

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

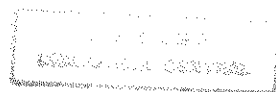
**“MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE
INCINERADOR DE RESÍDUOS PERIGOSOS DE
FORNO ROTATIVO COM PÓS-COMBUSTOR EM
ESTADO ESTACIONÁRIO E NÃO ESTACIONÁRIO”**

Autor: EDSON TOMAZ

Orientador: Prof. Dr. RUBENS MACIEL FILHO

**Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Química.**

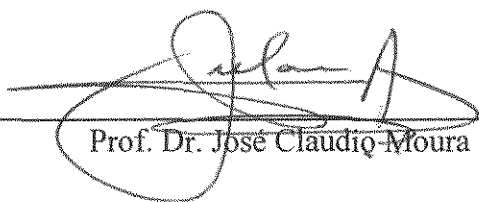
Campinas - SP
Março de 1998



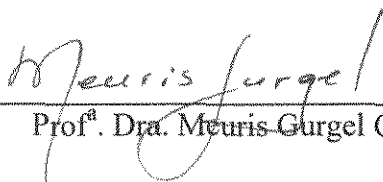
Tese defendida e aprovada, em 05 de março 1998, pela banca examinadora constituída pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
Orientador



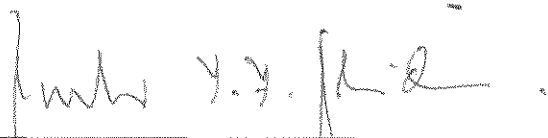
Prof. Dr. José Cláudio Moura



Prof.ª Dra. Meuris Gurgel Carlos da Silva




Prof. Dr. Darcy Odloak



Prof. Dr. Paulo Ignácio Fonseca de Almeida

Esta versão corresponde à versão final da Tese de Doutorado, defendida pelo Engº Químico Edson Tomaz, e aprovada pela comissão julgadora em 5 de março de 1998.



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
Presidente

AGRADECIMENTOS:

Ao Prof. Dr. Rubens Maciel Filho, pela orientação, pelo apoio e pela confiança depositada;

Ao Prof. Dr. José Claudio Moura, pelo incentivo contínuo;

Aos professores do Departamento de Processos Químicos da FEQ, pelo apoio e por permitir que eu priorizasse a conclusão do presente trabalho;

Ao Engº Takeo Jonas Fudihara, pelas discussões técnicas e trocas de experiências sobre modelagem matemática de incineradores;

E a todas as outras pessoas, que de alguma forma, mesmo sem saber, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

*Ao pequeno Rafael, que chegou.
À Antonio Tomaz, que partiu.*

RESUMO

Os fornos rotativos têm tido importantes aplicações em vários processos, especialmente para produção de cimento e incineração de resíduos sólidos perigosos. O Forno rotativo é o tipo de incinerador de resíduos perigosos mais empregado devido a sua capacidade de tratar materiais sólidos com uma ampla faixa de tamanho de partículas e proporcionar uma boa mistura do leito de sólido.

Vários trabalhos sobre transferência de calor em fornos rotativos foram publicados com aplicações em engenharia metalúrgica e produção de cimento. Os trabalhos mais importantes foram desenvolvidos por Jenkin and Moles¹¹, Gorog *et al*^{13,14,15} e Silcox e Pershing⁶. Este último, desenvolveu o modelo mais realístico e constitui o ponto de partida para o presente trabalho.

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo matemático para predizer os perfis axiais de temperatura e concentração dentro do forno rotativo e do pós-combustor do incinerador, em estado estacionário e não estacionário. Este modelo difere dos trabalhos anteriores principalmente porque considera a redução do volume do sólido devido à degradação térmica do resíduo, assim como, a combustão em fase gasosa dos compostos voláteis gerados. Além disso, a injeção de resíduo líquido no pós-combustor é permitida.

O modelo é unidimensional e considera as trocas radiativas entre zonas imediatamente adjacentes. As correntes de fluxo de massa são divididas em jato ou chama, gás anular e sólido. O forno é dividido axialmente em zonas de iguais comprimentos, onde cada uma das correntes é considerada completamente misturada e caracterizada por uma única temperatura, única composição e única vazão mássica.

A combustão dos voláteis oriundos do sólido em fase gasosa é considerada instantânea. A taxa de queima do resíduo é controlada pela transferência de massa dos voláteis a partir do sólido, expressa como taxa de perda de massa do sólido. Dentro de cada zona, o jato ou chama é representado como um cilindro de diâmetro constante e especificado para cada zona. O jato é dividido em três regiões: a região do estabelecimento do jato, a chama e a região pós-chama. Na região de estabelecimento do jato não ocorre combustão ou entrada de gás a partir da região anular. Na região pós-chama não há combustível auxiliar para combustão, mas pode haver a queima de voláteis oriundos do leito de sólido. Na chama, há a entrada de gás proveniente da região anular, cuja taxa é especificada para cada zona.

A temperatura da última seção transversal do forno rotativo é calculada e não pré-estabelecida como nos trabalhos anteriores. As capacidades caloríficas, condutividades térmicas e viscosidades são calculadas levando-se em conta as dependências com a temperatura e a composição.

Para resolver as equações de balanço de energia é adotado um procedimento matemático iterativo, e para a simulação numérica é desenvolvido um código FORTRAN.

Uma análise de sensibilidade paramétrica é realizada para 21 parâmetros e os efeitos sobre os perfis de temperaturas são analisados, para variações negativas e positivas de 10%. As capacidades caloríficas do gás e do jato resultaram nos maiores efeitos.

Devido à enorme variabilidade dos resíduos industriais, é analisada a influência de várias taxas de perda de massa sobre os perfis axiais de temperaturas. O trabalho também inclui a análise dos efeitos das taxas de entrada de gás na chama e da aproximação para a geometria da chama sobre o perfil de temperatura, assim como, um breve estudo sobre a redução do consumo de combustível por duas vias: pré-aquecimento do ar de combustão e enriquecimento com oxigênio.

ÍNDICE GERAL

Resumo	i
Índice geral	ii
Índice de tabelas	vii
Índice de figuras	viii
Nomenclatura	xvi

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1	Introdução	2
1.2	Objetivos do trabalho	4
1.3	Organização do trabalho	4

CAPÍTULO 2: CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1.	Introdução	7
2.2	Resíduos sólidos e a questão ambiental	7
2.2.1.	Definições	7
2.2.2	Tecnologias de tratamentos e de disposição final de resíduos sólidos	8
2.3	Incineração: uma alternativa	10
2.3.1	Tipos de incineradores	10
2.4.	Radiação térmica: conceitos básicos e analogias com circuitos elétricos	15
2.4.1.	Propriedades da radiação	15
2.4.2.	Fator de forma	16
2.4.3.	Analogia com circuitos elétricos - taxas de transferência de calor	17
2.5	Transferência de calor em forno rotativo	23
2.5.1.	Transferência de calor radiativo em fornos rotativos: trabalhos de Gorog, Adams e Brimacombe	23
2.5.2	Transferência de calor radiativo em fornos rotativos: trabalhos de Silcox & Pershing ⁶	29

CAPÍTULO 3: MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO TÉRMICA EM ESTADO ESTACIONÁRIO

3.1	Introdução	37
3.2	Considerações sobre o modelo	37
3.2.1	Geometria	37
3.2.2.	Jato ou chama	38
3.2.3.	Resíduos Sólidos	39
3.2.4.	Gás Anular	39
3.2.5.	Câmara de combustão secundária e câmara de interligação	40
3.2.6.	Considerações gerais comuns à todas regiões	41
3.2.7.	Principais diferenças em relação aos modelos apresentados por outros autores	41
3.3	Modelagem matemática e procedimento de cálculo para os processos de transferência de calor considerando a presença e a combustão de resíduos sólidos	42

3.3.1	introdução	42
3.3.2.	Definições das resistências à transferência de calor	47
3.3.3.	Cálculo dos potenciais do circuito análogo com a presença de sólido	51
3.3.4.	Cálculo das taxas de trocas de calor	63
3.4	Modelagem matemática e procedimento de cálculo para os processos de transferência de calor considerando a ausência de resíduos sólidos	64
3.4.1.	Introdução	64
3.4.2.	Cálculo dos potenciais do circuito análogo na ausência de sólido	67
3.4.3.	Cálculo das taxas de transferência de calor na ausência de sólido	72
3.5	Modelagem matemática e procedimento de cálculo para os processos de transferência de calor para as câmaras primária e secundária associadas.	73
3.6	Balanços de massa e energia para o sólido na região de chama na câmara primária	74
3.6.1.	Introdução	74
3.6.2.	Balanço de massa global para a corrente de sólido	74
3.6.3.	Balanço de energia para a corrente de sólido	76
3.6.4.	Balanço de energia para o sólido a baixas vazões mássicas de sólido	80
3.7	Balanços de massa e energia para o jato central na região de chama na câmara primária	80
3.7.1.	Balanço de massa global para o jato	80
3.7.2.	Balanço de energia	80
3.7.3.	Balanço de massa por componente no jato central na região da chama	82
3.7.4.	Cálculo da taxa de consumo de combustível	84
3.8	Balanços de massa e energia para o gás anular na região de chama na câmara primária	84
3.8.1.	Balanço de massa global para a corrente de gás anular	84
3.8.2.	Balanço de massa por componente no gás anular	85
3.8.3.	Balanço de energia na região gasosa anular	87
3.9	Balanço de massa e energia para o gás na região de pós-chama na câmara primária	89
3.9.1.	Introdução	89
3.9.2.	Zona de transição - cálculos das propriedades da corrente gasosa unificada	89
3.9.3.	Balanço de massa global para o gás na região pós-chama	90
3.9.4.	Balanço de massa por componente para o gás na região pós-chama	90
3.9.5.	Balanço de energia para o gás na região pós-chama	90
3.10	Balanço de massa e energia para a câmara de combustão secundária	91
3.10.1.	Introdução	91
3.10.2.	Balanços de massa e energia para o jato central na zona de injeção	91
3.10.3.	Balanços de massa e energia no gás anular na zona de injeção	94

CAPÍTULO 4: ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

4.1.	Introdução:	100
4.2	Simulação de referência	100
4.2.1.	Parâmetros e condições operacionais	100
4.2.2.	Resultados da simulação de referência	103
4.3.	Resultados para variações de 10% nos parâmetros selecionados	105

4.3.1	Seleção de parâmetros: variações de 10%	105
4.3.2	Análise comparativa dos resultados	106
4.4.	Resultados para variações de 50% nos parâmetros selecionados	135
4.5.	Influências do raio da chama e das taxas de entrada de gás na chama e de redução de massa do sólido sobre as distribuições de temperaturas	137
4.5.1.	Efeitos da forma de variação axial do raio da chama sobre as distribuições temperaturas	140
4.5.2.	Efeitos da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre as distribuições de temperaturas	142
4.5.3.	Efeitos da forma de variação axial da taxa de redução de massa de sólido sobre as distribuições de temperaturas	145
4.6	Análise e conclusão	147

