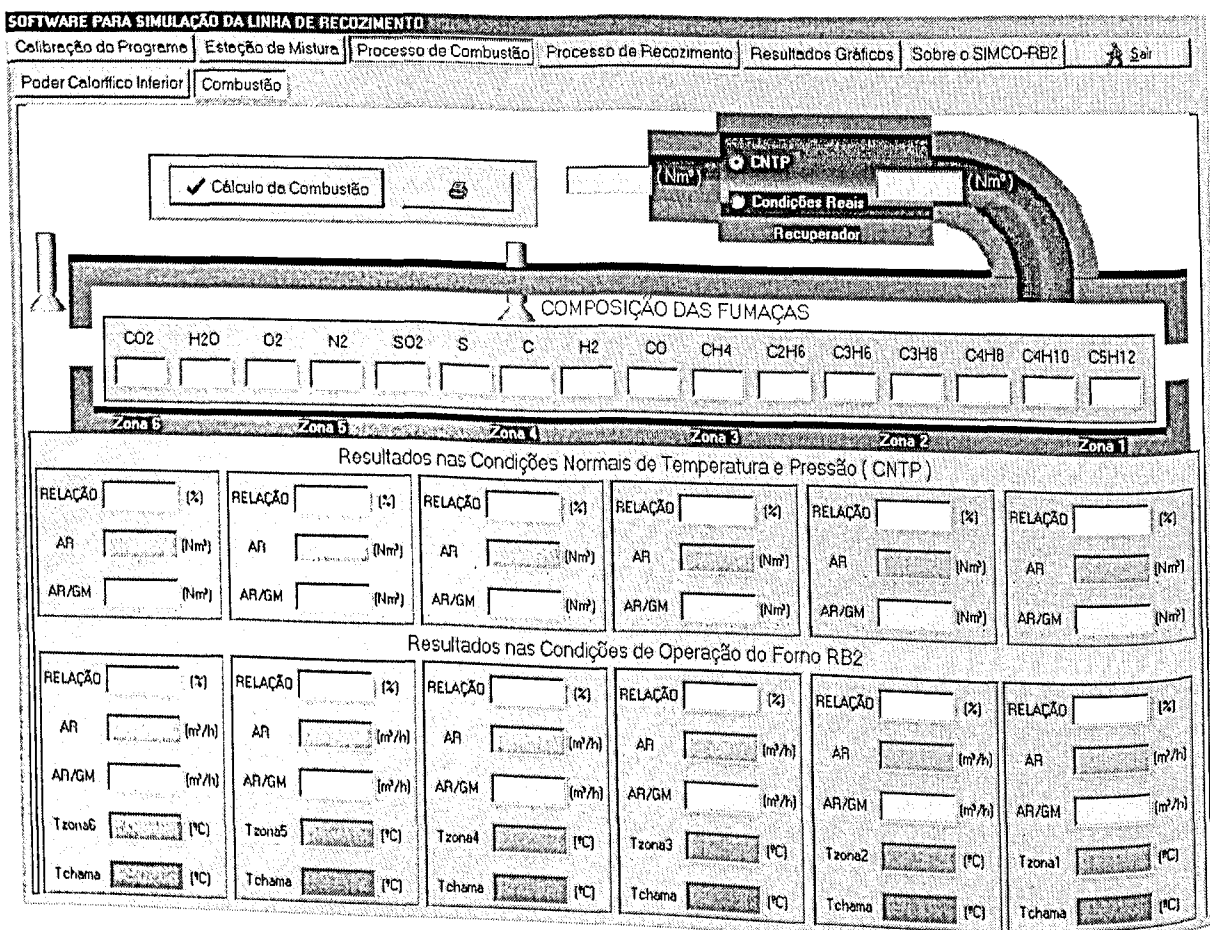


Figura 3.9 – Janela “Combustão”.

Verifica-se que estes resultados são apresentados nas CNTP e nas condições de operação do forno RB2. Adotou-se esta metodologia, pois o forno foi construído e dimensionado de forma que seus parâmetros estivessem nas CNTP, sendo esta uma referência para os resultados obtidos a partir do software SIMCO – RB2. Entretanto, é indispensável uma análise do processo real, para tanto, os resultados são apresentados nas condições de processo.

Verificam-se nesta janela a temperatura adiabática de chama e a temperatura no interior de cada zona, além disso, as relações reais referentes à vazão de ar e combustível.

Após o fim do processo de cálculo o programa fornece os resultados estimados sob a forma de arquivos de dados e sob a forma de gráficos. As opções de resultados gráficos são: Temperatura na tira/tempo, temperatura na tira/comprimento da tira e a potência de cada zona/comprimento do forno. Os arquivos de dados podem ser gravados no local escolhido pelo usuário para posterior análise. Os nomes dos arquivos também podem e devem ser alterados pelo usuário para uma melhor documentação da calibração ou simulação.

Apresenta-se a seguir testes realizados a partir de dados experimentais medidos no forno RB2, possibilitando assim uma melhor compreensão dos resultados gráficos e dos arquivos de dados fornecidos pelo software SIMCO – RB2.

Vertical text on the left side of the page, possibly bleed-through from the reverse side. The text is extremely faint and illegible.

CAPITULO IV

Resultados Experimentais

4.1 – Introdução

Propõe-se neste capítulo o estudo de três testes experimentais e a conseqüente determinação do rendimento do forno, do recuperador de calor e do processo de combustão. Em cada teste, é realizada uma comparação entre os dados experimentais medidos no forno e os resultados estimados pelo programa SIMCO – RB2. Dentre os parâmetros analisados citam-se: i) o excesso ou escassez de ar na combustão; ii) a temperatura no interior de cada zona e iii) a temperatura da tira medida pelos pirômetros.

O principal objetivo deste capítulo é verificar se o rendimento dos processos se mantém constante em todos os testes realizados.

4.2 - Testes experimentais

Nos testes apresentados a seguir, modificam-se os parâmetros de operação do forno RB2 para a verificação de seus efeitos no cálculo dos rendimentos do recuperador de calor, do forno e do processo de combustão. Como proposto no Capítulo II, mudanças na combustão, velocidade e temperatura da tira não devem produzir efeitos significativos nesses rendimentos.

4.2.1 - Teste Experimental Nº 1

No primeiro teste coletaram-se os seguintes parâmetros no forno RB2 (Figura 4.1):

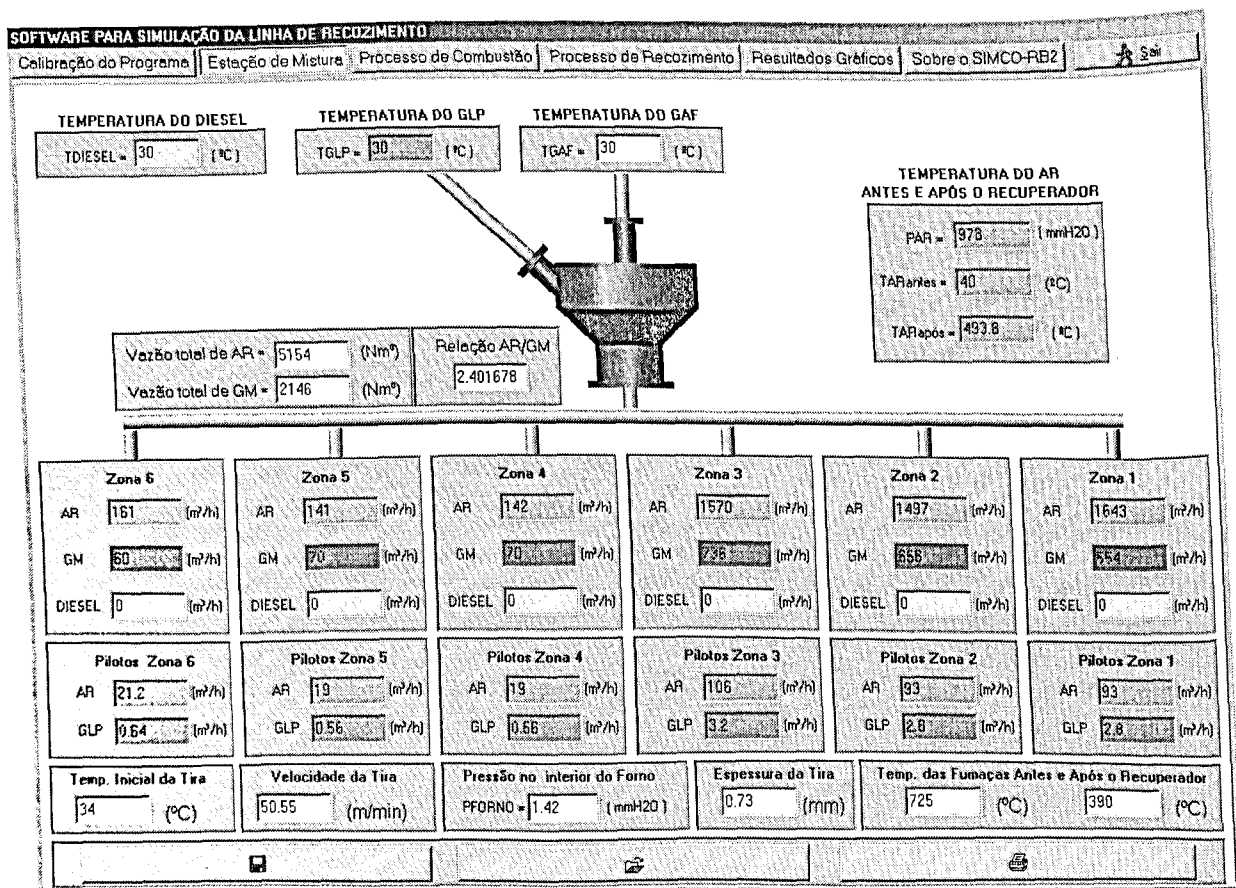


Figura 4.1 – Estação de mistura (Teste N° 1).

A Figura 4.1 apresenta os seguintes parâmetros monitorados no forno: i) as vazões de GM, GLP e ar entregues ao processo de combustão; ii) a pressão e as temperaturas de operação e iii) a espessura da tira de aço.

Neste teste, medem-se também os parâmetros que consideram o excesso e escassez de ar em cada zona. Estes são apresentados na Tab. (4.1).

Tabela 4.1 – Parâmetro que considera o excesso ou escassez de ar (Teste N° 1).

Zona 6	Zona 5	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1
0.80	0.80	0.80	0.85	0.90	1.15

Verifica-se na Tabela (4.1) que as zonas 2, 3, 4, 5 e 6 estão operando com escassez de ar, o que faz com que a combustão seja incompleta, enquanto que a zona 1 possui 15% em excesso de ar. Ressalta-se que o forno determina estes parâmetros com base nas CNTP (condições normais de temperatura e pressão).

Na seqüência, fornecem-se ao programa as vazões de GAF e GLP no misturador, para o cálculo da composição do GM (gás misto). Na Fig. (4.2), pode-se verificar que o misturador está operando com 92.7% de GAF e 7.3% de GLP. Além disso, são também fornecidos ao programa os elementos que compõem cada combustível para a determinação do poder calorífico inferior com base nas CNTP.

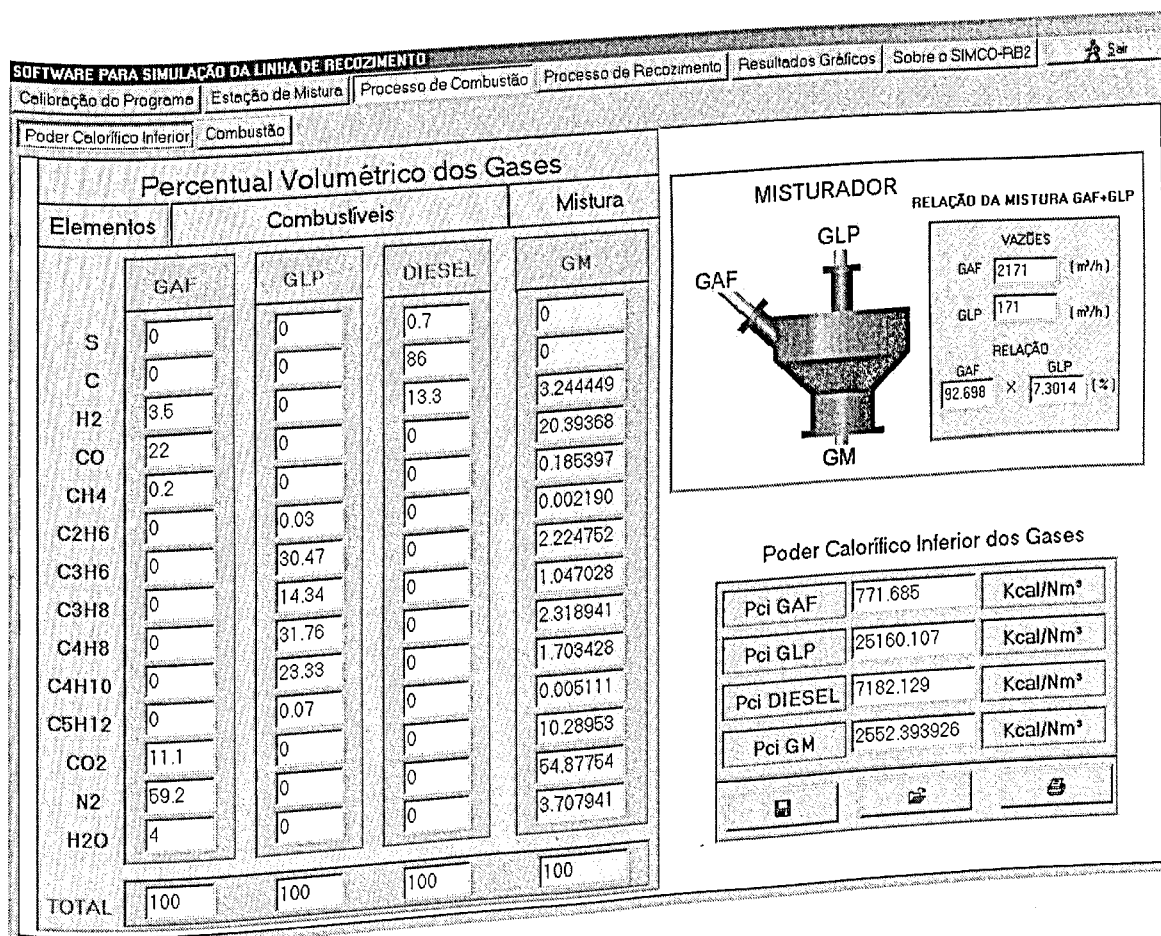


Figura 4.2 – Poder calorífico inferior (Teste Nº 1).

Para a determinação do rendimento do recuperador de calor, do forno e do processo de combustão, deve-se ainda fornecer ao software a temperatura no interior de cada zona do forno e as temperaturas em duas posições distintas da tira de aço. A Fig. (4.3) apresenta os demais parâmetros necessários ao cálculo do rendimento de cada processo.

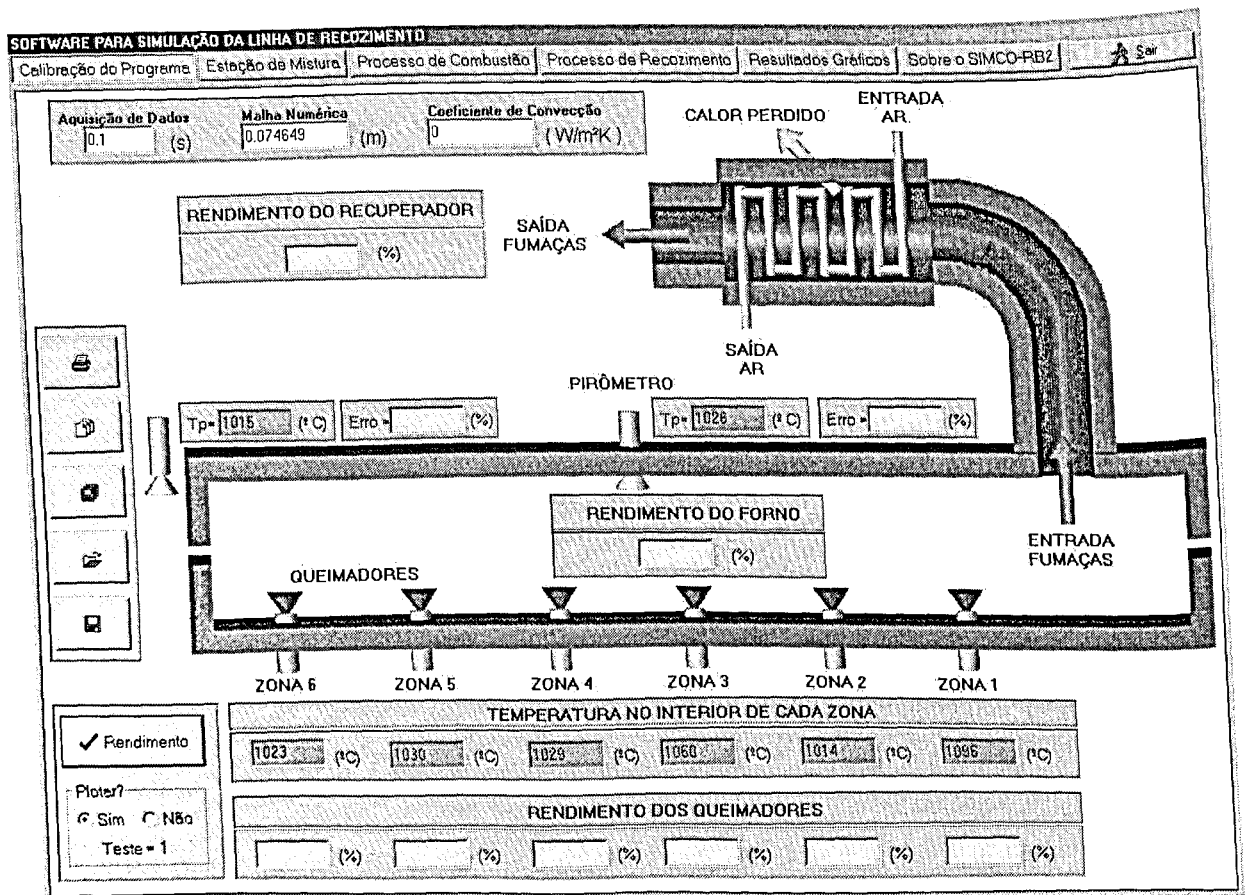


Figura 4.3 – Calibração do programa (Teste N° 1).

Como citado anteriormente, para a determinação do rendimento do forno, Eq. (2.24), usou-se a técnica inversa Seção Áurea (Anexo I) com o objetivo de se estimar o calor útil (Q_u) entregue a tira. Observa-se que o valor do calor útil obtido tem como fonte de origem as trocas de calor por radiação e convecção. Assim, o termo relativo à convecção na Eq. (2.33) somente é considerado nas regiões do forno onde não há combustão nos queimadores.

Na simulação numérica do processo de aquecimento da tira, utilizou-se uma malha com 1000 nós, o que representa uma distância entre nós de 0.074649 metros. Adotou-se também um intervalo de aquisição de temperatura no modelo de 0.1 segundos, o que elimina problemas com possíveis instabilidades numéricas.

Verifica-se ainda na Figura (4.3) a opção “Plotar”. Caso o usuário opte por uma análise gráfica dos rendimentos dos processos, deve-se selecionar a opção “Sim”. Esta opção tem como objetivo tornar o processo de calibração mais ágil pois o usuário visualiza e acompanha graficamente o rendimento dos processos ao fim de cada simulação. Ressalta-se também que ao fim do processo de calibração o programa apresenta um rendimento médio de cada processo, de acordo com o número de testes realizados.

Preenchidos todos os parâmetros necessários à calibração do software, aciona-se a opção "Rendimento". O programa, então, efetua o cálculo dos rendimentos dos processos e por fim apresenta o erro relativo entre as temperaturas medidas pelos pirômetros e as temperaturas calculadas a partir do modelo térmico, Fig. (4.4).

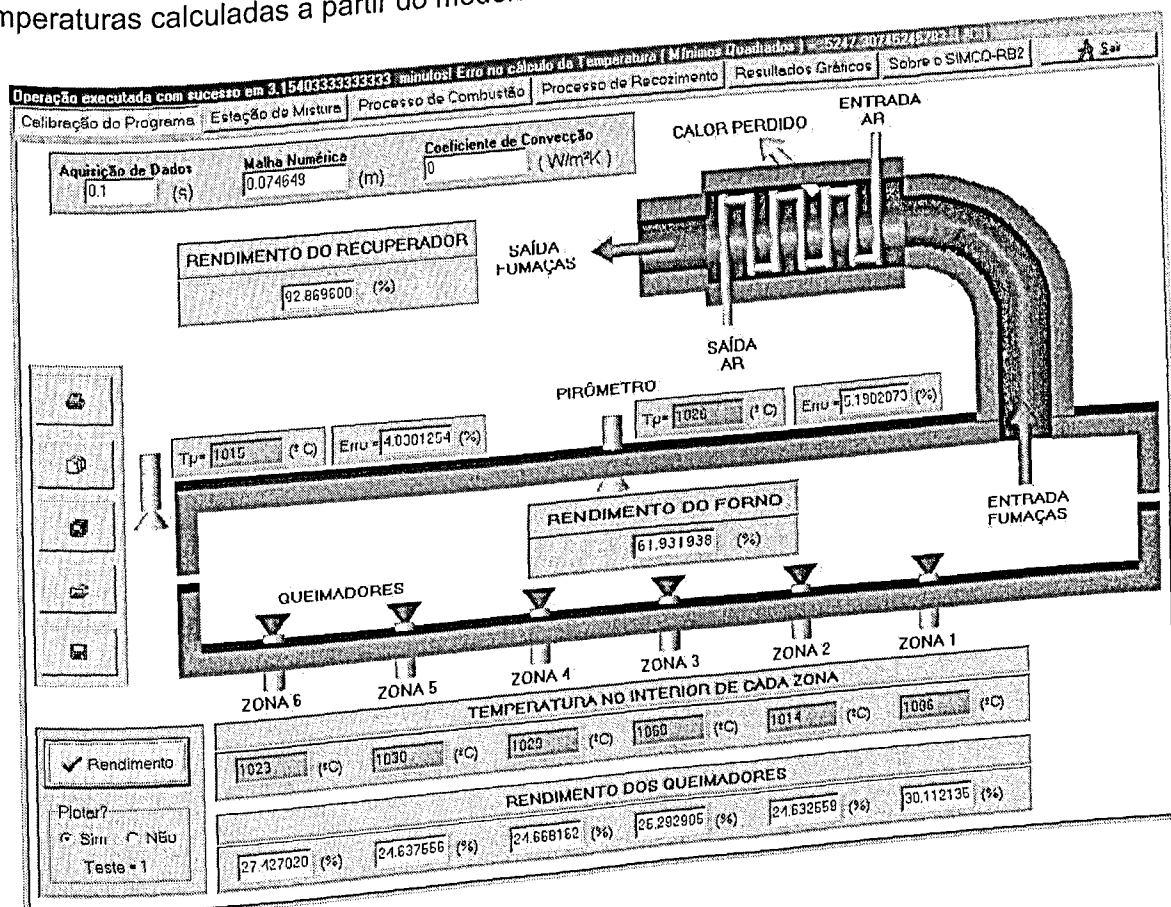


Figura 4.4 – Rendimento de cada processo (Teste Nº 1).

Calculados os rendimentos para o primeiro teste, verifica-se na Figura (4.4) que o recuperador de calor consegue recuperar aproximadamente 93% da energia total das fumaças, favorecendo o aquecimento do ar entregue ao processo de combustão, o que é bastante satisfatório. Entretanto, no processo de combustão verifica-se que mais de 70% da energia gerada é perdida durante a combustão. Atribui-se o baixo rendimento deste processo, à troca de calor entre o frasco reacional e as paredes do queimador, à ionização, à reação incompleta e à formação de radicais livres. Verifica-se ainda que o rendimento do forno RB2 indica que 60% do calor gerado na combustão é entregue à tira. Credita-se este alto rendimento aos aspectos construtivos do forno como: projeto, montagem, propriedades térmicas dos materiais usados e à disposição e forma como estes foram unidos evitando aberturas ao longo do forno. A Fig.(4.4) mostra também que o erro relativo entre a temperatura calculada pelo modelo

térmico e a temperatura real medida na tira de aço é de aproximadamente 5%, o que é bastante satisfatório levando-se em consideração as altas temperaturas envolvidas.

Ao fim do processo de calibração o programa apresenta a distribuição da temperatura na tira de aço calculada pelo modelo térmico, Fig. (4.5). Verifica-se ainda, nesta janela, a temperatura de entrada e saída da tira de cada zona.

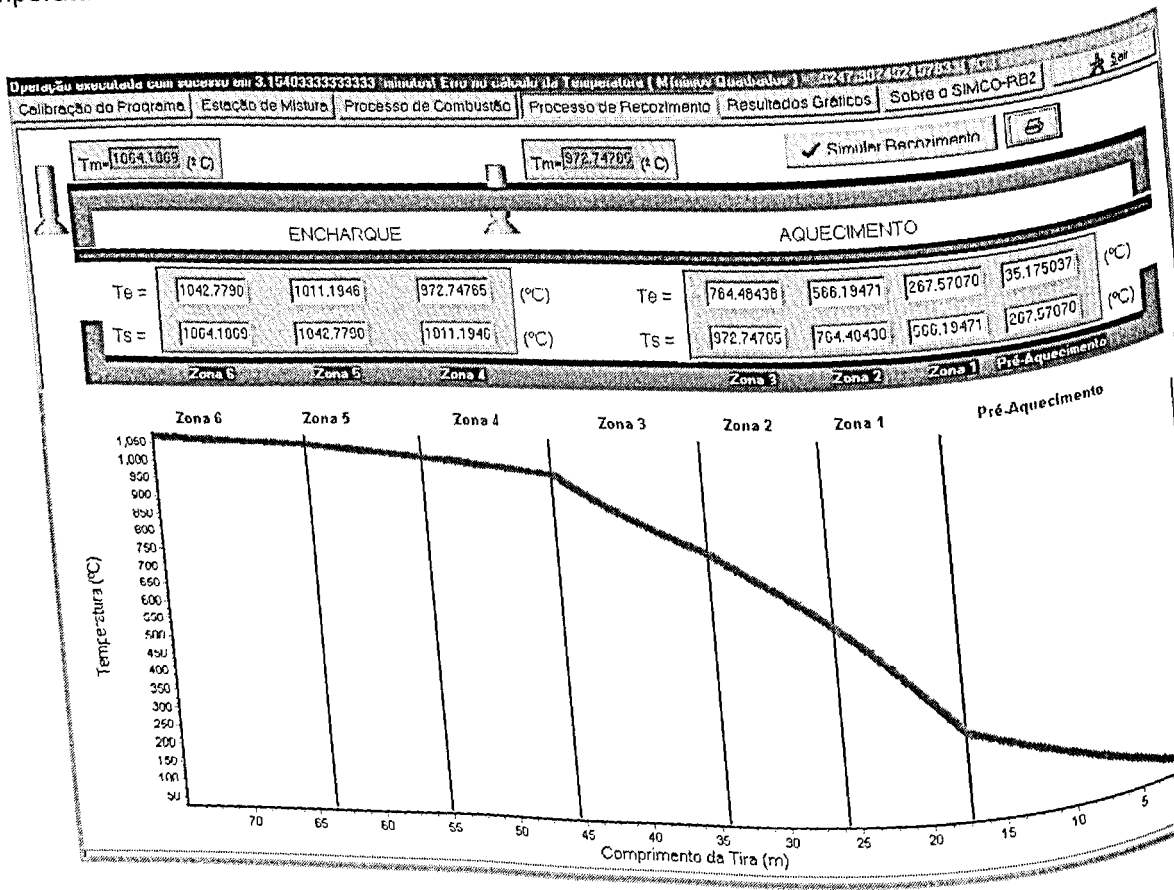


Figura 4.5 – Distribuição da temperatura na tira de aço (Teste N° 1).