CAPÍTULO 5: MODELAGEM MATEMÁTICA EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

5.1	Introdução:	150
5.2	Considerações sobre o modelo não estacionário	150
5.3	Desenvolvimento do modelo	150
5.3.1.	Balances de energia transiente nas correntes de sólido, gás e jato	151
5.3.2	Balances de energia nas paredes da câmara primária em regime não-estacionário, com a presença de sólidos	154
5.4	Cálculos dos potenciais	156
5.4.1	Cálculos dos potenciais na presença de sólidos	156
5.4.2	Cálculos dos potenciais na ausência de sólidos	158
5.5.	Métodos de cálculos das temperaturas e das taxas de transferência de calor	159

CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1	Introdução	161
6.2	Simulação em estado estacionário para as câmaras primária e secundária	161
6.3	Redução do consumo de combustível	165
6.4	Simulação em estado não estacionário de um incinerador de forno rotativo	167

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Contribuições à prática da incineração	178
Contribuições ao conhecimento científico	179
Sugestões para trabalhos futuros	182

APÊNDICES

Apêndice A: Áreas de trocas térmicas

1.	Introdução:	185
2.	Estimativa da área média da seção transversal ocupada pelo sólido:	185
3.	Cálculo da altura do leito de sólido:	185
4.	Ângulo Central determinado pelo resíduo sólido:	187
5.	Comprimento do arco subtendido pelo ângulo central :	187

6.	Comprimento da corda subtendida pelo ângulo central:	187
7.	Área exposta da parede interna (excusive a área coberta pelo sólido):	187
8.	Área da parede interna coberta pelo sólido:	187
9.	Área superficial plana do sólido :	187

Apêndice B: Estequiometrias das combustões dos resíduos e do combustível

1.	Introdução:	189
2.	Composição dos resíduos.	189
3.	Fator de geração dos produtos de combustão:	190

Apêndice C: Coeficientes convectivos análogos

1.	Introdução:	194
2.	Coeficiente de transferência de calor convectivo análogo:	194
2.	Coeficiente de transferência de calor condutivo análogo:	195

Apêndice D: Cálculo das propriedades físicas

1.	Introdução:	198
2.	Influência da temperatura sobre as propriedades físicas dos componentes puros:	198
2.1.	Capacidade calorífica:	198
2.2.	Condutividade térmica:	198
2.2.	Viscosidade:	199
3.	Influência da composição sobre as propriedades físicas da mistura gasosa:	200
3.1.	Viscosidade:	200
3.2.	Capacidade calorífica:	200
3.3.	Massa específica	200
3.4.	Condutividade térmica:	201
3.5.	Número de Prandtl	201

Apêndice E: Demanda e disponibilidade de oxigênio

1.	Introdução:	203
2.	Câmara de combustão primária:	203
2.1.	Cálculo da demanda de oxigênio na câmara primária	203
2.2.	Oxigênio disponível na câmara primária:	204
2.3.	Estimativa da fração mássica de oxigênio na saída da câmara primária	204
2.4.	Estimativas das vazões mássicas de ar de combustão quando a fração mássica de oxigênio na saída da câmara é especificada.	204
3.	Câmara de combustão secundária:	205
3.1.	Cálculo da demanda de oxigênio na câmara secundária	206
3.2.	Oxigênio disponível na câmara primária:	206
3.3.	Estimativa da fração mássica de oxigênio na saída da câmara secundária	206
3.4.	Estimativas das vazões mássicas de ar de combustão quando a fração mássica de oxigênio na saída da câmara é especificada.	206

Apêndice F: Fatores de forma

1.	Introdução:	209
2.	Fatores de forma envolvendo superfícies dentro da mesma zona:	209
3.	Procedimento para estimativas dos fatores de forma envolvendo superfícies de zonas adjacentes	212
4.	Procedimento para estimativas dos fatores de forma que envolvem superfícies de zonas adjacentes, na ausência de sólidos.	218

Apêndice G: Código FORTRAN de simulação numérica

1.	Introdução:	222
2.	Descrições das sub-rotinas	222
3.	Código FORTRAN de simulação numérica de incineradores de resíduos sólidos industriais composto de forno rotativo e pós-combustor, em estado estacionário e não estacionário	212
	Bibliografia	252
	Abstract	253

Índice de Tabelas

Tabela 2.1:	Resistências à transferência de calor do circuito análogo ⁶ .	32
Tabela 2.2:	Coefficientes convectivos e condutivos análogos para a transferência de calor no forno rotativo segundo Silcox & Pershing ⁶ .	33
Tabela 4.1:	Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão primária.	103
Tabela 4.2:	Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão secundária.	105
Tabela 4.3:	Variações médias percentuais das temperaturas para variações negativas e positivas de 10% dos parâmetros que apresentam efeitos pouco significativos.	135
Tabela 4.4:	Efeitos das variações positivas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.	135
Tabela 4.5:	Efeitos das variações negativas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.	136
Tabela 4.6:	Efeitos das variações positivas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas na região da chama na câmara de combustão primária.	136
Tabela 4.7:	Efeitos das variações negativas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas na região da chama na câmara de combustão primária.	136
Tabela 4.8:	Conjuntos de dados que representam aproximações das várias geometrias possíveis da chama.	137
Tabela 4.9:	Conjuntos de dados de taxas de redução de massa de resíduo sólido.	137
Tabela 4.10:	Conjuntos de dados de taxas de entrada de gás anular na chama.	138
Tabela 4.11:	Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária	142
Tabela 4.12:	Efeito da forma de variação axial do da taxa de entrada de gases na chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.	144
Tabela 4.13:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.	147
Tabela B.1:	Composição elementar nos resíduos e no combustível auxiliar.	189
Tabela B.2 :	Fator de geração dos produtos de combustão (massa de produto de combustão gerado por unidade de massa de combustível ou resíduo queimado), em condições estequiométricas e combustão completa	192
Tabela D.1:	Parâmetros da equação D.7	198
Tabela D.2:	Parâmetros da equação D.8	199
Tabela D.3 :	Parâmetros da equação D.9	199

Índice de figuras

Figura 2.1.:	Esquema de um aterro de resíduos perigosos.	8
Figura 2.2:	Representação esquemática de um incinerador de injeção líquida típico.	11
Figura 2.3:	Representação esquemática de um incinerador de forno rotativo típico.	12
Figura 2.4:	Representação esquemática de um incinerador de câmara fixa.	13
Figura 2.5:	Representação esquemática de um incinerador de leito fluidizado.	14
Figura 2.6	Esquema de um processo autotérmico de incineração por gaseificação e combustão combinadas ⁷	14
Figura 2.7:	Notação do fator de forma geométrico.	17
Figura 2.8:	Exemplo de um invólucro de 4 superfícies. Representação da radiação incidente na superfície “i” (a) e da radiação emitida da superfície “i”.	18
Figura 2.9 :	Exemplo de um invólucro de 4 superfícies. Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas entre as superfícies negras.	19
Figura 2.10:	Exemplo de um invólucro de 4 superfícies. Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas entre as superfícies cinzentas.	21
Figura 2.11:	Trocas radiativas entre duas superfícies separadas por um meio gasoso.	21
Figura 2.12:	Circuito elétrico equivalente que representa as trocas de calor entre duas superfícies separadas por um meio gasoso transparente.	23
Figura 2.13:	Diagrama esquemático de uma seção transversal do forno mostrando os caminhos da energia radiante emitida a partir do sólido (a) e (b)	24
Figura 2.14:	Representação esquemática do circuito elétrico resistivo para o forno rotativo onde o gás e as paredes são consideradas cinzentas e a superfície do sólido é considerada negra	24
Figura 2.15:	Diagrama esquemático de uma seção transversal de um forno rotativo mostrando os principais fluxos de calor para o sólido	26
Figura 2.16:	Esquema de um circuito térmico resistivo análogo ao circuito elétrico usado para prever os fluxos de calor dentro do forno rotativo	27
Figura 2.17:	Diagrama esquemático de seções transversais de um forno rotativo na região com chama e sem chama, mostrando os mecanismos de transferência de calor.	28
Figura 2.18:	Circuito elétrico análogo usado para prever os fluxos de calor na região da chama num forno rotativo	28
Figura 2.19:	Esquema das regiões e do zoneamento no forno rotativo considerados no modelo adotado por Silcox & Pershing.	29
Figura 2.20:	Circuito elétrico análogo para uma zona segundo o modelo de Silcox e Pershing ⁶ .	32
Figura 2.21:	Perfis de temperaturas obtidos por Silcox & Pershing ⁶ , para condições de referência.	35
Figura 3.1 :	Representação das correntes de fluxos do forno rotativo segundo o modelo adotado.	38
Figura 3.2 :	Representação unidimensional das correntes e das regiões da câmara de combustão primária, conforme o modelo adotado.	38
Figura 3.3 :	Representação unidimensional das correntes e das regiões da câmara de combustão secundária, conforme o modelo adotado.	40
Figura 3.4.:	Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas, convectivas e condutivas nas zonas intermediárias da câmara de combustão primária.	43

Figura 3.5:	Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas, convectivas e condutivas na primeira zona da câmara de combustão primária.	44
Figura 3.6:	Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas, convectivas e condutivas na última zona da câmara de combustão primária.	45
Figura 3.7:	Circuito elétrico análogo que representa os processos de transferência de calor na câmara de combustão primária.	46
Figura 3.8:	Circuito elétrico análogo que representa os processos de transferência de calor na câmara de combustão primária, sem alimentação de sólido ou com vazão mássica de sólido muito baixa.	65
Figura 3.9:	Circuito elétrico análogo que representa os processos de transferência de calor na câmara de combustão primária, com vazão mássica de sólido muito baixa a partir de uma determinada posição axial.	66
Figura 3.10:	Circuito elétrico análogo que representa os processos de transferência de calor nas câmaras de combustão primária, secundária e de interligação.	75
Figura 3.11:	Representação esquemática do balanço de massa no sólido úmido na zona i.	76
Figura 3.12:	Representação esquemática do balanço de energia no sólido na zona i.	76
Figura 3.13:	Representação esquemática do balanço de massa global para o jato na zona i.	80
Figura 3.14:	Representação esquemática do balanço de energia global para o jato na zona i.	81
Figura 3.15:	Balanço de massa por componentes no jato na região da chama e zona i.	83
Figura 3.16:	Representação esquemática do balanço de massa na região gasosa anular na zona i.	85
Figura 3.17:	Balanço de massa por componente na região gasosa na zona i.	86
Figura 3.18:	Representação esquemática do balanço de energia na região gasosa anular na zona i.	88
Figura 3.19:	Representação esquemática do balanço de massa global para o jato na zona de injeção da câmara secundária.	92
Figura 3.20:	Representação esquemática do balanço de energia global para o jato na zona de injeção da câmara secundária.	93
Figura 3.21:	Representação esquemática do balanço de massa global na região gasosa anular na zona de injeção da câmara de combustão secundária.	94
Figura 3.22:	Balanço de massa por componentes na região gasosa anular, na zona de injeção da câmara de combustão secundária.	95
Figura 3.23:	Representação esquemática do balanço de energia na região gasosa anular na zona de injeção da câmara secundária.	97
Figura 4.1:	Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão primária para a simulação de referência.	104
Figura 4.2:	Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão secundária para a simulação de referência.	104
Figura 4.3:	Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão primária.	108
Figura 4.4:	Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última	109

	seção transversal da câmara de combustão primária.	
Figura 4.5:	Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão primária.	110
Figura 4.6:	Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão primária.	111
Figura 4.7:	Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão secundária.	112
Figura 4.8:	Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão secundária.	113
Figura 4.9:	Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão secundária.	114
Figura 4.10:	Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão secundária.	115
Figura 4.11:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	117
Figura 4.12:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do jato (chama) na câmara de combustão primária.	117
Figura 4.13:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	117
Figura 4.14:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede externa da câmara de combustão primária.	118
Figura 4.15:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	118
Figura 4.16:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do jato (chama) na câmara de combustão secundária.	118
Figura 4.17:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão secundária.	119
Figura 4.18:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede externa da câmara de combustão secundária.	119
Figura 4.19:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão secundária.	119
Figura 4.20:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	120
Figura 4.21:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão primária.	120
Figura 4.22:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	120
Figura 4.23:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão secundária.	121
Figura 4.24:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão secundária.	121
Figura 4.25:	Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a	121

	temperatura da parede interna da câmara de combustão secundária.	
Figura 4.26:	Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	122
Figura 4.27:	Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	122
Figura 4.28:	Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura da mesma da câmara de combustão primária.	122
Figura 4.29:	Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do gás câmara de combustão secundária.	123
Figura 4.30:	Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do jato na câmara de combustão secundária.	123
Figura 4.31:	Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura da mesma da câmara de combustão secundária.	123
Figura 4.32:	Efeito das variações de 10% na emissividade do sólido sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão primária.	124
Figura 4.33:	Efeito das variações de 10% na emissividade do sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	124
Figura 4.34:	Efeito das variações de 10% na emissividade do sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	124
Figura 4.35:	Efeito das variações de 10% na emissividade da parede externa sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	125
Figura 4.36:	Efeito das variações de 10% na emissividade da parede externa sobre a temperatura do gás na câmara de combustão primária.	125
Figura 4.37:	Efeito das variações de 10% na emissividade da parede externa sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	125
Figura 4.38:	Efeito das variações de 10% na emissividade da parede interna sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	126
Figura 4.39:	Efeito das variações de 10% na emissividade da parede interna sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	126
Figura 4.40:	Efeito das variações de 10% na emissividade da parede interna sobre a temperatura da mesma da câmara de combustão primária.	126
Figura 4.41:	Efeito das variações de 10% na emissividade da chama sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	127
Figura 4.42:	Efeito das variações de 10% na emissividade da chama sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	127
Figura 4.43:	Efeito das variações de 10% na emissividade da chama sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	127
Figura 4.44:	Efeito das variações de 10% na emissividade do gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	128
Figura 4.45:	Efeito das variações de 10% na emissividade gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	128
Figura 4.46:	Efeito das variações de 10% na emissividade gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	128
Figura 4.47:	Efeito das variações de 10% na transmissividade do gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	129
Figura 4.48:	Efeito das variações de 10% na transmissividade do gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	129
Figura 4.49:	Efeito das variações de 10% na transmissividade do gás sobre a	129

	temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	
Figura 4.50:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-sólido sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	130
Figura 4.51:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	130
Figura 4.52:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	130
Figura 4.53:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	131
Figura 4.54:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	131
Figura 4.55:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	131
Figura 4.56:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo gás-sólido sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	132
Figura 4.57:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo gás-sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	132
Figura 4.58:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo gás-sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	132
Figura 4.59:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede externa-ambiente sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	133
Figura 4.60:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede externa-ambiente sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	133
Figura 4.61:	Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede externa-ambiente sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	133
Figura 4.62:	Efeito das variações de 10% no tempo de residência do sólido sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	134
Figura 4.63:	Efeito das variações de 10% no tempo de residência do sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	134
Figura 4.64:	Efeito das variações de 10% no tempo de residência do sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	134
Figura 4.65:	Conjuntos de dados que representam aproximações das várias geometrias possíveis da chama.	138
Figura 4.66:	Representação gráfica dos conjuntos de dados de taxas de entrada de gás na chama ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão.	139
Figura 4.67:	Representação gráfica dos conjuntos de dados de taxas de redução de	139

	sólidos ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão.	
Figura 4.68:	Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	140
Figura 4.69:	Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	140
Figura 4.70:	Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	141
Figura 4.71:	Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	141
Figura 4.72:	Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura da parede externa câmara de combustão primária.	141
Figura 4.73:	Representação gráfica do efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária	142
Figura 4.74:	Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.	143
Figura 4.75:	Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	143
Figura 4.76:	Efeito da forma de variação axial do da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	143
Figura 4.77:	Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	144
Figura 4.78:	Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura da parede externa câmara de combustão primária.	144
Figura 4.79:	Efeito da forma de variação axial do da taxa de entrada de gases na chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.	145
Figura 4.80:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão primária.	145
Figura 4.81:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.	146
Figura 4.82:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.	146
Figura 4.83:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.	146
Figura 4.84:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura da parede externa da câmara de combustão primária.	147
Figura 4.85:	Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.	147
Figura 5.1:	Representação esquemática do balanço de energia em estado não estacionário num elemento de volume de parede equivalente à zona “i”	155
Figura 6.1:	Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão primária, nas condições de referência.	161
Figura 6.2:	Fração mássica de oxigênio em função distância axial adimensional na câmara primária, nas condições operacionais de referência.	162
Figura 6.3:	Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão secundária, nas condições de referência.	162

Figura 6.4:	Fração mássica de oxigênio em função distância axial adimensional na câmara secundária, nas condições operacionais de referência.	163
Figura 6.5:	Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão primária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.	163
Figura 6.6:	Fração de mássica de oxigênio em função da distância axial adimensional na câmara primária expressa em %, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.	164
Figura 6.7:	Vazão mássica de voláteis não oxidado em função da distância axial adimensionalizada, na câmara primária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.	164
Figura 6.8:	Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão secundária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.	164
Figura 6.9:	Fração de mássica de oxigênio em função da distância axial adimensional na câmara secundária expressa em %, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.	165
Figura 6.10:	Vazão mássica de voláteis não oxidados em função da distância axial adimensionalizada, na câmara secundária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.	165
Figura 6.11:	Efeito do pré-aquecimento do ar primário sobre a redução do consumo de combustível.	166
Figura 6.12:	Efeito do enriquecimento do ar primário com oxigênio sobre a redução do consumo de combustível.	166
Figura 6.13:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura do jato, para a câmara primária.	167
Figura 6.14:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura do gás, para a câmara primária.	168
Figura 6.15:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura da parede interna, para a câmara primária.	168
Figura 6.16:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura parede externa, para a câmara primária.	168
Figura 6.17:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.	169
Figura 6.18:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.	169
Figura 6.19:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.	170
Figura 6.20:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura da parede interna ao longo do forno.	170
Figura 6.21:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura da parede externa ao longo do forno.	170
Figura 6.22:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.	171
Figura 6.23:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.	171
Figura 6.24:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.	172

Figura 6.25:	Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura parede interna ao longo do forno.	172
Figura 6.26:	Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno) sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.	173
Figura 6.27:	Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno) sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.	173
Figura 6.28:	Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno) sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.	174
Figura 6.29:	Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída) sobre o perfil de temperatura da parede interna ao longo do forno.	174
Figura 6.30:	Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.	175
Figura 6.31:	Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.	175
Figura 6.32:	Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.	175
Figura 6.33:	Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura da parede interna ao longo do forno.	176
Figura A.1:	Esquema da geometria do modelo adotado com as superfícies de trocas térmicas.	186
Figura A.2:	Dimensões do forno rotativo	186
Figura C.1:	Parede do forno na forma de casca cilíndrica.	195
Figura E.1:	Vazões mássicas e composições da câmara de combustão primária.	203
Figura E.2:	Vazões mássicas e composições da câmara de combustão secundária.	205
Figura F.1:	Representação geométrica das superfícies de trocas radiativas da parede do sólido e da superfície do jato hipotético.	210
Figura F.2:	Representação geométrica das superfícies de trocas radiativas da parede interna do forno e da superfície do jato hipotético.	211
Figura G.1:	Fluxograma simplificado do programa principal	227
Figura G.2:	Detalhe do programa principal: fluxograma simplificado da malha principal	228
Figura G.3:	Fluxograma simplificado da sub-rotina BMBE	229
Figura G.4:	Detalhe da sub-rotina BMBE: Fluxograma simplificado do balanço de massa e energia para o sólido	230
Figura G.5:	Fluxograma simplificado da sub-rotina RAD	231

NOMENCLATURA

A_{cob}	área superficial de contato entre a parede interna da câmara e o sólido, m^2
A_j	área superficial do jato cilíndrico, m^2
A_p	área superficial da parede interna da câmara exposta à radiação, m^2
A_q	área superficial da parede interna do queimador exposta à radiação, m^2
A_{ts}	área da seção transversal do leito de sólido, m^2
A_s	área superficial do leito de sólido exposta à radiação, m^2
C_{pa}	capacidade calorífica da água, $J/kg.k$
C_{pcb}	capacidade calorífica do combustível, $J/kg.k$
C_{pg}	capacidade calorífica da corrente gasosa avaliada na temperatura e composição do gás na zona i, $J/kg.k$
C_{psv}	capacidade calorífica dos voláteis oriundos do sólido, $J/kg.k$
C_{pss}	capacidade calorífica do sólido seco, $J/kg.k$
C_{pj}	capacidade calorífica do jato ou chama, $J/kg.k$
C_{psu}	capacidade calorífica do sólido úmido, $J/kg.k$
C_{pp}	capacidade calorífica da parede da câmara, $J/kg.k$
C_{prl}	capacidade calorífica do resíduo líquido, $J/kg.k$
E_s	poder emissivo do sólido
E_j	poder emissivo do jato ou chama
E_g	poder emissivo do gás
E_p	poder emissivo da superfície interna da parede do forno
E_{pe}	poder emissivo da superfície externa da parede do forno
E_q	poder emissivo da superfície interna da parede do queimador
E_{qe}	poder emissivo da superfície externa da parede do queimador
E_{pc}	poder emissivo da última seção transversal da câmara de combustão
F_{ab}	Fator de forma: Fração da energia que deixa a superfície “a” e atinge a “b”
$F_{cb}(j)$	vazão mássica de combustível alimentado na câmara primária ($j=1$) ou secundária ($j=2$), (kg/s)
$FM(j)$	razão entre a massa do produto (j) de combustão gerado pela massa elemento precursor (p.ex. : massa de CO_2 gerado por massa de C)
$H_g(i)$	entalpia da corrente de gás que entra na zona i, proveniente da zona anterior, J/s
$H_j(i)$	entalpia da corrente do jato que entra na zona i, proveniente da zona anterior, J/s
$H_{ss}(i)$	entalpia da corrente de sólido que entra na zona i, proveniente da zona anterior, J/s
$H_{ag}(i)$	entalpia da corrente de umidade associada ao sólido que entra na zona i, J/s
$H_{va}(i)$	entalpia da corrente de vapor d’água que entra na zona i, proveniente do sólido, J/s
$H_{sv}(i)$	entalpia dos produtos de volatilização e decomposição térmica oriundos dos resíduos sólidos na zona i, J/s
$H_{en}(i)$	entalpia do gás que sai da região anular e se transfere para o jato, J/s
H_{cb}	entalpia da corrente de alimentação de combustível na câmara secundária, J/s
H_{ap}	entalpia da corrente de alimentação de ar primário na câmara secundária, J/s
H_{as}	entalpia da corrente de alimentação de ar secundário na câmara secundária, J/s
H	altura do leito de sólido, m
H_L	porcentagem de perda de hidrogênio do combustível
h	coeficiente de transferência de calor convectivo, W/m^2K
h^*	coeficiente de transferência de calor convectivo análogo
J_s	radiosidade do sólido
J_p	radiosidade da superfície interna da parede do forno