Constata-se na Figura (4.5) o perfil não linear da distribuição de temperatura na tira de aço. Este perfil de temperatura é atribuído às propriedades térmicas do aço que variam com a função da temperatura.

Para uma melhor análise do processo de combustão e aquecimento da tira, o programa apresenta uma comparação entre o calor gerado na combustão e o calor útil entregue à tira de aço em cada zona do forno, Figura (4.6).

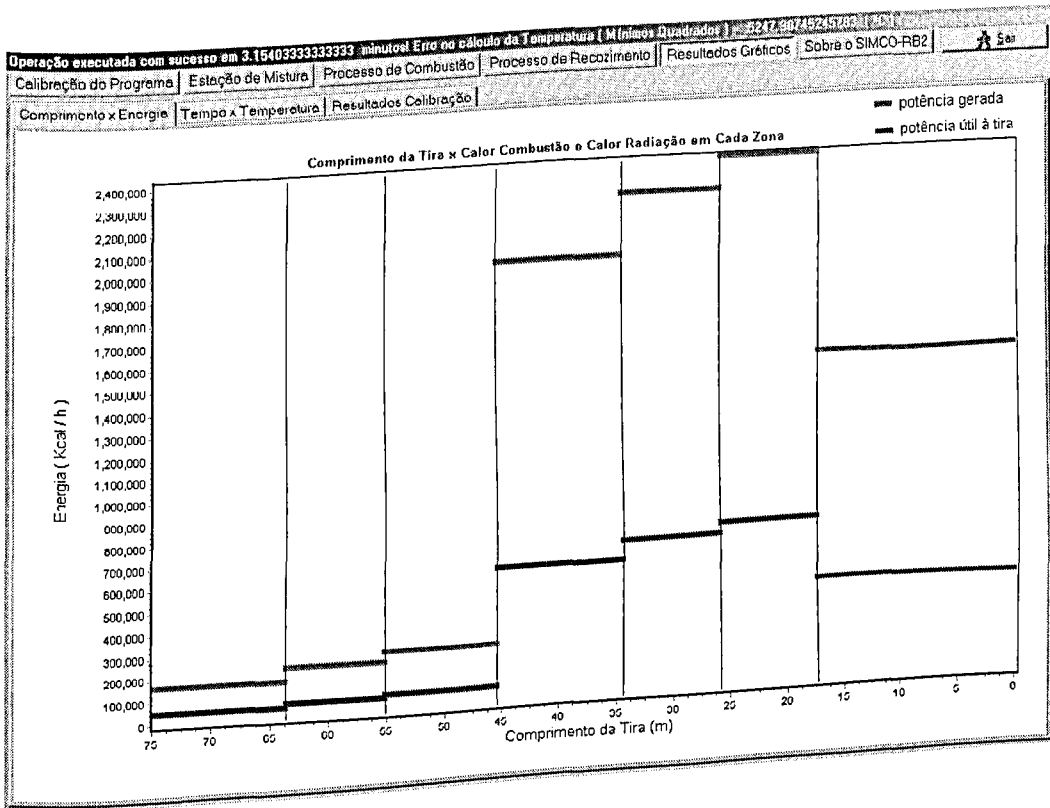


Figura 4.6 – Distribuição do calor no interior do forno (Teste N° 1).

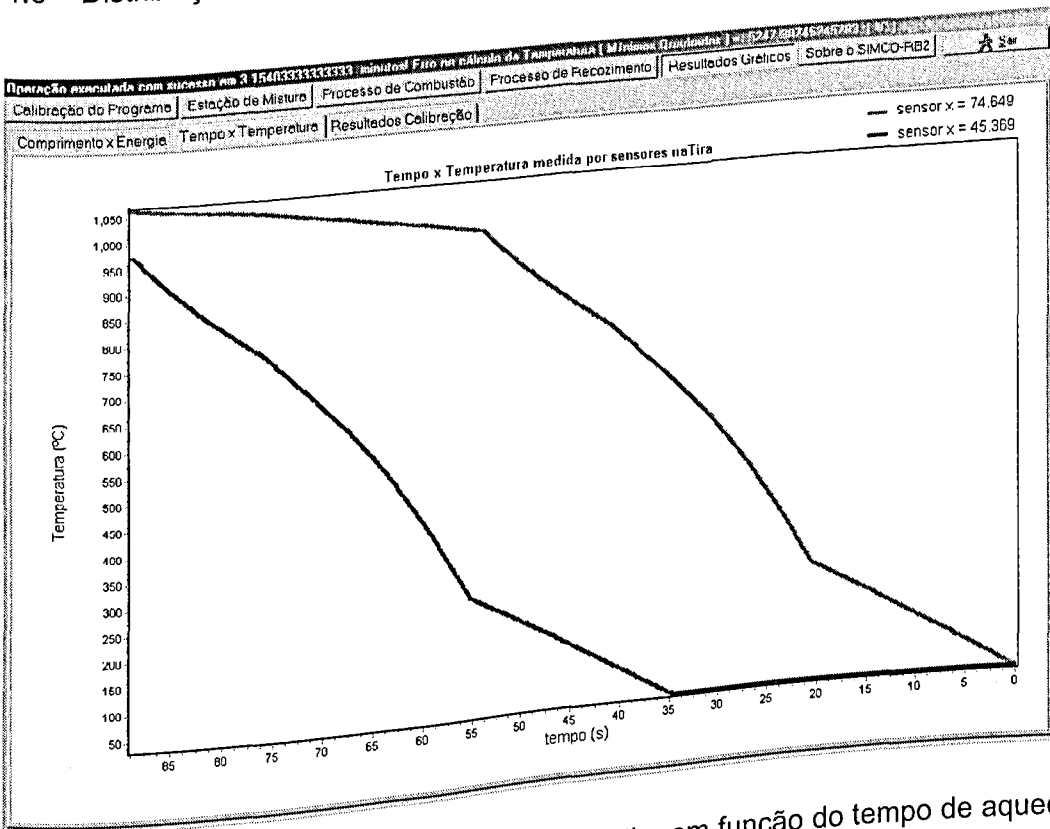


Figura 4.7 – Temperatura em posições específicas da tira em função do tempo de aquecimento (Teste N° 1).

A partir do software SIMCO – RB2 é possível ainda a determinação da temperatura da tira em função do tempo de aquecimento no interior do forno. Para isso, o programa simula dois sensores fixados à tira de aço durante o processo de recozimento. Nesse caso, ao fim do aquecimento, a posição destes sensores coincide com a posição do primeiro e do segundo pirômetro. Este procedimento permite a comparação entre a temperatura medida pelos pirômetros e a temperatura calculada pelo programa. A Figura (4.7) apresenta as temperaturas calculadas para o primeiro teste em função do tempo de aquecimento.

O programa fornece também a temperatura adiabática de chama, a temperatura no interior de cada zona do forno, a relação ar/combustível, o parâmetro que leva em consideração o excesso ou escassez de ar e a composição e vazão volumétrica das fumaças. Essas variáveis são apresentadas na janela "Combustão", Figura (4.8).

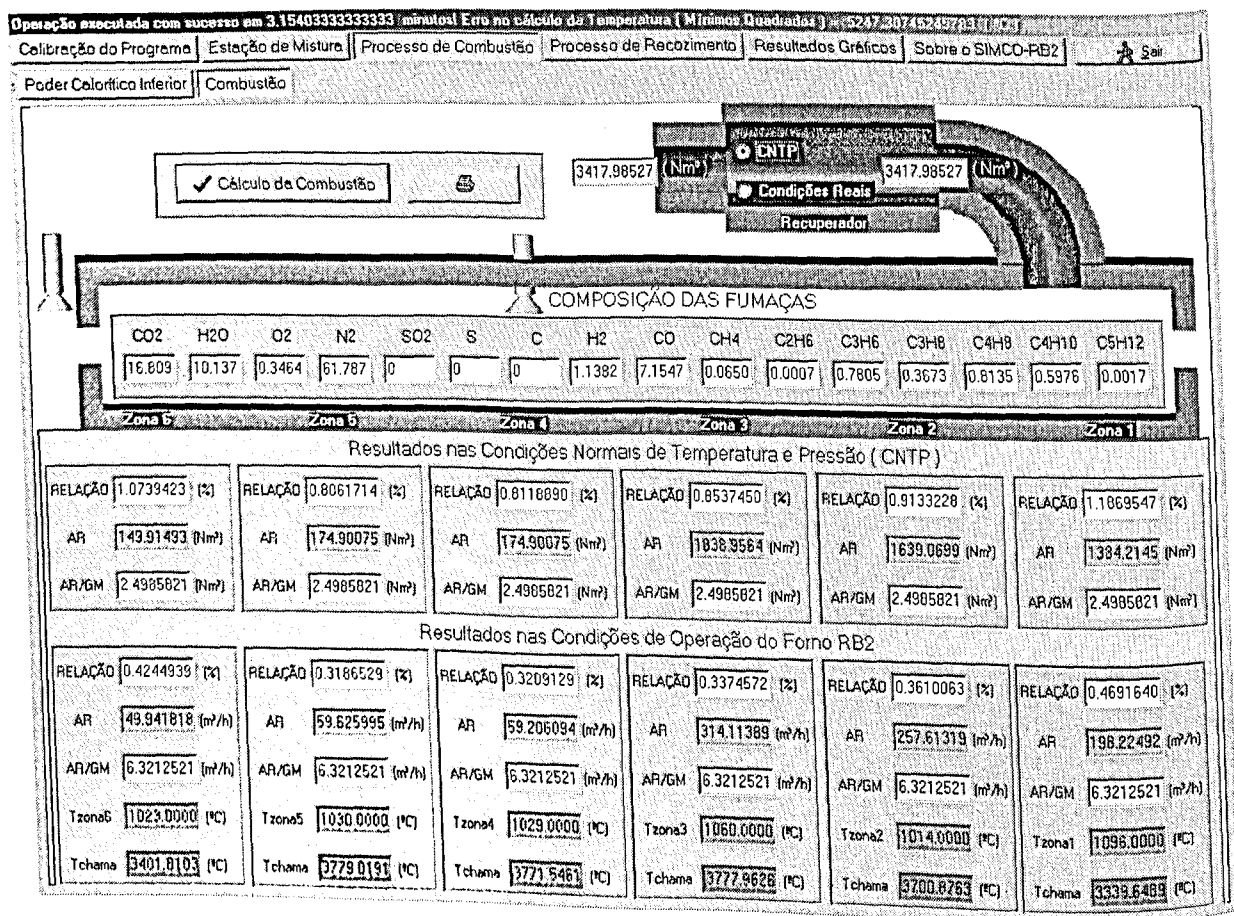


Figura 4.8 – Resultados do processo de combustão (Teste N° 1).

Comparando-se os parâmetros da Tabela (4.1) com os apresentados pelo programa a partir do cálculo estequiométrico, Figura (4.8), verifica-se que nas CNTP os resultados das zonas 1, 2, 3, 4 e 5 coincidem de maneira satisfatória com os parâmetros medidos no forno apresentando um erro inferior a 3.2%. Entretanto, a zona 6 mostra 20% a mais de ar do que o

apresentado na Tab. (4.1). De fato é esperado certo erro nos parâmetros medidos nas zonas de entrada e saída do forno (zonas 1 e 6). Isto pode ser explicado levando em consideração que em reações industriais, essas zonas trabalham amarradas, ou seja, são usados reagentes em excesso como fator de segurança, tanto para tornar possível a reação química como para garantir o consumo total do combustível usado.

Entretanto, pode-se constatar na Figura (4.8) que nas condições de processo, ou seja, temperatura e pressão do forno, a combustão em todas as zonas ocorre com escassez de ar, o que segundo o fabricante foi um critério preestabelecido na construção do forno RB2. Verifica-se também que a temperatura das zonas coincide exatamente com as temperaturas reais medidas no forno, o que prova a eficiência do algoritmo de Newton-Raphson. A temperatura adiabática de chama em cada zona do forno RB2 também é apresentada.

Apresenta-se na seqüência o segundo teste experimental.

4.2.2 – Teste Experimental N° 2

No segundo teste fez-se a aquisição dos seguintes parâmetros (Figura 4.9) :

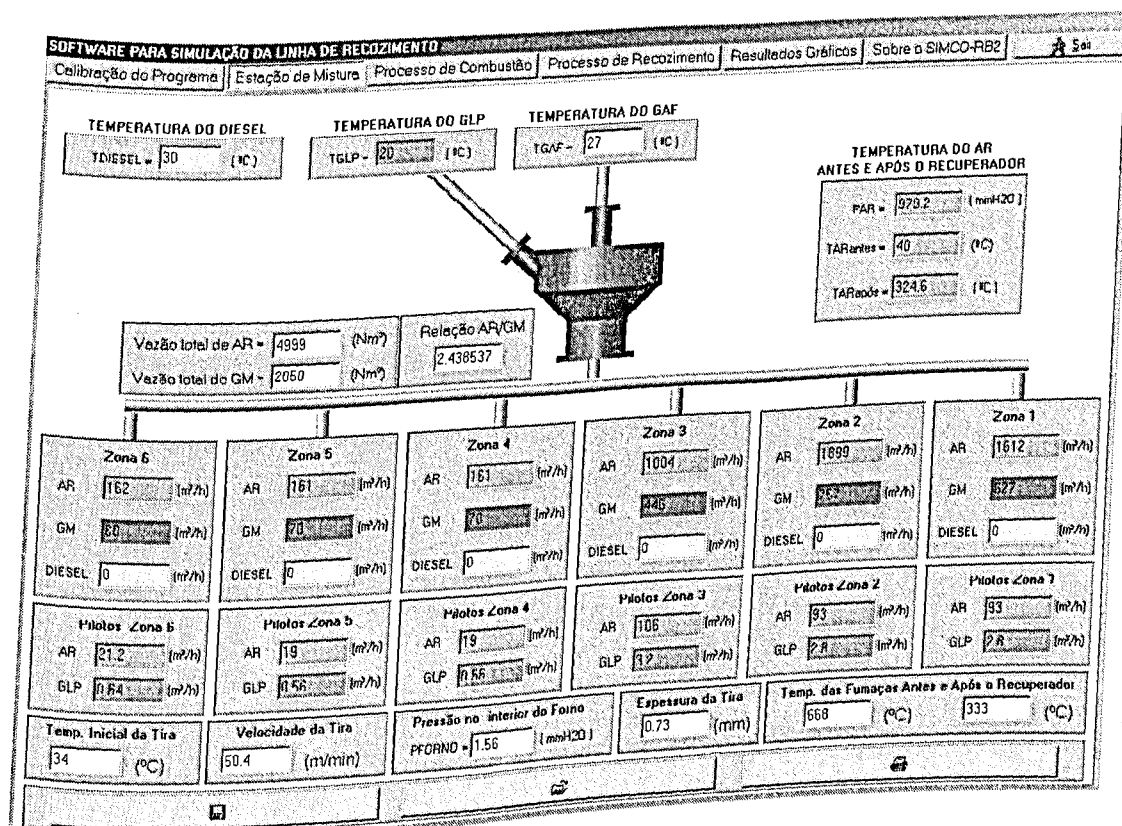


Figura 4.9 – Estação de mistura (Teste N° 2).