J_{pe}	radiosidade da superfície externa da parede do forno
J_q	radiosidade da superfície interna da parede do queimador
J_{qe}	radiosidade da superfície externa da parede do queimador
k_p	condutividade térmica da parede, W/m/K
k_p^*	condutividade térmica da parede análogo
$Mg(i)$	vazão mássica da corrente de gás anular que entra na zona i , kg/s
$Mj(i)$	vazão mássica da corrente do jato que entra na zona i , kg/s
$Mss(i)$	vazão mássica da corrente de sólido que entra na zona i , kg/s
$Msv(i)$	massa de voláteis e produtos de decomposição térmica, oriundos do sólido, por unidade de tempo, que não sofreram combustão nas zonas anteriores, devido à deficiência de oxigênio, e que entram na zona i , kg/s
$Mpc(i)$	vazão mássica dos produtos de combustão, que entram na zona i , kg/s
$Mcb(i)$	vazão mássica do combustível auxiliar, que entra na zona i , kg/s
$Mas(j)$	vazão mássica de ar secundário alimentado na câmara primária ($j=1$) ou secundária ($j=2$), kg/s
$Map(j)$	vazão mássica de ar primário alimentado na câmara primária ($j=1$) ou secundária ($j=2$), kg/s
$Mliq$	vazão mássica de resíduo líquido alimentado na câmara secundária, kg/s
$Mjc(i,j)$	vazão mássica do componente “ j ” no jato cilíndrico na região da chama, na zona i , kg/s; em que j assume valores de 1 a 10, correspondentes aos produtos de combustão CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , P_2O_5 , HCl , HF , Br_2 , I_2 e O_2 , respectivamente.
$Mgc(i,j)$	vazão mássica do componente “ j ” no gás anular na região da chama, na zona i , kg/s; em que j assume valores de 1 a 10, correspondentes aos produtos de combustão CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , P_2O_5 , HCl , HF , Br_2 , I_2 e O_2 , respectivamente.
OC	razão oxigênio/combustível em condições estequiométricas
$PCrs$	poder calorífico do resíduo sólido, J/kg
$PCcb$	poder calorífico do combustível, J/kg
$PCrl$	poder calorífico do resíduo líquido, J/kg
$qg(i)$	calor total trocado pelo gás por unidade de tempo, J/s
$qj(i)$	calor total trocado pelo jato por unidade de tempo, J/s
$qs(i)$	calor total trocado pelo sólido por unidade de tempo, J/s
$qg(i)$	calor total trocado pela parede por unidade de tempo, J/s
$Qger(i)$	calor gerado pela queima do combustível auxiliar, por unidade de tempo, J/s
Qsu	calor total da corrente de sólido úmido na ausência de evaporação da água, por unidade de tempo, J/s
Q_{373}	entalpia da corrente de sólido úmido se esta estivesse a 373 K, J/s
R_{ab}	resistência à transferência de calor por radiação entre a superfície “ a ” e a “ b ”, ambas dentro da mesma zona;
R_{abp}	resistência à transferência de calor por radiação entre a superfície “ a ” e a “ b ”, sendo que “ b ” pertence à zona posterior (indicado por “ p ”) a qual pertence “ a ”;
R_{cab}	resistência à transferência de calor por convecção entre a superfície “ a ” e a “ b ”, ambas dentro da mesma zona
R_{aq}^i	resistência à transferência de calor por radiação entre a superfície “ a ” da zona “ i ” e a superfície da parede do queimador. O índice “ i ” pode ser 1 ou 2.
r_{ext}	raio externo do forno, m
r_{in}	raio interno do forno, m
t_{res}	tempo de residência do sólido, s
T_a	temperatura ambiente, K

T_{ebsv}	temperatura de ebulição dos voláteis presentes no sólido, K
$T_g(i)$	temperatura da corrente gasosa que entra na zona i, K
$T_j(i)$	temperatura da corrente de jato que entra na zona i, K
T_p	temperatura da parede interna, K
T_{pe}	temperatura da parede externa, K
T_{pc}	temperatura da última seção transversal da câmara de combustão, K
T_q	temperatura da parede interna do queimador, K
T_{qe}	temperatura da parede externa do queimador, K
T_{ref}	temperatura de referência, K
$T_s(i)$	temperatura da corrente de sólido que entra na zona i, K
V_j	volume do jato cilíndrico, m ³
V_g	volume do gás anular, m ³
V_{su}	volume do sólido com umidade, m ³
$y_g(i,j)$	fração mássica do componente “j” na corrente de gás anular, na zona i;
$y_j(i,j)$	fração mássica do componente “j” na corrente do jato, na zona i;
$Y_{O_2,ap}$	fração mássica de oxigênio na corrente de ar primário alimentado
$Y_{N_2,ap}$	fração mássica de nitrogênio na corrente de ar primário alimentado
$\Delta M_{cb}(i)$	massa de combustível auxiliar queimado por unidade de tempo, kg/s
$\Delta M_{ag}(i)$	vazão mássica de umidade que entra na zona i, proveniente do sólido, kg/s
$\Delta M_{ss}(i)$	vazão mássica de voláteis e produtos de decomposição térmica que deixa o sólido e entra na zona i, kg/s
ΔM_{liq}	vazão mássica de resíduo líquido alimentado no pós-combustor, kg/s
$\Delta M_{en}(i)$	vazão mássica da corrente de gás que sai da região anular e entra no jato, na zona i, como fonte de oxigênio secundário para a chama, kg/s
$\Delta M_{svc}(i)$	massa de voláteis e produtos de decomposição térmica, oriundos do sólido, por unidade de tempo, que sofrem combustão em condições estequiométrica de acordo com o oxigênio disponível, kg/s
ΔH_{va}	entalpia de vaporização da água, j/kg
$\Delta H_r(i)$	taxa de energia gerada pela combustão da corrente de voláteis oriundos do sólido, j/s
$\Delta H_{sv}(i)$	entalpia da corrente dos voláteis oriundos do sólido, j/s
Δz	comprimento da zona, m
α	absortividade, ou difusividade térmica do sólido, m ² /s
β	ângulo subtendido pela superfície plana do sólido, radianos
ε	emissividade
ε_λ	emissividade monocromática
σ	constante de Stefan-Boltzman, j/(s m ² K ⁴)
τ	transmissividade
ρ	refletividade
ρ_s	massa específica do sólido, kg/m ³
ρ_{su}	massa específica do sólido úmido, kg/m ³
ρ_g	massa específica do gás, kg/m ³
ρ_p	massa específica da parede, kg/m ³
ρ_j	massa específica do jato, kg/m ³

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Neste final de milênio, os assuntos relacionados com a preservação do meio ambiente estão, sem dúvida, entre os mais presentes nas pautas das discussões dos governos, das organizações internacionais, do meio científico e principalmente das organizações não governamentais. A preocupação com a qualidade ambiental no futuro é muito grande, pois está fundamentada nas constatações da tendência de esgotamento dos recursos naturais e das degradações já ocorridas ou em curso. O que mais preocupa os ambientalistas é que, caso não hajam ações de governo no sentido de reverter este quadro, a perspectiva é de agravamento acelerado devido à tendência de aumento da população e da atividade econômica.

As ações necessárias para a atenuação destes graves problemas ambientais, devem ter efeito em várias frentes, com a participação dos governos, da comunidade científica, da indústria e principalmente da população. Dentre as medidas que podem ser adotadas, muitas delas dizem respeito a mudança de procedimento, como por exemplo a segregação de resíduos, que cria condições para o reuso ou a para a reciclagem.

A comunidade científica, por sua vez, tem importância fundamental neste processo, fazendo diagnósticos e prognósticos ambientais, fornecendo subsídios para as ações de governo, desenvolvendo tecnologias limpas, desenvolvendo tecnologias de recuperação ambiental, de sistemas de tratamento e controle de poluição, e aperfeiçoando e otimizando os processos existentes visando a redução da emissão de poluentes.

Os resíduos sólidos, de maneira geral, estão entre os problemas ambientais cujas soluções são as que apresentam as maiores dificuldades, tanto em termos de adequação tecnológica como em termos de viabilidade de custo. Dentro do universo formado pelos resíduos sólidos, pode-se agrupá-los em função da origem, como por exemplo, os resíduos domésticos, os resíduos hospitalares e os resíduos industriais. Cada um deles tem as suas peculiaridades e podem ter soluções ideais diferenciadas em função das quantidades geradas, das características de periculosidade, da presença de precursores de compostos altamente perigosos, da sua composição e dos custos de tratamento ou disposição final.

Há vários sistemas possíveis para destino ou tratamento de resíduos, entre os quais, pode-se citar, os aterros sanitários e industriais, o reprocessamento, a compostagem, o coprocessamento e a destruição térmica. A destruição térmica de resíduos, mediante incineração em plantas construídas especialmente para esse fim ou mediante a queima em fornos de cimentos, dita co-incineração, têm sido as alternativas tecnicamente mais aceitas para destruição de resíduos, principalmente para os resíduos considerados perigosos, apesar de serem as mais caras entre as disponíveis no mercado.

Entre os vários tipos de incineradores existentes, destacam-se os de forno rotativo, de câmara fixa, de leito fluidizado e de injeção líquida. O incinerador de forno rotativo é o mais amplamente utilizado pois pode tratar uma grande variedade de resíduos orgânicos perigosos, nos estados sólido, semi-sólido (lamas, lodos, etc) e líquidos, combinando altas temperaturas e mistura contínua. Há também tecnologias de incineração que buscam a minimização ou mesmo a eliminação da queima de combustíveis fósseis como auxiliares, priorizando o uso de biomassa como fonte de energia auxiliar, como é o caso do processo de incineração por gaseificação e combustão combinadas.

No Brasil, os incineradores são tipicamente empregados para destruição de resíduos sólidos industriais, de resíduos hospitalares e de solos contaminados. As exigências ambientais crescentes e a necessidade de eliminação de passivos ambientais estão aumentando a demanda por sistemas de

tratamento e de disposição final de resíduos industriais. Para suprir esta demanda, estão sendo empregados no Brasil, duas alternativas principais de destruição de resíduos industriais: a incineração térmica e a co-incineração em fornos de cimento. A co-incineração em fornos de cimento apresenta limitações quanto ao tipo de resíduo, isto é, só é permitido o emprego deste sistema de tratamento se o resíduo a ser destruído substituir parte do combustível queimado no forno ou parte da matéria prima da fabricação do cimento, e além disso, se os contaminantes não alterarem a qualidade do cimento, de acordo com norma específica. Em outras palavras, resíduos que não possuem poder calorífico elevado, que não tenham em sua constituição uma quantidade significativa de alguma matéria prima empregada na fabricação do cimento ou que tenham algum constituinte que possa alterar a qualidade do produto final não podem ser tratados por meio de co-incineração em fornos de cimento.

O incinerador de resíduos industriais tem suas restrições relacionadas com o atendimento aos padrões ambientais, de acordo com o aprovado em função de um teste de queima executado segundo norma da ABNT. Os co-incineradores estão sujeitos às mesmas restrições e padrões legais estabelecidos nestas normas da ABNT.

O mercado atual de destruição térmica de resíduos industriais está dividido entre estas duas alternativas, com vantagens em termos de custos para a co-incineração em fornos de cimentos e com vantagens em termos de versatilidade para os incineradores industriais, que queimam resíduos de um número maior de fontes geradoras. Para contornar as limitações da co-incineração, já há no mercado empresas que fazem misturas de resíduos sólidos e líquidos de forma a produzir um novo resíduo com características que atendam às necessidades, principalmente de poder calorífico, o que tem ampliado muito este mercado.

Algumas empresas que são grandes geradoras de resíduos sólidos optaram por implantar o seu próprio incinerador, em geral, com capacidade acima das suas necessidades, para poder prestar serviço a terceiros gerando receita no intuito de reduzir o custo de destruição do seu próprio resíduo. Estas empresas optaram pela incineração por considerarem a melhor alternativa técnica e procuram investir na redução do elevado custo operacional anual, que pode chegar a 50% do investimento fixo inicial.

A incineração não é uma tecnologia nova e tem sido usada para tratamento de resíduos orgânicos perigosos há muitos anos. Entretanto, a variabilidade na composição dos resíduos e as condições operacionais severas resultam em muitos problemas práticos e na necessidade de alta performance e de robustez do equipamento.

Diante deste cenário, é bastante evidente que são duas as grandes necessidades de conhecimento para a tecnologia de incineração: estudo das condições operacionais para aprimorar a performance do equipamento e evitar transientes indesejáveis; e estudos visando a redução de custos operacionais, mediante análise dos parâmetros de operação e de projeto.

Portanto, a grande motivação industrial do presente trabalho consiste no desenvolvimento de um simulador que permita o estudo de mudanças de condições operacionais, de parâmetros de projeto ou até mesmo de alterações de processo e de estratégia de controle que resultem em redução do custo operacional e na melhoria da performance do equipamento. O modelo e o simulador desenvolvidos trazem importante contribuição no que tange à possibilidade de exploração dos limites operacionais de incineradores e análises dos resultados, sem os riscos de segurança e de possíveis impactos ambientais associados aos testes realizados na planta industrial.

Do ponto de vista científico, o presente trabalho tem a sua importância principal relacionado com o fato de desenvolver um modelo matemático e um simulador, aplicado a um incinerador de forno rotativo associado a um pós-combustor, aplicando um modelo de radiação reportado na literatura, considerando a alimentação e a queima de resíduos sólidos e líquidos, nas câmaras primária e secundária respectivamente, em estado estacionário e não estacionário. Além disso, um

estudo de sensibilidade paramétrica é realizado, permitindo selecionar os parâmetros mais importantes em termos de efeitos sobre os resultados, como as capacidades caloríficas, que neste trabalho, são consideradas dependentes da composição e da temperatura. São testadas também algumas variações das hipóteses relacionadas com a fluidodinâmica da chama, como taxa de entrada de gás anular na chama e o diâmetro da chama, assim como, com a cinética de destruição do resíduo, expressa como taxa de perda de massa de sólido. Finalmente, um breve estudo é realizado para verificar a redução do consumo de combustível mediante duas estratégias: o pré-aquecimento do ar de combustão e o enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, com o objetivo de exemplificar a potencialidade de aplicação do simulador.

Entre outras aplicações possíveis do simulador desenvolvido no presente trabalho, destacam-se ainda o emprego em projetos de câmaras de combustão e incineradores, no treinamento de operadores, como ferramenta de ensino e para planejamento de operação de plantas de incineração.

1.2 Objetivos do trabalho

Os objetivos deste trabalhos podem ser resumidos por:

- propor um modelo matemático em estado estacionário e um simulador computacional para representar os processos de transferência de calor e de destruição térmica dos resíduos em um incinerador de forno rotativo associado a um pós-combustor;
- propor um modelo matemático em estado não estacionário e respectivo simulador numérico para o mesmo caso;
- realizar estudos de sensibilidade paramétrica, identificando os principais parâmetros do modelo, mediante a análise dos efeitos das variações destes sobre os perfis de temperaturas;
- estudar a influência das variações de algumas hipóteses, principalmente a cinética da redução de massa do resíduo, a taxa de entrada de ar secundário na chama e a geometria da chama, sobre os perfis axiais de temperatura nas câmaras;
- Estudar a influência do pré-aquecimento do ar de combustão sobre a redução do consumo de combustível ;
- Estudar a influência do enriquecimento do ar de combustão com oxigênio sobre a redução do consumo de combustível;

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

O **primeiro capítulo** (*Introdução*) trata da introdução, procurando ressaltar a motivação, a importância e as aplicações do presente trabalho, assim como define os objetivos e a forma de organização do presente documento.

No **segundo capítulo** (*Conceitos básicos e revisão da literatura*), é apresentado resumidamente uma revisão da literatura, com comentários sobre aspectos ambientais relacionados com os resíduos sólidos, as tecnologias de tratamento e de disposição final de resíduos sólidos e apresenta a incineração como a tecnologia mais amplamente aceita para o tratamento de resíduos sólidos perigosos. Neste capítulo, consta ainda, uma breve revisão da teoria básica de radiação e de aplicação da analogia com circuitos elétricos para o cálculo dos potenciais e das taxas de transferência de energia, assim como, breves resumos dos trabalhos publicados na literatura relacionados com presente trabalho.

O *terceiro capítulo* (*Modelagem matemática em estado estacionário*) é dedicado ao desenvolvimento do modelo matemático em estado estacionário, para as câmaras de combustão primária e secundária do incinerador, a partir do qual é elaborado a rotina de cálculo e o código de simulação numérica.

No *quarto capítulo* (*Estudo de sensibilidade paramétrica*), é apresentado o estudo de sensibilidade paramétrica e das variações nas hipóteses relacionadas com a fluidodinâmica da chama e com a cinética de destruição do resíduo sólido, empregando o simulador desenvolvido mencionado no terceiro capítulo.

O *quinto capítulo* (*Modelagem matemática em estado não estacionário*) trata do desenvolvimento do modelo matemático e do simulador numérico em estado não estacionário, com base no modelo em estado estacionário desenvolvido no capítulo 3.

O *sexto capítulo* (*Resultados e discussões*) apresenta alguns resultados e discussões interessantes em estado estacionário e transiente, empregando o simulador desenvolvido.

O *sétimo capítulo* (Conclusões e sugestões) é dedicado às conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, os *apêndices*, que reúnem deduções, cálculos e informações, empregados no desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO 2: CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA

CAPÍTULO 2: CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

A modelagem matemática e a simulação do processo de incineração de resíduos sólidos perigosos envolve, em seu desenvolvimento, o conhecimento de vários conceitos da ciência da engenharia química, principalmente de transferência de calor, cinética química, e balanços de massa e energia; e de engenharia ambiental, principalmente de conceitos de resíduos sólidos, suas características e classificações, padrões e exigências ambientais.

Com o objetivo de auxiliar o leitor no entendimento do presente trabalho, neste capítulo, apresenta-se vários conceitos básicos relacionados com resíduos sólidos e radiação; descreve-se os principais tipos de projetos de incineração, discute-se os trabalhos de modelagem matemática de fornos rotativos publicados na literatura e aborda-se algumas questões ambientais relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos e à implantação de sistemas de incineração.

2.2 Resíduos sólidos e a questão ambiental

Na década de 80, o gerenciamento de resíduos sólidos e a recuperação de locais contaminados foram tópicos ambientais destacados e, parece, continuarão sendo durante os anos 90. A opinião pública tem se mobilizado e manifestado a sua preocupação face às inúmeras descobertas de acidentes ambientais resultantes de práticas inadequadas de disposições de resíduos no meio ambiente. Como consequência, novas Leis e Normas específicas sobre a questão foram promulgadas, com impactos sem precedentes no campo do gerenciamento e controle de poluição por resíduos sólidos. Foi estabelecida uma clara preferência para as tecnologias de recuperação que poderiam reduzir, de forma significativa e permanente, o volume, a toxicidade ou a mobilidade das substâncias perigosas, poluentes e contaminantes¹.

Alternativas de disposições e tratamentos mais baratas e tradicionais, como aterros sanitários, disposição em lagoas e injeção em poços profundos estão sendo substituídos em grande parte, pela minimização de resíduos na fonte de geração, reutilização do resíduo, tratamento físico-químico e biológico, incineração e métodos de solidificação e estabilização química¹.

2.2.1 Definições

São considerados resíduos sólidos, segundo a Norma “NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação”⁽²⁾, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, os resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam das atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis face à melhor tecnologia disponível.

Um resíduo pode ser considerado perigoso, dependendo de suas propriedades físicas, químicas e infecto-contagiosas e do seu potencial em proporcionar risco à saúde pública, aumentando ou acentuando, de forma significativa, a mortalidade ou a incidência de doenças, ou ao meio ambiente, devido ao manuseio ou disposição de forma inadequada.

Segundo a citada norma, um resíduo pode ser classificado como perigoso (classe I), não inerte (classe II) e inerte (classe III).