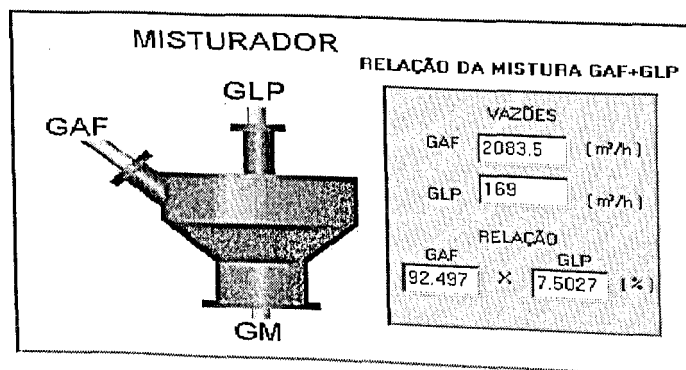
Neste teste, mediu-se novamente o parâmetro que leva em consideração o excesso e escassez de ar em cada zona. Estes são apresentados na Tab. (4.2).

Tabela 4.2 – Excesso ou escassez de ar (Teste N° 2).

Zona 6	Zona 5	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1
0.90	0.90	0.90	0.90	1.00	1.00

Verifica-se que as zonas 1 e 2 estão estequiométricas, enquanto que as zonas 3, 4, 5 e 6 estão operando com 10% de escassez de ar.

No misturador, mantém-se as mesmas composições dos gases apresentados na Figura (4.2), porém com as vazões de GAF e GLP modificadas e um conseqüente aumento do poder calorífico inferior do GM. A Figura (4.10) apresenta as vazões de GAF e GLP no misturador e o poder calorífico inferior dos combustíveis.



Poder Calorífico Inferior dos Gases

Pci GAF	771.685	Kcal/Nm³
Pci GLP	25160.107	Kcal/Nm³
Pci DIESEL	7182.129	Kcal/Nm³
Pci GM	2601.4934287	Kcal/Nm³

Figura 4.10 – Poder calorífico inferior (Teste N° 2).

Analogamente ao teste anterior, a Figura (4.11) apresenta os parâmetros restantes e os rendimentos calculados para o segundo teste experimental.

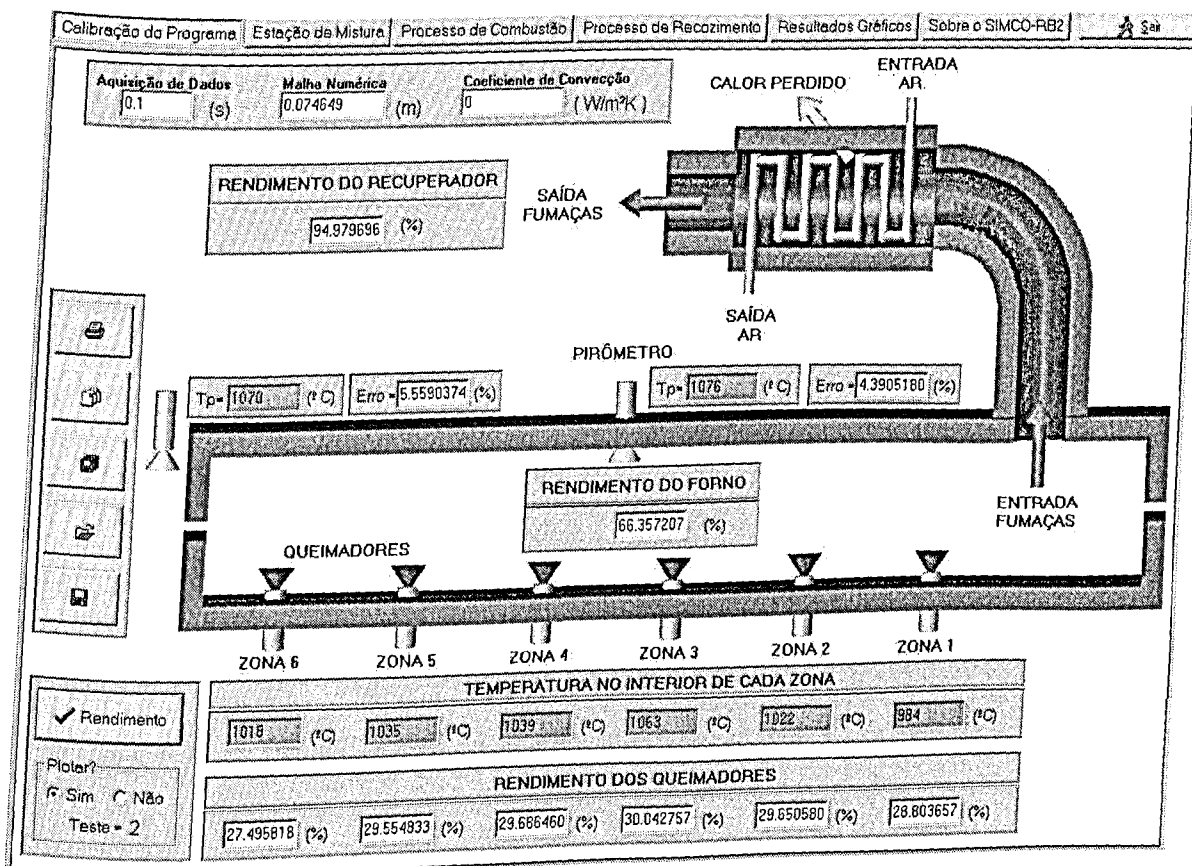


Figura 4.11 – Rendimento de cada processo (Teste N° 2).

Verifica-se na Figura (4.11) que o rendimento do recuperador se mantém constante, sofrendo um acréscimo de apenas 2.0% enquanto o rendimento do forno apresenta um aumento de aproximadamente 5%. No processo de combustão tem-se novamente que mais de 70% da energia gerada é perdida. Entretanto, analisando-se a combustão em cada zona, pode-se constatar variações nos rendimentos de aproximadamente 5%, o que é satisfatório considerando os erros nas medições dos parâmetros fornecidos pelo forno.

A Figura (4.11) mostra ainda que o erro relativo entre a temperatura calculada pelo modelo térmico e a temperatura real medida na tira de aço se manteve em 5%.

A distribuição da temperatura na tira de aço e a temperatura da tira na entrada e saída de cada zona para o segundo teste experimental são apresentadas na Fig. (4.12).

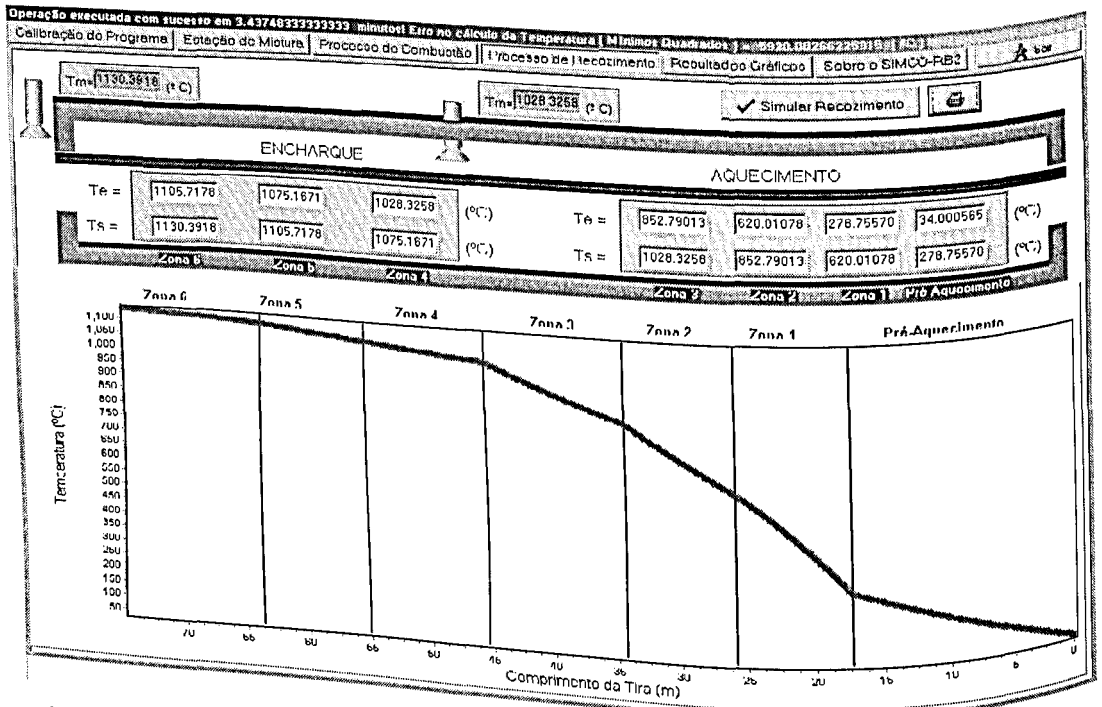


Figura 4.12 – Distribuição da temperatura na tira de aço (Teste N° 2).

Verifica-se novamente na Figura (4.12), o perfil não linear da distribuição de temperatura na tira. Observa-se ainda um aumento da temperatura na tira, o que pode ser explicado devido ao aumento do poder calorífico inferior do gás misto. A Figura (4.13) mostra uma maior quantidade de calor fornecida as zonas 1, 2, 3 e pré-aquecimento.

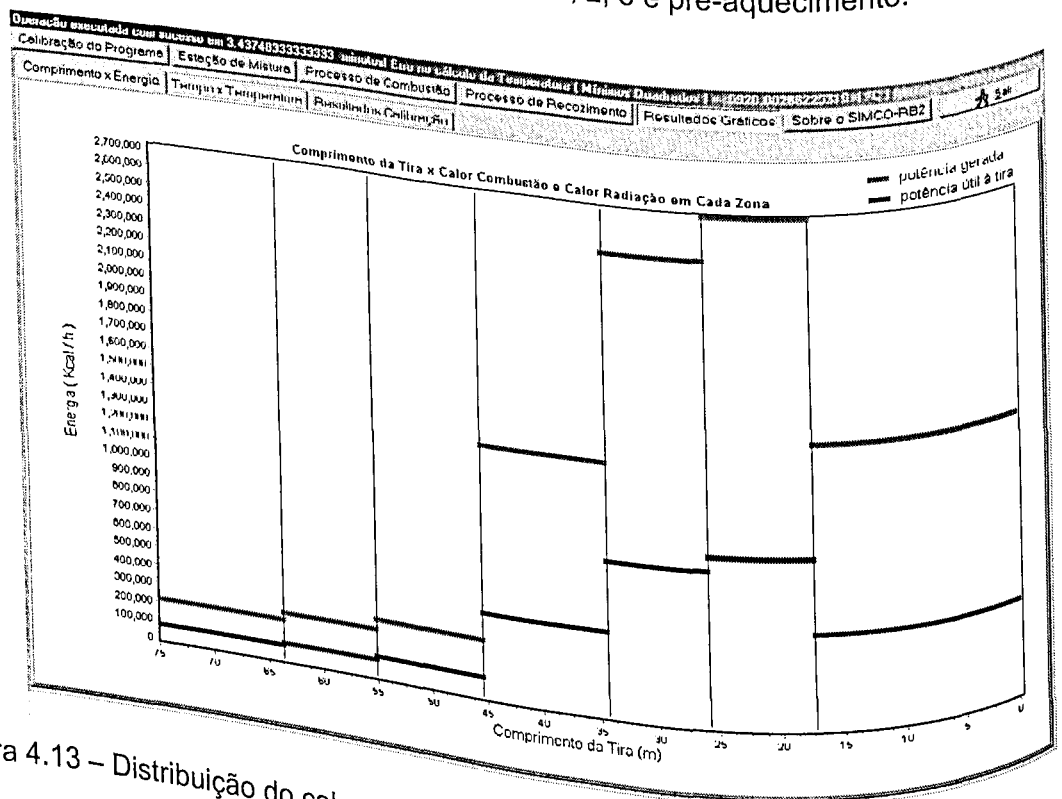


Figura 4.13 – Distribuição do calor no interior do forno (Teste N° 2)

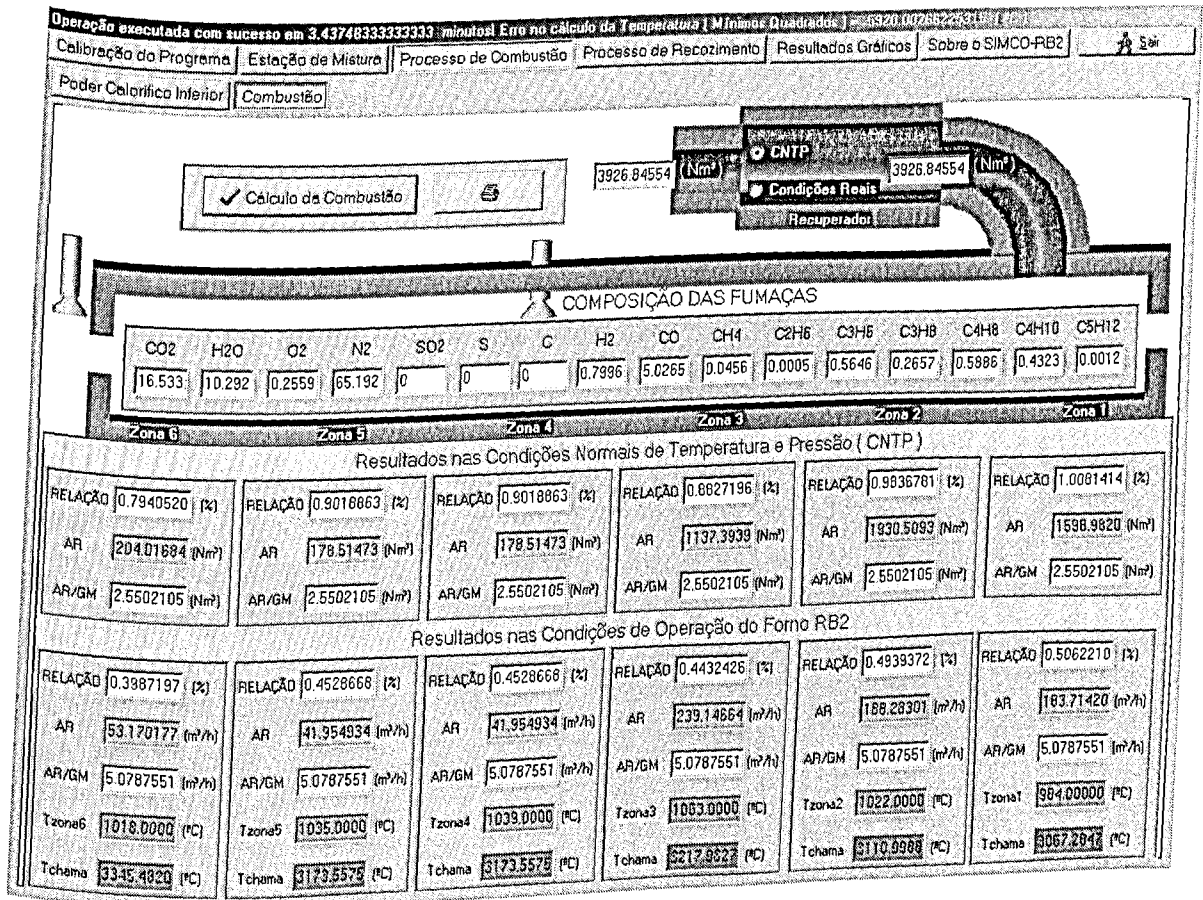


Figura 4.14 – Resultados do processo de combustão (Teste N° 2).

Comparando-se os parâmetros apresentados na Tabela (4.2) com os resultados calculados pelo software SIMCO - RB2, Figura (4.14), pode-se constatar novamente um problema na zona 6 que apresenta uma relação ar/combustão inferior à apresentada na Tab.(4.2). Neste teste, verifica-se que apesar da combustão nas zonas estar mais próxima da condição estequiométrica e o poder calorífico inferior ser maior do que o apresentado no primeiro teste, a temperatura adiabática de chama diminuiu. Este fato se explica considerando a menor quantidade de GLP presente no gás misto do segundo teste, o que acarreta uma menor temperatura adiabática de chama deste gás.

Observa-se na Figura (4.14) a presença de 0.25% de oxigênio nas fumaças. Essa composição, por sua vez, foi medida experimentalmente, obtendo-se o valor de 0.23%.

Apresenta-se a seguir os resultados para o terceiro teste e uma análise do rendimento de cada processo a partir dos três testes propostos.

4.2.3 - Teste Experimental Nº 3

A Figura (4.15) e a Tabela (4.3) apresentam os parâmetros medidos no forno e o excesso ou escassez de ar, respectivamente.

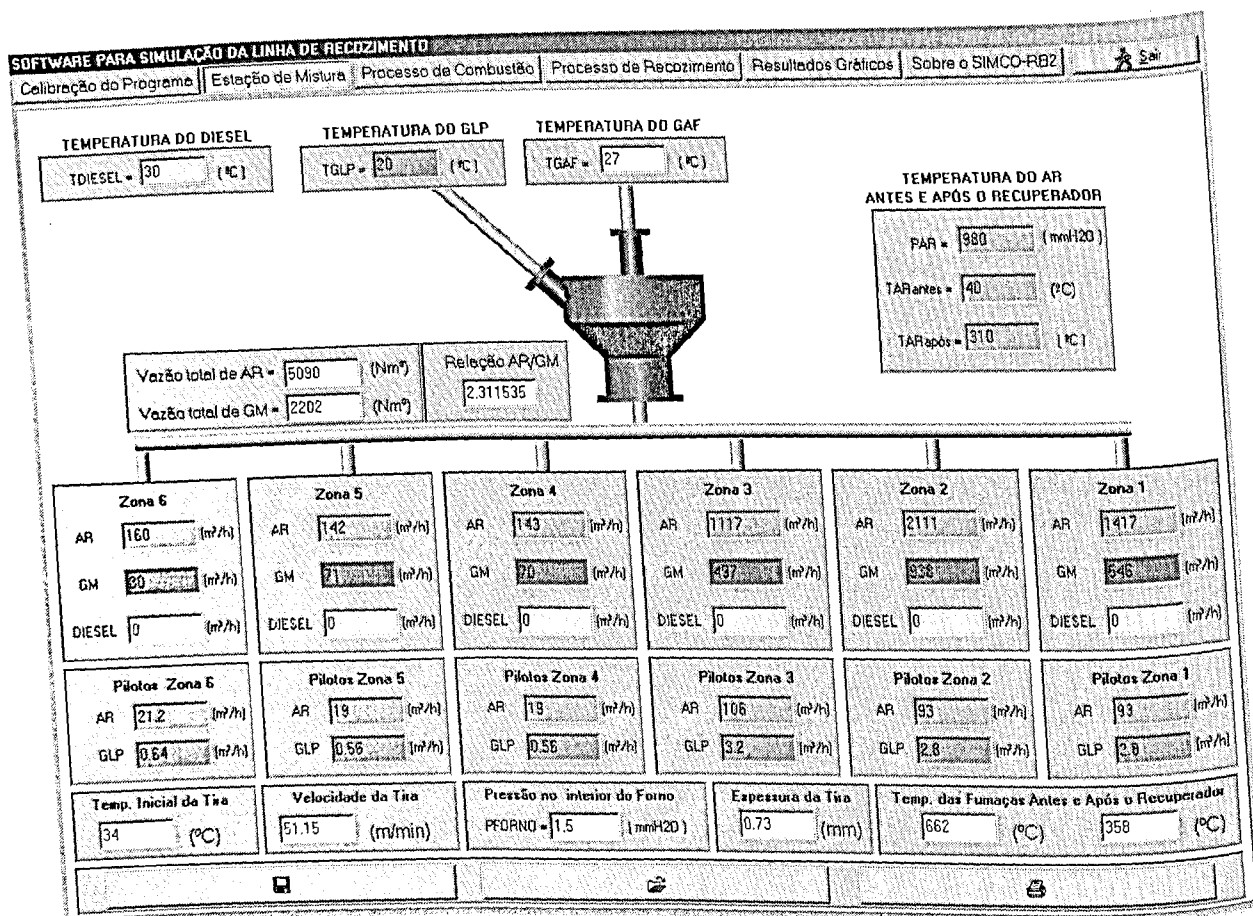


Figura 4.15 – Terceiro teste - estação de mistura.

Tabela 4.3 – Excesso ou escassez de ar (Teste Nº 3).

Zona 6	Zona 5	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1
0.80	0.80	0.80	0.90	0.90	1.00

Analogamente, manteve-se a mesma composição dos gases apresentados na Fig. (4.2), modificando-se apenas as vazões de GAF e GLP e o poder calorífico inferior do ambos apresentados na Fig. (4.16).

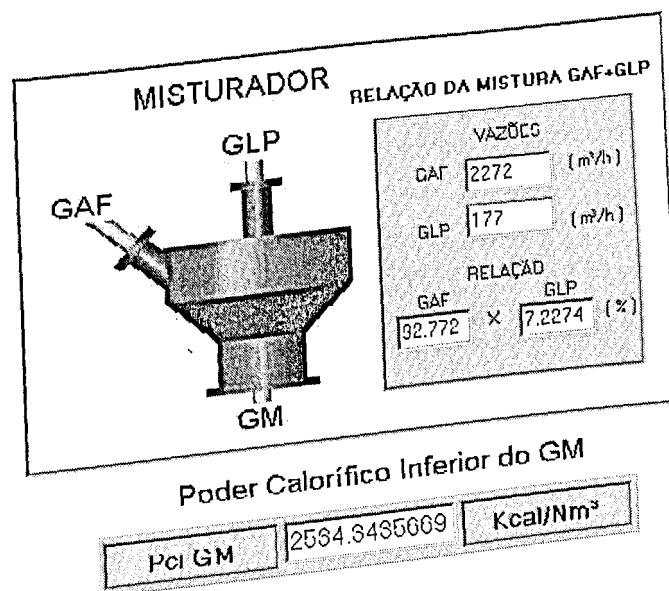


Figura 4.16 – Poder calorífico inferior (Teste N° 3).

Observa-se que apesar de um aumento GLP o poder calorífico inferior do GM diminui, o que pode ser explicado pelo aumento da vazão de GAF.

Como descrito anteriormente, a partir da temperatura no interior de cada zona do forno e das temperaturas da tira medidas pelos pirômetros, determina-se o rendimento de cada processo. As Figs. (4.17) – (4.19) apresentam os rendimentos, o perfil de temperatura na tira e os resultados do processo de combustão.

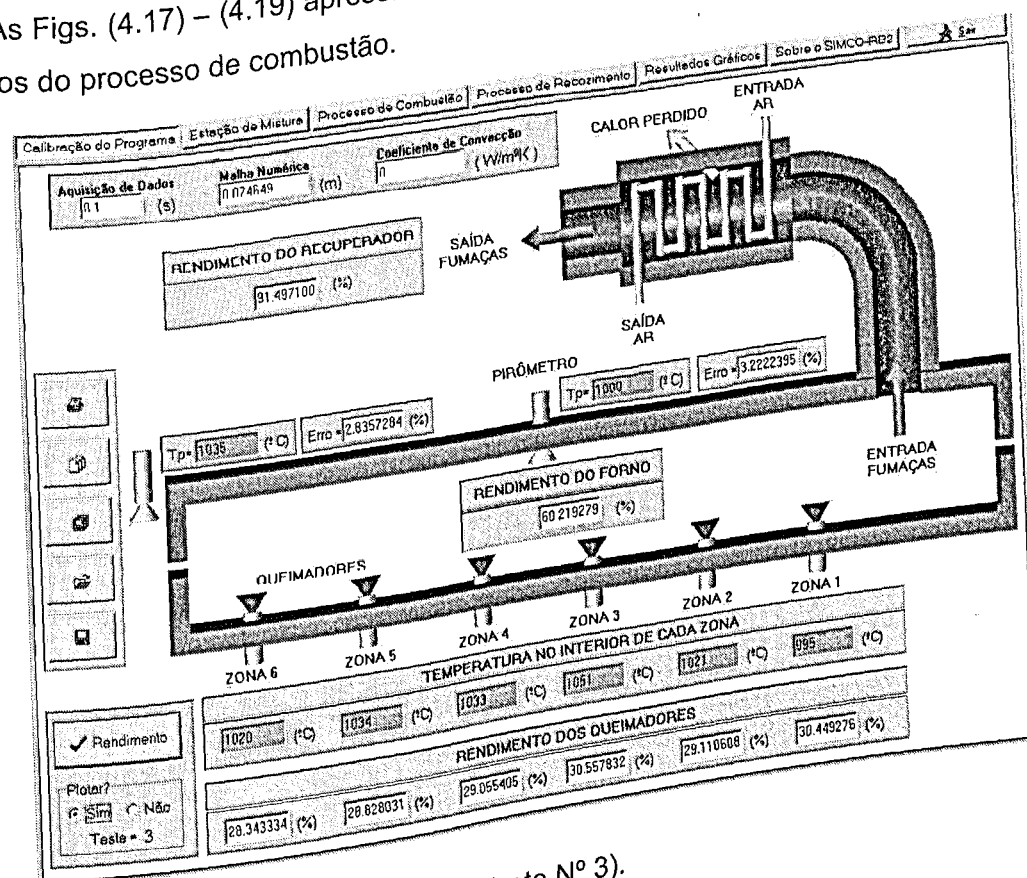


Figura 4.17 – Rendimento de cada processo (Teste N° 3).