Os resíduos perigosos são aqueles que apresentam periculosidade conforme mencionado acima, ou apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade ou toxicidade, de acordo com os critérios estabelecidos na Norma NBR 10004². Esta Norma contém anexos onde constam listagens de resíduos sólidos reconhecidamente perigosos, de fontes específicas (listagem nº 2, Anexo B) e não específicas (listagem nº 1, Anexo A), listagens de substâncias que conferem periculosidade aos resíduos (listagem nº 4, Anexo D), substâncias agudamente tóxicas (listagem nº 5, Anexo E), entre outras.

Os resíduos inertes, classe III, são definidos na Norma NBR 10004, como aqueles que, quando amostrados de forma significativa, segundo norma específica para amostragem de resíduos (NBR 10007⁽³⁾), e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme Teste de Solubilização, segundo a Norma NBR 10006⁴, tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água (listagem nº 8, Anexo H, da NBR 10004), excetuando os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Os resíduos classificados como não inertes, Classe II, são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo perigoso (classe I) nem de inerte (classe III), nos termos da mesma norma.

2.2.2 Tecnologias de tratamentos e de disposição final de resíduos sólidos

São várias as tecnologias para tratamento ou disposição final de resíduos sólidos implantadas nos países industrializados, inclusive no Brasil. Essas tecnologias diferenciam-se umas das outras pelas características dos resíduos para os quais foram projetados e pelo custo de implantação e operação. Algumas dessas alternativas são discutidas sucintamente a seguir.

• Aterros industriais

O aterro é uma forma de disposição de resíduos no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, garante um confinamento seguro em termos de poluição ambiental e proteção à saúde pública, cujo esquema básico pode ser visto na figura 2.1.

A disposição indiscriminada de resíduos no solo pode causar poluição do ar, pela exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou material particulado; poluição das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela ação das águas de chuva e poluição do solo e das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados.

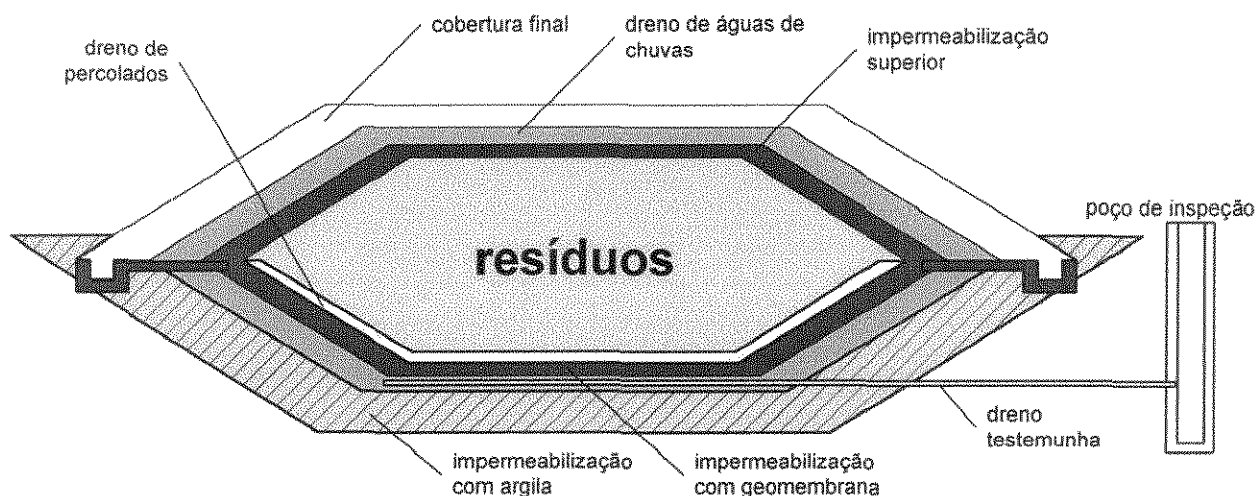


Figura 2.1.: Esquema de um aterro de resíduos perigosos.

Os aterros podem ser denominados de aterros sanitários, quando projetados e implantados especialmente para a disposição de resíduos sólidos urbanos, ou aterros industriais, quando projetados e implantados especialmente para a disposição de resíduos sólidos industriais.

Apresentam-se como a forma de destino de resíduos mais barata e de tecnologia mais conhecida, mas não servem para a disposição de todos os tipos de resíduos. São passíveis de disposição em aterro os resíduos cujos poluentes neles contidos podem sofrer algum tipo de atenuação no solo, seja por processos de degradação, ou retenção (filtração, adsorção, troca iônica, etc).

Os resíduos inflamáveis, reativos, oleosos, orgânicos persistentes ou que contenham líquidos livres não devem ser dispostos em aterros.

• Encapsulamento

O encapsulamento, processo muitas vezes dito como solidificação, estabilização ou fixação, consiste em estabilizar os resíduos perigosos e transforma-los em materiais menos poluentes, através da adição de aglomerantes ou produtos químicos. Este método pode envolver reações químicas e processos físicos e visa atingir os seguintes objetivos:

- a) melhorar as características físicas e de manuseio dos resíduos;
- b) diminuir a área superficial através da qual possa ocorrer a transferência ou a perda de constituintes poluentes;
- c) limitar a solubilidade de qualquer constituinte no resíduo e
- d) destoxificar os constituintes poluentes.

As principais técnicas de encapsulamento de resíduos atualmente encontradas são basicamente as seguintes:

- a) técnicas baseadas na adição de cimento;
- b) técnicas baseadas na adição de cal ou outros materiais pozolâmicos (exclusive cimento);
- c) técnicas que envolvem a inserção do resíduo em materiais plásticos ou termofixos;
- d) encapsulamento em invólucro inerte;
- e) tratamento de resíduos para obtenção de materiais que possam auto-solidificar sem adição de outros constituintes e
- f) vitrificação do resíduo com sílica.

• Incineração

A incineração é um processo de engenharia que emprega a decomposição térmica via oxidação à alta temperatura (normalmente 900°C ou maior) para destruir a fração orgânica do resíduo e reduzir volume¹. A incineração ocorre em câmaras de combustão, especificamente projetadas, cujos diferentes projetos e características são discutidos em itens subsequentes.

De todas as tecnologias de tratamentos consagradas, os sistemas de incineração, adequadamente projetados, são capazes do mais alto grau de destruição e controle para a mais ampla faixa de resíduos perigosos. Detém-se uma grande experiência de projeto e parâmetros operacionais nestas áreas e há uma grande variedade de sistemas comerciais disponíveis.

Embora a destruição térmica ofereça várias vantagens sobre as práticas alternativas de tratamento de resíduos perigosos e colabore com a questão do gerenciamento de resíduos, houve, simultaneamente, um fortalecimento da oposição do público quanto ao licenciamento e o uso de operações de destruição térmica nos últimos anos¹.

2.3 Incineração: uma alternativa

Purificação com fogo é um conceito antigo. Suas aplicações estão registradas nos primeiros capítulos da história. A palavra em hebreu para inferno, Gehenna, é derivada de uma frase antiga, geben Hinnom, ou o vale do filho de Hinnom, uma área fora de Jerusalém onde o entulho da cidade era queimado e era o local que servia para sacrifícios a Moloch II¹. Ainda hoje, resíduos são queimados no solo ou em buracos através do mundo. Aí incluem-se as queimas ao ar livre dos resíduos agrícolas, bem como a queima de rejeitos domésticos em áreas rurais e até mesmo urbanas¹.

Na Idade Média, uma inovação foi o “vagão de fogo”, o primeiro incinerador móvel¹. Era um vagão retangular de madeira protegido internamente por uma camada de argila. O vagão puxado por cavalos andava pelas ruas e os moradores jogavam seus rejeitos dentro da fogueira móvel.

A incineração como se conhece, começou há cerca de 100 anos, quando o primeiro “destruidor” de lixo doméstico municipal foi instalado em Nottingham, Inglaterra. O uso da incineração nos Estados Unidos cresceu rapidamente a partir da primeira instalação na Governor’s Island, em Nova Iorque, para mais de 200 unidades em 1921. A maioria destas unidades eram alimentadas por batelada e mal operadas, tendo algumas delas recuperadores de calor para geração de vapor. Até os anos 50, os incineradores e seus característicos odores e fumaças eram aceitos como um mal necessário e a operação destes era geralmente conduzida da forma mais econômica possível. Contudo, com o fato da fumaça da chaminé deixar de ser um símbolo de prosperidade e o surgimento das regulamentações de poluição do ar, os sistemas de incineração melhoraram sensivelmente. Estas melhorias incluíram a alimentação contínua, o aperfeiçoamento do controle da combustão, o uso de câmara múltiplas de combustão, os projetos para recuperação da energia e a instalação de sistemas de controle de poluição do ar¹.

A incineração tem sido empregada para a disposição de resíduos químicos industriais (resíduos perigosos) nos últimos 50 anos. As primeiras unidades tomaram emprestado a tecnologia dos incineradores de resíduos municipais, mas, devido à baixa performance e a quase impossibilidade da adaptação destas primeiras unidades tipo grade, houve redirecionamento para o uso dos fornos rotativos. Vários dos primeiros fornos rotativos estavam na Alemanha Ocidental. A primeira unidade de forno rotativo dos Estados Unidos foi instalada em 1948, na planta da Dow Chemical Company, em Midland, Michigan¹.

2.3.1 Tipos de incineradores

Diferentes tecnologias de incineração tem sido desenvolvidas para tratar os vários tipos e formas físicas dos resíduos perigosos. Os quatro projetos mais comuns de incineradores são os de injeção líquida (às vezes combinado com incineração de gases e vapores), fornos rotativos, câmara fixa e os de leito fluidizado. Entretanto, há outras tecnologias eficientes de incineração, como a que combina gaseificação e combustão, empregando biomassa como fonte de energia, com balanço global mais positivo do ponto de vista ambiental. Estes projetos são comentados brevemente a seguir.

I. Incineradores de injeção líquida

A forma física do resíduo e seu teor de cinzas determina o tipo de câmara de combustão recomendada. A maioria dos sistemas de incineração tem seu nomes derivados do tipo de câmara de combustão empregado.

Incineradores de injeção líquida ou câmaras de combustão são aplicáveis quase que exclusivamente para resíduos líquidos bombeáveis. Essas unidades (figura 2.2) são usualmente simples cilindros revestidos internamente de refratários (verticais ou horizontais) e equipados com um ou mais queimadores. Os resíduos líquidos são injetados por meio de queimadores, atomizados em pequenas gotículas e queimados em suspensão. Os queimadores, assim como os bicos de aspersão separados da injeção de resíduos, podem estar direcionados axialmente, radialmente ou tangencialmente em relação à chama¹.