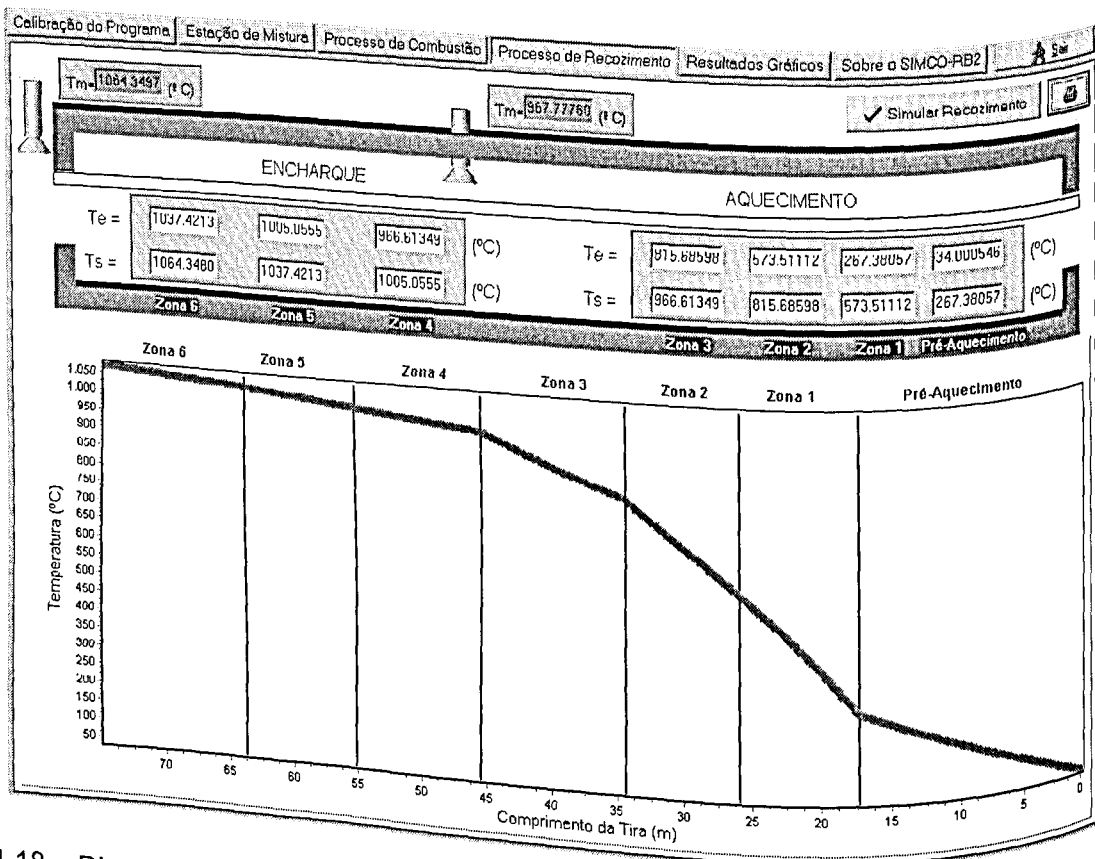


Figura 4.18 – Distribuição da temperatura na tira de aço (Teste N° 3).

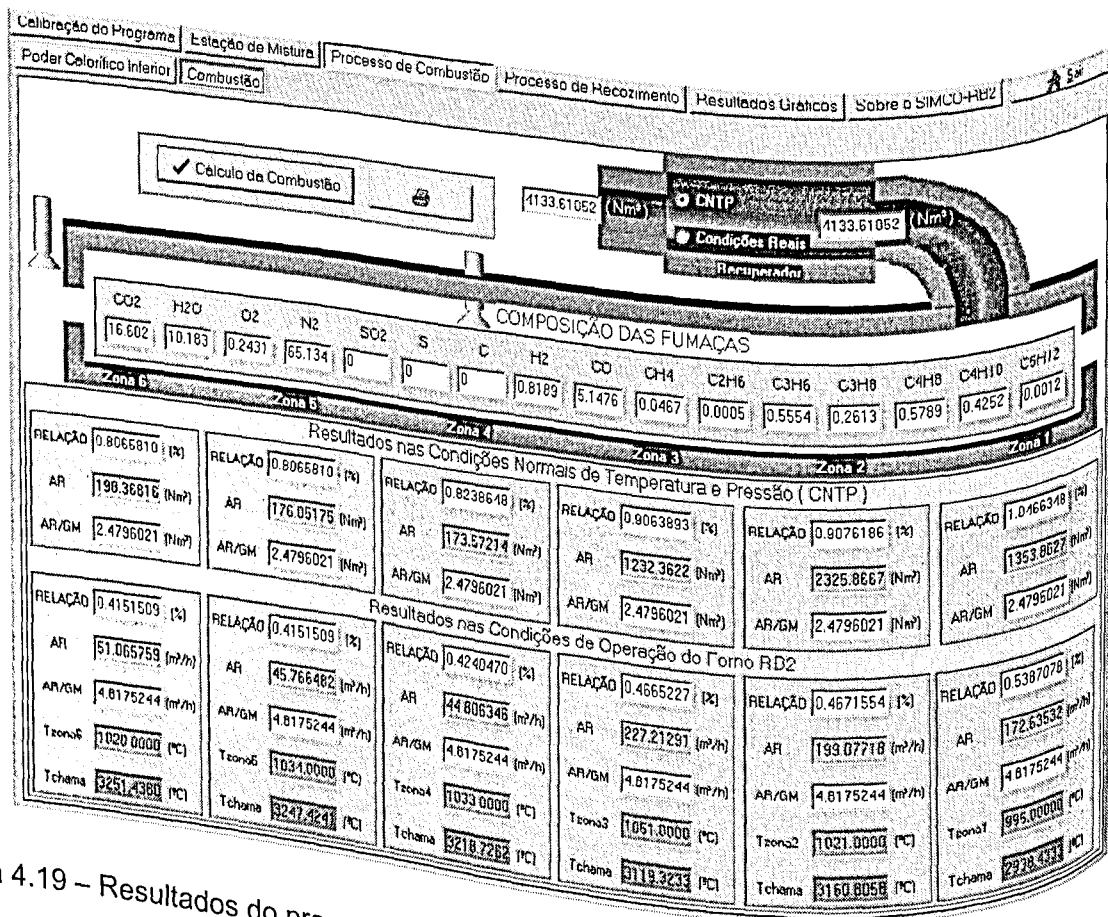


Figura 4.19 – Resultados do processo de combustão (Teste N° 3).

Como observado anteriormente, verifica-se uma boa concordância entre a temperatura calculada pelo modelo térmico e a temperatura real medida na tira de aço, apresentando nesse teste um erro máximo de 3.3%. A Figura (4.18) apresenta a distribuição da temperatura na tira de aço e a temperatura de entrada e saída da tira em cada zona do forno.

Verifica-se na Figura (4.19), a partir da análise do excesso ou escassez de ar e da vazão de GAF e GLP no misturador, que a temperatura adiabática de chama deve diminuir, o que efetivamente ocorre em todas as zonas do forno. No processo de combustão, comparou-se ainda o excesso ou escassez de ar experimental, Tabela (4.3), com os resultados calculados pelo software, Figura (4.19), o que mostrou um excelente ajuste em todas as zonas.

Observa-se que os dados experimentais representam a maior fonte de erros e incertezas nos resultados estimados influenciando diretamente na eficiência do software proposto neste trabalho. Uma análise dessas fontes de erro e incertezas é apresentada no Capítulo V.

Embora tenham sido apresentadas apenas três condições diferentes de operação, apresenta-se na seqüência uma comparação entre os rendimentos obtidos em cada teste. Ressalta-se que a dificuldade em se obter dados experimentais para várias condições justifica-se devido as necessidades e limitações de operação do forno para a obtenção do produto final. Todavia as análises e conclusões dos três testes são apresentadas sem perda de generalidade. A Fig. (4.20) apresenta essa comparação.

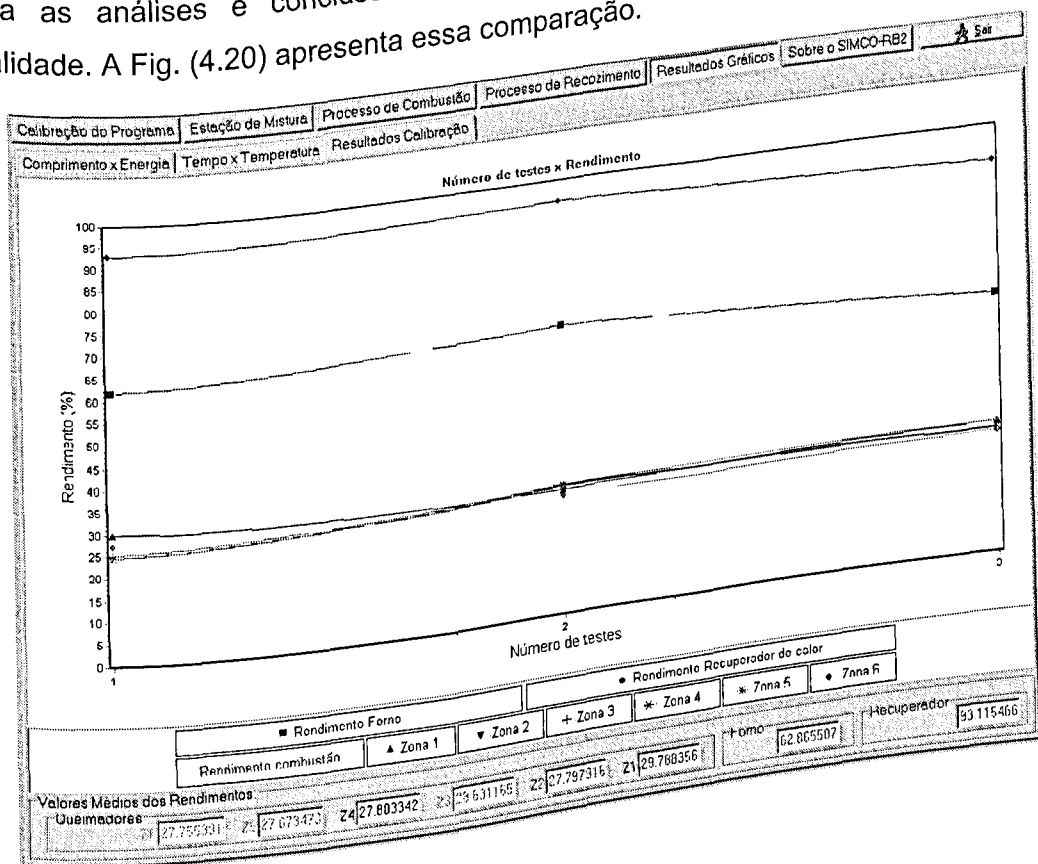


Figura 4.20 – Análise do rendimento dos processos.

Pode-se verificar na Figura (4.20) que o rendimento do recuperador de calor se mantém constante nos três testes, sofrendo oscilações de aproximadamente 6% que de fato já era esperado devido às incertezas nos parâmetros medidos no forno.

Verifica-se ainda que o rendimento do forno também se mostra apresentando uma oscilação máxima de 6%. Entretanto, para uma análise mais detalhada do processo de combustão em cada zona do forno são necessários mais dados experimentais. Isto se deve às oscilações apresentadas nas zonas 2, 3, 4 e 5. Estas podem ser explicadas considerando que nestas zonas o forno está livre para ajustar o rendimento do processo de combustão em cada zona, oscilando em torno de um "set point", e assim o operador do forno fornece uma vazão de referência para cada zona, o que aumenta a incerteza na medição da vazão. Isto se torna ainda mais evidente analisando as zonas 1 e 6, que ao contrário das demais, apresentaram rendimentos satisfatórios, pois assim como descrito, essas zonas operam com vazões fixas de gás que minimiza a incerteza na medição dos parâmetros no forno.

CAPITULO V

Análise de Erros: Uma Discussão

5.1 – Introdução

Este capítulo apresenta uma discussão sobre as principais fontes de erro presentes no processo de combustão dos gases e no processo de recozimento da tira de aço silício. Essas fontes de erro devem ser conhecidas e minimizadas para se buscar a precisão dos resultados estimados. Dentre as fontes de erro citam-se: i) incerteza no modelo matemático (modelagem do processo de transferência de calor, propriedades térmicas da tira de aço e cálculo estequiométrico) e ii) incerteza na medição dos parâmetros fornecidos pelo forno.

5.2 – Incerteza no Modelo Matemático

O modelo teórico deve representar o fenômeno físico real com a maior fidelidade possível. Entretanto, na construção do modelo a necessidade do uso de hipóteses simplificativas é responsável pela introdução de incertezas nos resultados obtidos.

Nesse sentido, a primeira fonte de incerteza no modelo, refere-se a modelagem do processo de transferência de calor na tira de aço. A Fig. (5.1) apresenta um esquema de uma tira de aço cujas dimensões são de 80 m de comprimento, 1 m de largura e 2.7 mm de espessura. Observa-se que a espessura da tira é muito menor que o comprimento, o que justifica o uso da hipótese de transferência de calor unidimensional no modelo térmico.

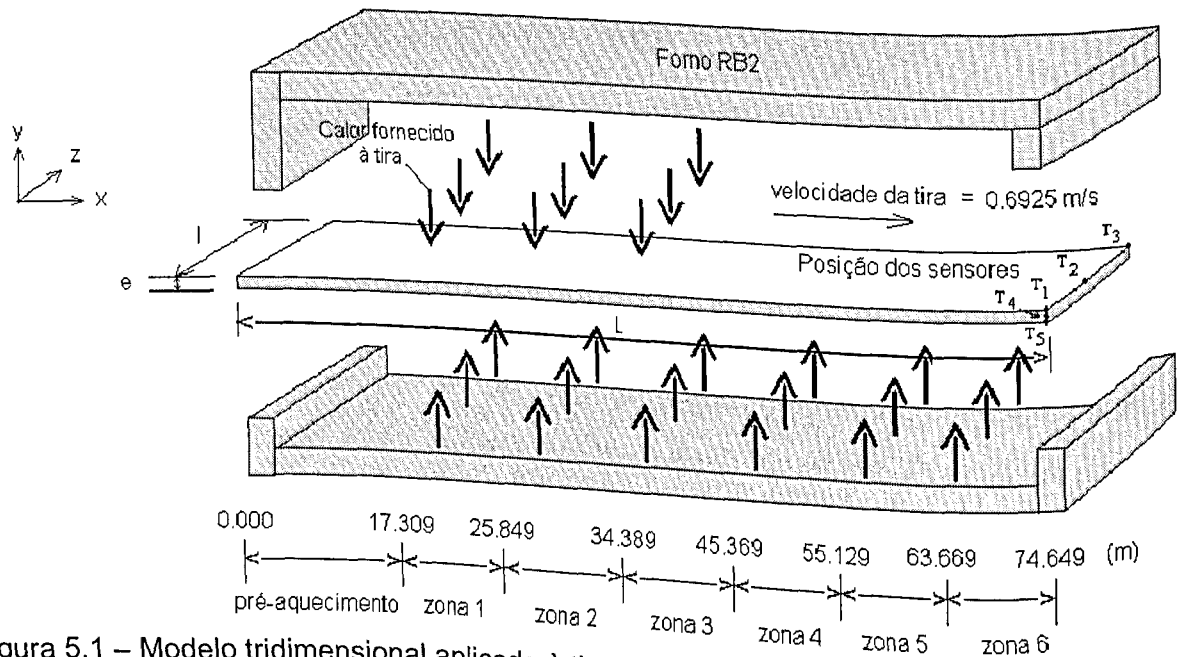


Figura 5.1 – Modelo tridimensional aplicado à tira de aço.