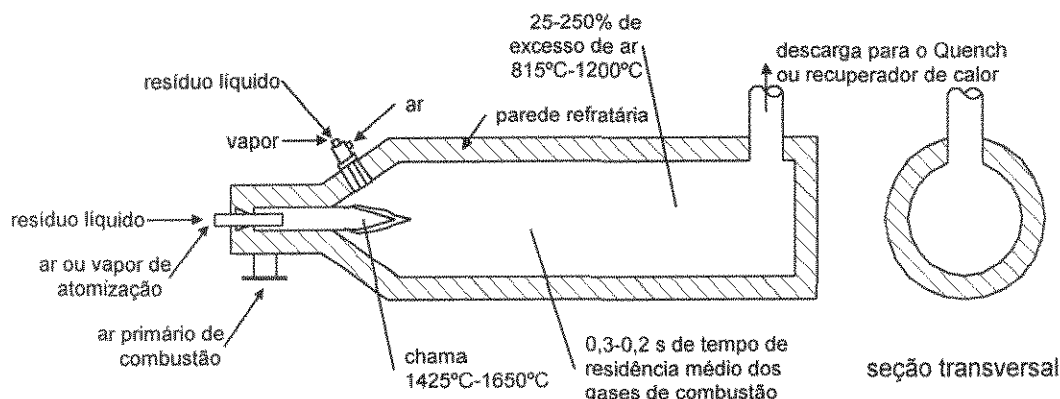


Figura 2.2: Representação esquemática de um incinerador de injeção líquida típico.

A qualidade da atomização é o ponto crítico para se obter alta eficiência de destruição em combustores líquidos. A atomização pode ser obtida com ar ou vapor em baixa pressão (1-10 psig), ar ou vapor de alta pressão (25-100 psig) ou meios mecânicos (hidráulicos) que usam orifícios especialmente projetados (25-450 psig)¹.

Para resíduos líquidos contendo alto teor de sais inorgânicos e de cinzas fundíveis, o incinerador de injeção líquida vertical é mais indicado, enquanto que o vertical o é para resíduos de baixo teor de cinzas¹.

II. Incineradores de forno rotativo

Os fornos rotativos tem sido empregados há décadas como calcinadores em vários processos, especialmente na produção de cimento. Mais recentemente, os fornos rotativos foram adotados como meio efetivo de destruição de resíduos perigosos, com a grande vantagem de operar com materiais sólidos numa grande faixa de tamanhos⁶.

Os incineradores de fornos rotativos são amplamente empregados e altamente versáteis, podendo destruir resíduos sólidos, lamas, resíduos em continentes e líquidos. A figura 2.3 apresenta uma representação esquemática de um incinerador de forno rotativo. O forno rotativo propriamente dito consiste de um cilindro quase horizontal, ligeiramente inclinado, revestido internamente com refratários. A rotação do forno tem a função de promover a mistura do resíduo sólido e o seu transporte axial, o qual pode ser co-corrente ou contracorrente em relação ao fluxo de gases. O tempo de residência dos resíduos no forno varia, em geral, de 30 a 90 minutos, controlado pela sua velocidade rotacional (entre 0,5 e 1 revolução por minuto) e pela taxa de alimentação do resíduo. Alguns incineradores possuem barreiras interna para retardar o transporte do resíduos e aumentar o tempo de residência. A taxa de alimentação é também usada para ajustar a quantidade de resíduo que está sendo processada no forno, cujo limite superior é em torno de 20% do volume do mesmo¹.

Os resíduos sólidos alimentados ao forno rotativo, são convertidos em gases, resultantes de processos de volatilizações, destilações destrutivas e reações de combustão parciais. Esses gases, são em seguida, direcionados para o pós-combustor, onde são queimados de forma completa na

presença de excesso de oxigênio. Na interligação entre o forno rotativo e o pós-combustor, há a eliminação de cinzas remanescentes do resíduo sólido alimentado. Os pós-queimadores podem ser alinhados horizontal ou verticalmente, e suas funções básicas tem os mesmos princípios do incinerador de injeção líquida. É comum nas plantas industriais de incineração, realizar-se a queima de resíduos líquidos perigosos no pós-combustor, através de queimadores independentes. Ambas as câmaras de combustão, o forno rotativo e o pós-combustor, são, em geral, equipados com sistema de injeção e queima de combustível auxiliar, para elevar e manter a temperatura de operação desejada.

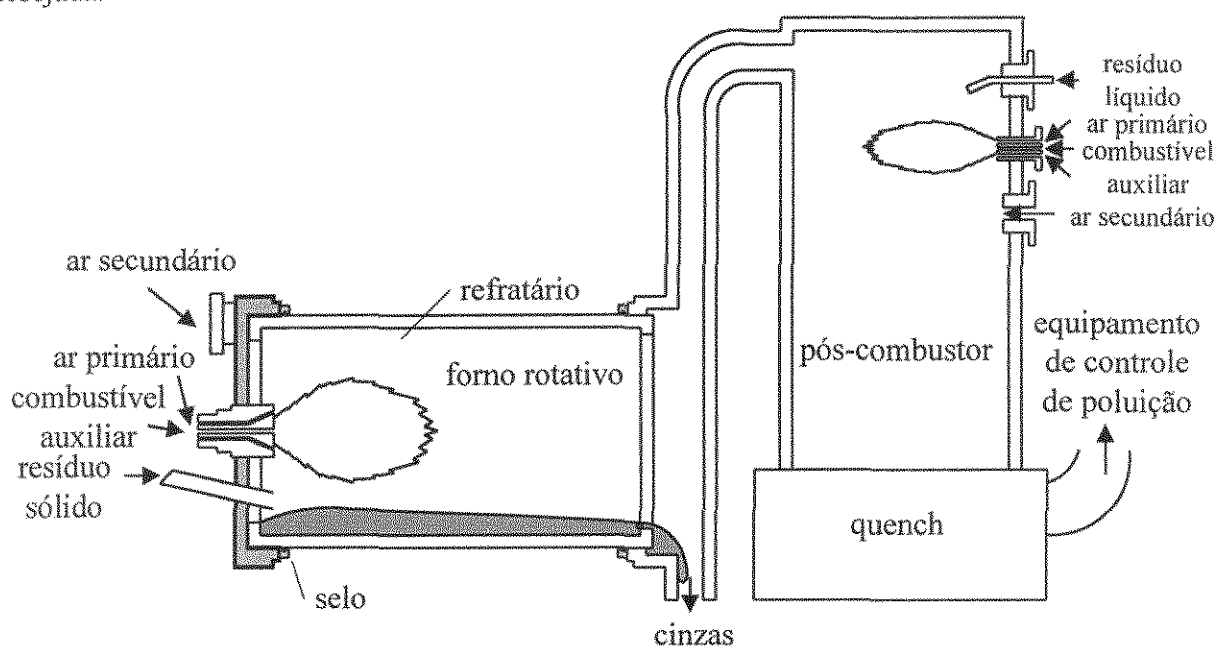


Figura 2.3: Representação esquemática de um incinerador de forno rotativo típico.

III. Incineradores de câmara fixa.

Os incineradores de câmaras fixas, também chamados de “ar controlados”, “incineradores pobres em ar” ou “pirolíticos”, representam a terceira tecnologia atualmente em uso na incineração de resíduos perigosos. Conforme pode ser observado na figura 2.4, o incinerador de câmara fixa consiste de duas câmaras de combustão, sendo que a primeira é fixa, e não rotativa, e os resíduos são bombeados ou empurrados por mecanismos especiais para dentro da mesma. Nesta câmara primária, os resíduos são queimados num ambiente pobre de oxigênio, com cerca de 50 a 80% do ar estequiométrico requerido. Esta condição pobre em ar promove a evaporação da maior parte da fração volátil pelo calor gerado pela oxidação do carbono fixo. Estes produtos volatilizados e pirolíticos, que consistem, principalmente, de metano, etano e outros hidrocarbonetos, monóxido de carbono entre outros produtos de combustão incompleta, passam para a câmara secundária (pós-combustão). Nesta câmara secundária, são injetados combustível auxiliar, se necessário, e ar de combustão, em proporções cujo excesso de ar esteja na faixa de 100 a 200%¹.

Em geral, os incineradores de câmaras fixas tem capacidades menores que os incineradores de injeção líquida ou de forno rotativo, devido às limitações físicas do alimentador. O custo de capital relativamente baixo e o reduzido potencial de emissão de material particulado fazem deste tipo de incinerador uma opção atraente como unidade cativa de pequeno porte dentro de fábricas¹.

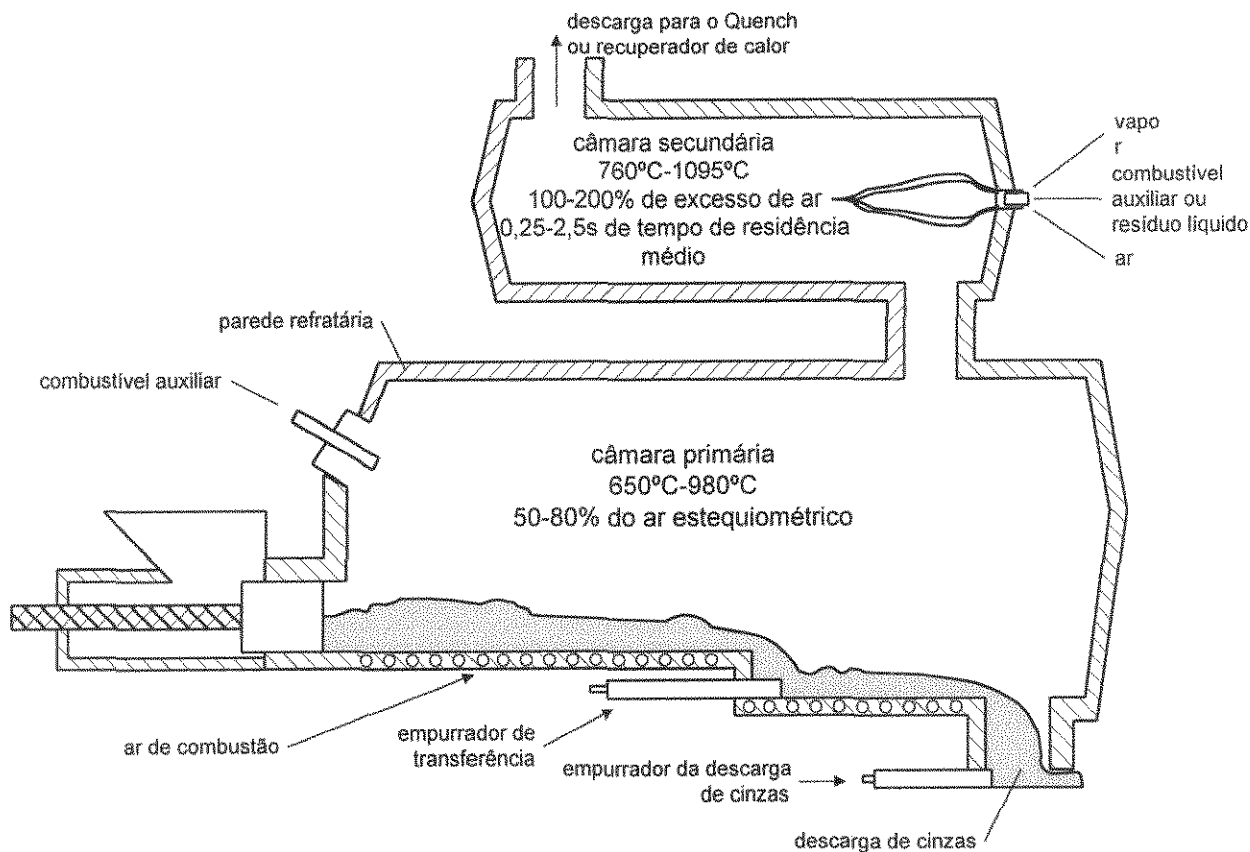


Figura 2.4: Representação esquemática de um incinerador de câmara fixa.