Uma comprovação qualitativa da adequação dessa hipótese, pode ser observada por meio da análise dos campos de temperatura calculados a partir de um modelo 3D. Assim, recozimento da tira de aço pode ser dado por:

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (5.1)$$

na região R ($0 < x < L$, $0 < y < e$, $0 < z < l$) em $t > 0$, sujeito à condição inicial

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (5.2)$$

e às condições de contorno

$$-k \frac{\partial T(x, e, z, t)}{\partial x} = \begin{cases} q(\varepsilon, 0, z, t) \text{ para } (0 \leq z \leq l) \\ h_3 [T_\infty - T(x, 0, z, t)] \end{cases} \quad (5.3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n_i} = h_i [T - T_\infty] \text{ para } t > 0 \quad (5.4)$$

onde o índice i (1,2,4,5,6) representa a i -ésima superfície da tira, n_i representa a normal à essa superfície, h_i o respectivo coeficiente de transferência de calor, v a velocidade da tira, t o tempo de aquecimento e $\varepsilon = v \times t$.

Para a análise da distribuição tridimensional da temperatura na tira, serão simulados cinco sensores de temperatura distribuídos ao longo da largura e espessura da tira, assim como apresentado na Fig. (5.1). Espera-se, de acordo com a hipótese de transferência de calor unidimensional, que as temperaturas medidas por estes sensores sejam iguais e que o modelo térmico tridimensional apresente gradiente térmico somente na direção do comprimento da tira.

Para a simulação tridimensional, considerou-se que cada zona do forno estava operando com uma fonte de calor constante, assim como apresentado na Fig. (5.2).

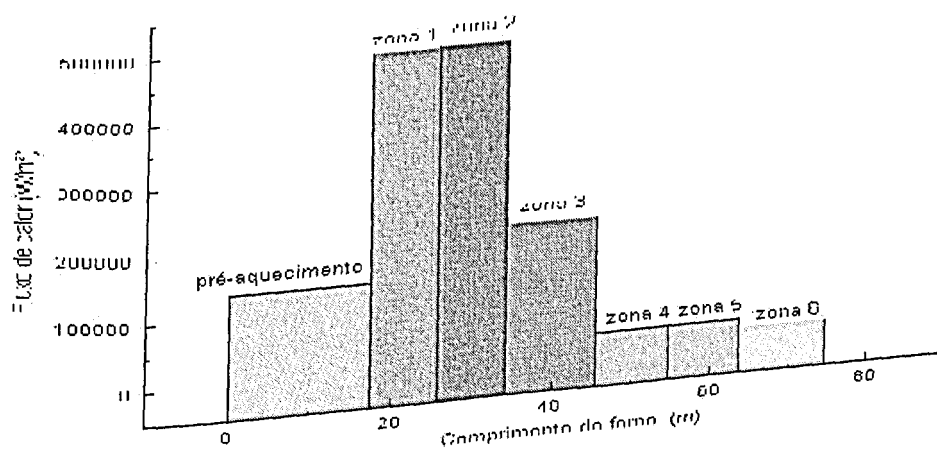


Figura 5.2 – Fluxo de calor útil aplicado à tira em cada zona do forno.

Além disso, consideraram-se os seguintes dados de entrada (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 - Dados de entrada para a simulação numérica

Material	Aço Silício	
Dimensões da Amostra (m)	L	74.649
	e	0.0027
	l	1.0
Condutividade Térmica, λ , (W/m°C)	46.57	

Tabela 5.1 - Dados de entrada para a simulação numérica (continuação...)

Difusividade Térmica, α , (m^2/s)		1.264×10^{-5}
Tempo de duração da Simulação (s)		107.8
Temperatura Inicial da Amostra ($^{\circ}C$)		40.0
Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)		40.0
Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção ($W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$)	h	10.0

Para a solução deste problema, utilizou-se o software já validado, INV3D, proposto por Carvalho et al., (2003) que gerou uma malha com 10800 nós. O tempo de simulação do aquecimento da tira foi de aproximadamente 2 minutos em um PC Pentium IV 1700Mghz. Os resultados obtidos são apresentados nas Figs. (5.3) - (5.5).

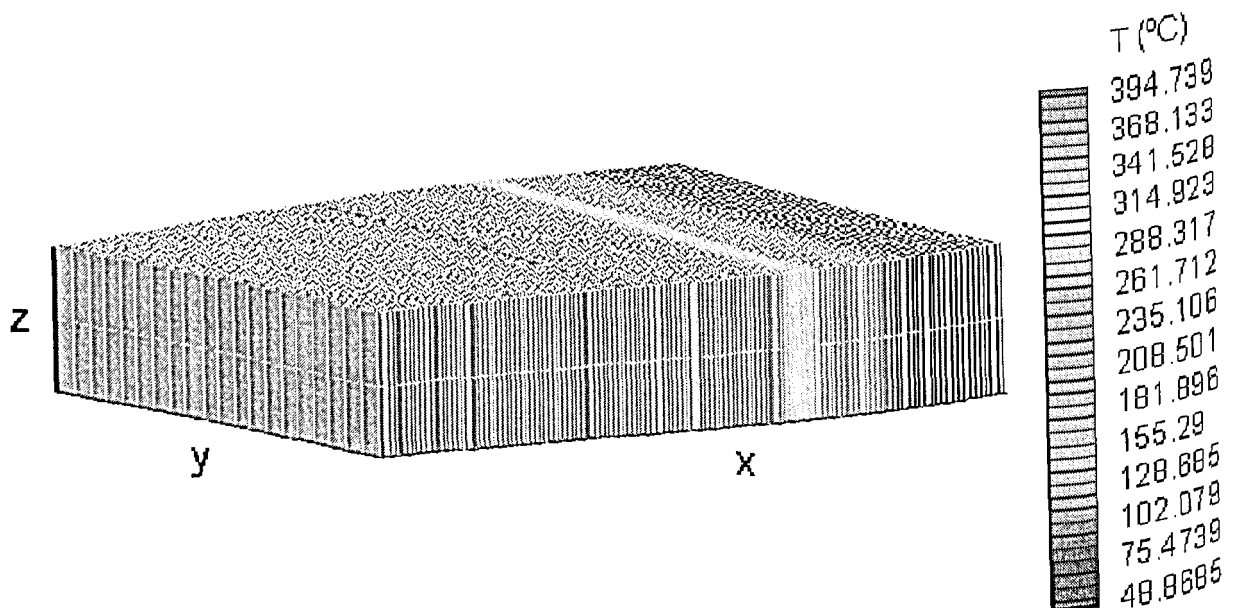


Figura 5.3 – Distribuição da temperatura na tira.

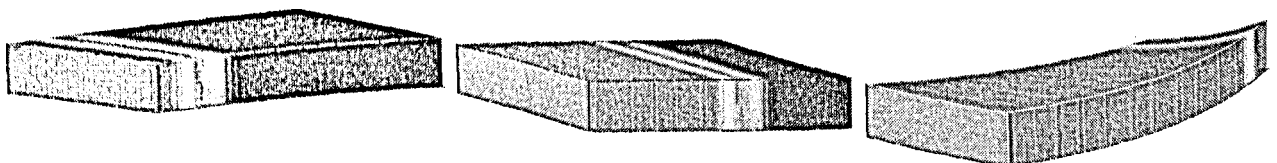


Figura 5.4 – Distribuição da temperatura na tira em 3 etapas: 20, 60 e 100 segundos.

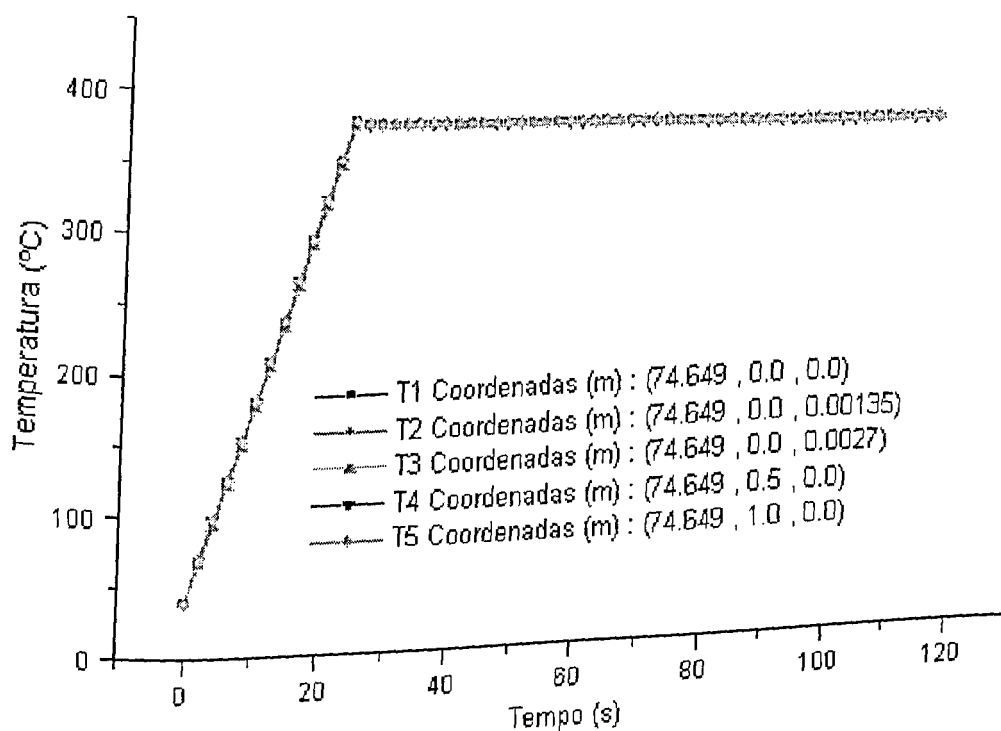


Figura 5.5 – Evolução da temperatura ao longo da espessura e largura da tira.

Assim como descrito anteriormente, verifica-se nas Figuras (5.3) e (5.4) que o gradiente térmico ocorre somente ao longo do comprimento da tira. Este fato é ainda melhor comprovado por meio da Fig. (5.5) que apresenta o comportamento idêntico entre as temperaturas simuladas pelos sensores T1, T2, T3, T4 e T5. A partir destes resultados, comprova-se que a hipótese do modelo unidimensional adotada neste trabalho é válida.

Apesar da simulação tridimensional apresentar excelentes resultados, este tipo de abordagem apresentou algumas características indesejáveis como: i) alto custo computacional; ii) necessidade de uma malha refinada para a convergência do modelo térmico tridimensional e iii) um longo tempo para a visualização dos resultados. Em contrapartida a abordagem unidimensional: que gera resultados rápidos, com baixo custo computacional é isento de instabilidades numéricas devido à problemas de convergência do modelo.

Outra incerteza importante e ainda relacionada ao modelo, refere-se às propriedades térmicas da tira. Observa-se que os valores usados baseiam-se na hipótese de que o material estudado (aço silício) possui a mesma composição química, tratamento térmico ou qualquer outro tipo de beneficiamento do material usado para a obtenção dos valores de referência. Os valores das propriedades térmicas da tira de aço silício são fornecidos pela empresa e são apresentados na Tab. (5.2).

Tabela 5.2 - Propriedades Térmicas do Aço Silício 2%

Material: Aço Silício		Densidade (ρ) = 7.73 kg/m ³ a 15°C	
Composição: 0.485C 1.98Si 0.9Mn 0.047S 0.044P 0.04Cr 0.156Ni 0.637Cu			
Temp(°C)	Calor Específico (Cp) (J/KgK)	Entalpia (kJ/kg)	Condutividade Térmica (λ) (W/mK)
0	502	0	25.1
100	502	50.2	28.5
200	527	101.7	30.1
300	552	156.5	30.9
400	602	215.5	30.9
500	669	280.3	30.9
600	753	353.1	30.1
700	828	433.5	28.0
800	1364	546.8	25.1
900	628	608.8	25.6
1000	636	672.0	26.4
1100	653	736.8	27.7
1200	669	803.3	29.3
1300	686	871.5	30.9

A Figura (5.6) apresenta a variação das propriedades térmicas (α e λ) em função da temperatura.

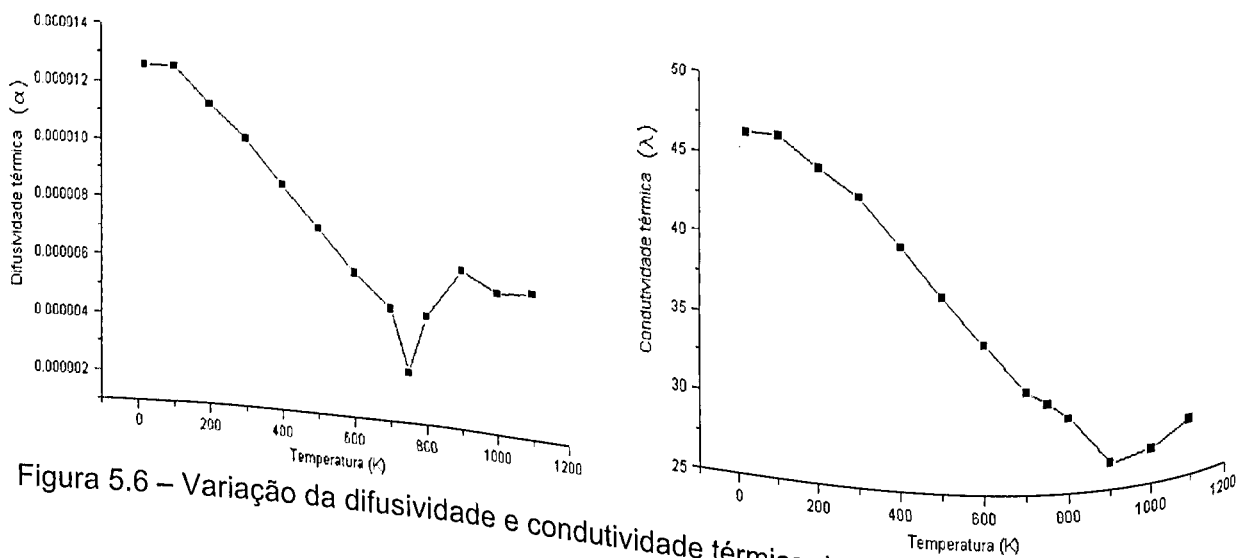


Figura 5.6 – Variação da difusividade e condutividade térmica do aço silício.

Outra fonte de incerteza relacionada ao modelo refere-se ao cálculo estequiométrico. Neste caso, a incerteza reside na estabilidade das reações químicas do processo de combustão. Neste trabalho consideraram-se apenas as principais reações da combustão estequiométrica, assim como apresentado na Tab. (2.4), nas quais se previu somente o excesso ou escassez de ar. Portanto, não foram consideradas possíveis instabilidades no estado de equilíbrio dessas reações químicas, ou seja, mesmo usando quantidades

estequiométricas de reagentes ou considerando a reação incompleta, os produtos da combustão são acompanhados por reagentes não-consumidos, bem como por produtos laterais, o que faz com que a equação química utilizada neste trabalho não represente o real mecanismo da reação, sendo, portanto uma fonte de incerteza na simulação do modelo de combustão.

5.3 - Incerteza na Medição dos Parâmetros Fornecidos pelo Forno

Em reações industriais, raramente se encontra as quantidades exatas dos materiais usados, sendo normalmente usados reagentes em excesso, tanto para tornar possível uma reação como para garantir o consumo total de um reagente valioso ou mesmo por fatores de segurança. Esse fato representa assim, uma fonte de incerteza nos resultados calculados pelo software, uma vez que existe uma propagação desses erros na medição das vazões de gás e ar entregues ao processo de combustão. Como outra fonte de incerteza, cita-se a medição da temperatura e pressão na qual ocorrem as reações químicas. Estes dois parâmetros definem o estado de equilíbrio do sistema reacional, o que pode ocasionar duas ou mais reações químicas simultâneas. Além disso, deve-se considerar a incerteza na temperatura medida pelos pirômetros que influenciam diretamente no cálculo do rendimento do forno. Nesse sentido, recomenda-se a calibração dos sensores de temperatura e medidores de pressão pois a exatidão dos cálculos está diretamente relacionada com a qualidade dos parâmetros medidos no forno.

Observa-se que a identificação e a minimização das fontes de incerteza representam um passo importante na obtenção de resultados satisfatórios e confiáveis e embora importante, uma análise quantitativa da influência dessas incertezas no resultado final do campo de temperatura da tira não é realizada nesse trabalho. Uma vez que os resultados obtidos satisfazem os objetivos propostos inicialmente, essa análise é sugerida como uma etapa complementar a ser realizada em atividades que representem a continuidade desse trabalho.

A seguir, no Capítulo VI, apresenta-se a conclusão deste estudo e algumas propostas de trabalhos futuros.

CAPITULO VI

Conclusão

Atualmente o aço silício possui um papel estratégico no interior dos equipamentos, pois proporciona o aumento da eficiência e da economia de energia elétrica e, conseqüentemente, gera uma maior redução de custos e um aumento substancial do desempenho das máquinas. Este fato, levou as siderúrgicas a trabalharem para aumentar a qualidade e a performance deste tipo aço, que tem sido fortemente empregado em núcleos de transformadores, reatores de potência, hidrogeradores e turbo geradores. Para elas, nada seria melhor do que poder simular e controlar a distribuição de temperatura na tira de aço.

É exatamente dar esta possibilidade às empresas o que pretende este trabalho, no qual é apresentado um modelo matemático para a simulação e controle do processo de recozimento de tiras de aço silício no interior de um forno tipo túnel denominado RB2. A metodologia proposta é simular o processo de combustão no alto-forno e o aquecimento da tira de aço que se move em seu interior.

Para isto foi desenvolvido o algoritmo computacional SIMCO - RB2, simulação e controle do forno RB2. Este software permite ao usuário reproduzir o processo de combustão, prevendo a composição, vazão e massa das fumaças a partir de parâmetros medidos no forno como vazão, pressão, temperatura e composição dos gases combustíveis. Além disso, o programa calcula a temperatura adiabática de chama e a temperatura de set-point no interior de cada zona do forno. Por fim, o usuário tem acesso à distribuição de temperatura na tira de aço em qualquer instante ou posição no interior do forno.

Mas, para garantir a precisão do simulador, o usuário deve calibrar o software determinando o rendimento do recuperador de calor, do forno e do processo de combustão a partir de parâmetros medidos no forno. Ressalta-se que a eficiência do software está relacionada à qualidade de sua calibração.

Neste trabalho, apresentou-se inicialmente o algoritmo e o programa desenvolvido; na seqüência foram realizados três testes experimentais, nos quais foram modificadas as condições no interior do forno e analisaram-se os efeitos na distribuição de temperatura da tira e no rendimento de cada processo.

Em uma análise de erros, discutiram-se as principais fontes geradoras de incerteza no modelo matemático e nos parâmetros medidos no forno. Ressalta-se que estas fontes de incerteza devem ser conhecidas e minimizadas para uma melhor precisão dos resultados estimados.

Conclui-se que o software SIMCO – RB2 apresenta-se como uma ferramenta promissora para a simulação do processo de recozimento de tiras de aço, possibilitando uma maior qualidade do produto final e a redução dos custos de produção.

Apresenta-se a seguir propostas para trabalhos futuros que permitam a continuidade e a otimização deste estudo.

Propostas para trabalhos futuros

- Realizar uma análise de erro verificando os efeitos de cada parâmetro na modelagem proposta como, por exemplo, a sensibilidade do modelo térmico às oscilações de temperatura dos pirômetros e a sensibilidade do modelo de combustão às variações da temperatura e vazão dos gases envolvidos.
- Realizar uma análise quantitativa do desempenho do software quando submetido às várias condições de operação.
- Implementar o modelo térmico tridimensional para que o software possa ser usado na simulação do recozimento de chapas mais espessas e de menor largura.
- Instrumentar o forno, calibrando os equipamentos e comparando os parâmetros medidos no forno antes e após a calibração.
- Determinar a emissividade do aço silício e as propriedades térmicas do aço silício em função de temperatura. Neste caso, as propriedades térmicas do aço silício podem ser comparadas com as propriedades utilizadas neste trabalho.
- Investigar ou modelar separadamente os processos de transferência de calor no forno e no processo de combustão, confrontando os resultados com os rendimentos propostos neste trabalho.

Referências Bibliográficas

Carvalho, S. R., Lima e Silva, S. M. M., Pinho, F. A. A., Machado, A. R., Guimarães, G., 2003, "Determinação da Temperatura na Interface Cavaco-Peça-Ferramenta Durante o Processo de Torneamento Usando a Técnica Simulated Annealing", 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, Brasil.

Fedorov, A. G., Lee, K. H., Viskanta, R., 1998, "Inverse Optimal Design of the Radiant Heating in Materials Processing and Manufacturing", Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 7, Issue 6, pp. 719-726.

Himmelblau, D. M., 1982, "Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering", by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 07632.

<http://revoindus.cjb.net/>

Revolução industrial - 28. 08. 2003

<http://www.culturabrasil.pro.br/revolucaoindustrial.htm>

Cultura Brasil – Revolução industrial - 28. 08. 2003

http://www.revistametalurgia.com.br/apresenta2.php?edicao=535&pag_id=298

Revista Metalurgia – 28. 08. 2003

Machado, A. C., Oliveira, G. F., 1961, "Sistema de Energia na Siderurgia", ABM, Ed.Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda.

Maliska, C. R., 1995, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.

Van Vlack, L.H., 1970, "Elements of Materials Science", Ed. Edgar Blucher Ltda, pp.147,151,301,302.

Vanderplaats, G. N., 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", by McGraw-Hill, Inc., pp. 43.

ANEXO I

Seção Áurea (Golden Section)

A seção áurea é uma das técnicas mais populares para a estimação de máximos, mínimos ou zero de funções de apenas uma variável. Algumas características particulares tornam-na muito interessante: i) não necessita de derivadas contínuas; ii) ao contrário da aproximação polinomial possui taxa de convergência conhecida e iii) é de fácil implementação (Vandreplaats, 1984).

Seja uma função F de uma variável X a ser minimizada assumindo-se que os limites inferiores e superiores em X sejam conhecidos por X_l e X_u respectivamente. Assumindo-se também que a função F seja avaliada para cada uma desses limites e obtendo-se, respectivamente, F_l e F_u , a (Fig. A.1) apresenta o processo de minimização.

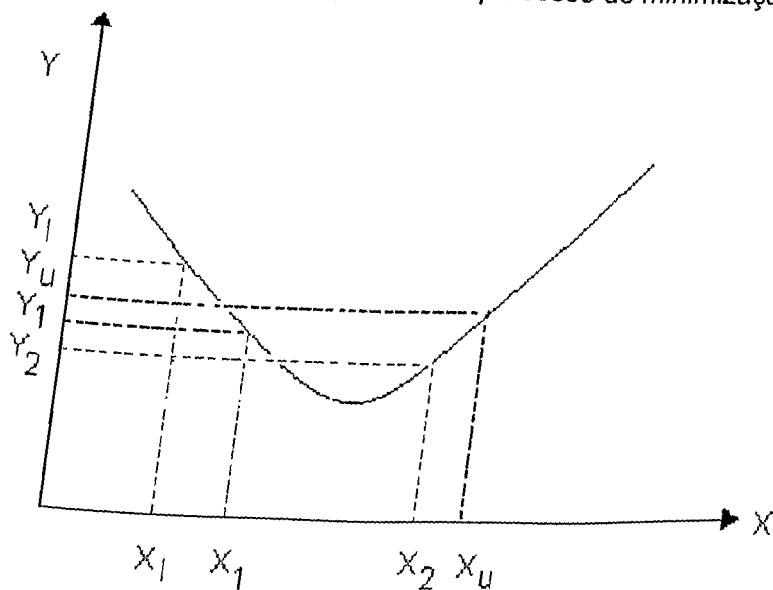


Figura A.1 - Método da seção áurea

Escolhendo dois pontos intermediários X_1 e X_2 sendo $X_1 < X_2$ e avaliando estes pontos obtém-se F_1 e F_2 . Uma vez que a função F é unimodal, X_1 ou X_2 irá formar um novo limite no mínimo. Neste caso, se F_1 for maior que F_2 então X_1 será o novo limite inferior obtendo-se assim um novo conjunto de limites, X_1 e X_u . Sendo F_2 maior que F_1 é evidente que X_2 será o novo limite superior e X_l e X_2 será o novo conjunto de limites.

Nesse exemplo, X_1 forma o novo limite inferior e a função F_3 é avaliada para um novo ponto X_3 . Comparando-se F_3 com F_2 o processo é repetido até que se obtenha o valor

mínimo desejado. Resta-nos ainda apresentar o método para a escolha dos pontos internos X_1 , X_2 , X_3 , para que os limites sejam reduzidos o mais rápido possível.

Uma forma de se obter uma função para a avaliação de X , é considerar uma mesma redução de limite para cada iteração. Ou seja, considerando simetria em relação ao centro do intervalo

$X_u - X_2 = X_1 - X_l$ ou ainda pode-se obter X_1 e X_2 de modo a garantir a relação:

$$\frac{X_1 - X_l}{X_u - X_l} = \frac{X_2 - X_1}{X_u - X_1}$$

A principal mensagem é que pode-se usar qualquer informação disponível para que se obtenha a solução ótima. Assim, pelo exemplo, se X_1 tornar-se o novo limite inferior X_l , então X_2 será o novo X_l de forma que a razão

$$\frac{X_2 - X_1}{X_u - X_1}$$

seja sempre a mesma. Por conveniência, faz-se $X_l = 0$ e $X_u = 1$ de modo que os valores de X_1 e X_2 agora sejam frações do intervalo $X_u - X_l$. Reconhecendo que $X_2 = 1 - X_1$ obtém-se

$$X_1 = \frac{1 - 2X_1}{1 - X_1} \text{ ou simplificando } X_1^2 - 3X_1 + 1 = 0$$

obtem-se (desprezando a raiz sem significado físico)

$$X_1 = 0.38187 \text{ e } X_2 = 0.61803$$

Assim, a famosa razão da seção áurea e resultados adicionais podem ser dados por

$$\frac{X_1}{X_2} = 0.61803 = X_2 = \frac{X_2}{X_1} - 1 \text{ e } X_1 = X_2^2$$

Para que o processo seja simplificado pode-se definir $X_1 = 0.38197$ e obter

$$\begin{aligned} X_1 &= (1 - \tau) X_l + \tau X_u \\ X_2 &= \tau X_l + (1 - \tau) X_u \end{aligned}$$

Critério de tolerância

Assume-se que o intervalo inicial $X_u - X_l$ deva ser reduzido a uma fração ε do valor inicial, ou seja,

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_u - X_l}$$

onde ΔX é a tolerância absoluta que por sua vez é independente do valor inicial do intervalo. Se a especificação da tolerância for desejada pode-se obter (Vanderplaats, 1984)

$$\varepsilon = (1 - \tau)^{N-3}$$

onde N é o número total de avaliações, incluindo as três iniciais.