IV. Incineradores de leito fluidizado

O leito fluidizado (figura 2.5) começou apenas recentemente a ser utilizado na incineração de resíduos perigosos, cujos projetos podem ser do tipo circulante ou borbulhante. Os dois tipos consistem de um vaso de combustão simples revestido de refratários parcialmente cheios com areia, alumina, carbonato de cálcio ou outro material semelhante. O ar de combustão é suprido através de um distribuidor em forma de pratos localizado na base do combustor, a uma taxa suficiente para fluidizar (leito borbulhante) ou carrear o material do leito (leito circulante). No projeto do leito circulante, as velocidades do ar são maiores e os sólidos são soprados para cima, separados por ciclones e daí retornam para a câmara de combustão. As temperaturas de operação são normalmente mantidas na faixa de 760 a 870°C e requer um excesso de ar na faixa de 25 a 150%¹.

Os incineradores de leito fluidizado são primariamente utilizados para líquidos, lodos ou materiais sólidos fragmentados, incluindo solos. Para permitir uma boa distribuição do resíduo dentro do leito e remover os sólidos residuais do mesmo, todos os sólidos requerem um peneiramento ou moagem preliminares, para obter-se partículas de tamanhos inferiores a 5 cm de diâmetros. Incineradores de leito fluidizados, proporcionam altas razões gás-sólido, altas eficiências de transferência de calor, alta turbulência tanto na fase gasosa como na sólida, temperaturas aproximadamente uniformes através do leito e o potencial para neutralização “in situ” dos gases ácidos com cal, calcário ou adição de carbonato. Leitos fluidizados também têm uma capacidade potencial para aglomeração de sólidos no leito, especialmente se sais estiverem presentes nos resíduos alimentados¹.

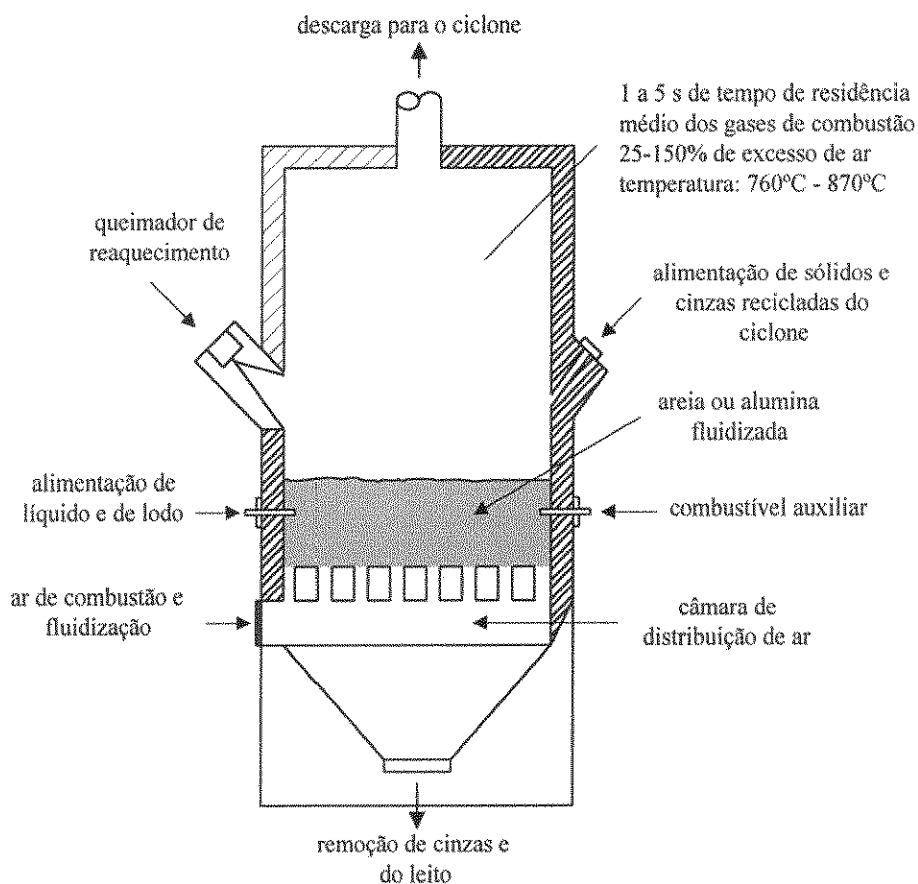


Figura 2.5: Representação esquemática de um incinerador de leito fluidizado.

IV. Processo autotérmico de incineração por gaseificação e combustão combinadas^{7,8}

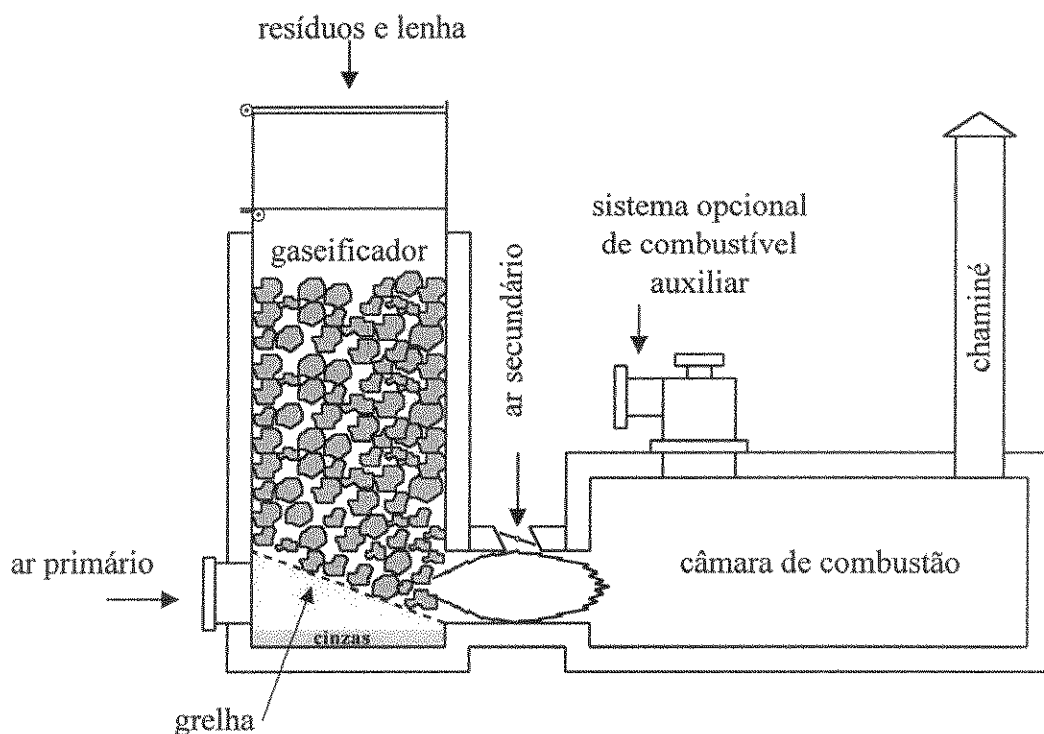


Figura 2.6: Esquema de um processo autotérmico de incineração por gaseificação e combustão combinadas⁷.

A maioria dos processos de incineração existentes, permite a ocorrência de pirólise e combustão incompleta na câmara primária e subsequente complementação da combustão mediante a queima de combustível auxiliar. Como esta combustão do combustível auxiliar é localizada, restrita à chama, nem todo o material é submetido à altas temperaturas da chama e ao ataque dos radicais químicos [H], [O] e [OH], responsáveis pela alta eficiência de destruição e oxidação dos orgânicos.

A figura 2.6 mostra um esquema simplificado do processo de incineração por gaseificação e combustão combinadas. Na câmara de gaseificação, são alimentados resíduos e lenha como combustível auxiliar, podendo ser usado outro tipo de biomassa. A lenha e os resíduos formam um leito incandescente que é suportado por uma grelha inclinada, por onde as cinzas são eliminadas. Os gases gerados são encaminhados para a câmara de combustão onde são queimados com alta eficiência. Um combustível fóssil auxiliar pode ser utilizado se necessário.

Neste processo de incineração, os resíduos a serem queimados, o combustível (biomassa), os voláteis derivados da gaseificação e o oxigênio estão todos em contato íntimo entre si e com os radicais químicos nas superfícies das partículas de carvão incandescente. Não apenas uma parte dos gases, mas praticamente todo gás é submetido a altas temperaturas na presença dos radicais químicos que são os responsáveis pelo craqueamento das moléculas orgânicas.

As etapas do processo de incineração com gaseificação e combustão combinadas podem ser descritas como se segue:

- a) Secagem e/ou evaporação dos voláteis, formando-se uma fase sólida seca e vapores;
- b) decomposição da fase sólida seca por pirólise, formando carbono e gases pirolíticos;
- c) oxidação e craqueamento térmico simultânea das moléculas pesadas, na zona de injeção de oxigênio ou gás contendo oxigênio;
- d) passagem dos gases e vapores formados através de leito de carvão incandescente, formando monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos leves;
- e) mistura de ar secundário aos gases quentes provenientes da gaseificação, seguida de queima na câmara de combustão.

2.4 Radiação térmica: conceitos básicos e analogias com circuitos elétricos

Neste item são apresentados os conceitos básicos e definições relativas à transferência de calor por radiação e a analogia com circuitos elétricos como metodologia de cálculo das taxas de transferência de calor. Para muitos dos leitores provavelmente, a leitura deste item será apenas uma oportunidade de rever esses conceitos, cujo entendimento é importante para o acompanhamento do desenvolvimento deste trabalho.

2.4.1. Propriedades da radiação

A radiação térmica é um dos muitos tipos de radiação eletromagnética, à qual aplica-se a Lei de Stefan-Boltzman, que estabelece que a energia radiante por unidade de tempo e de área emitida por um radiador ideal é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, de acordo com a expressão:

$$E_n = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

A constante σ é conhecida como *constante de Stefan-Boltzman* e que vale $4,88 \times 10^{-8}$ kcal/hm²k⁴, e E_n é chamado de poder emissivo de um corpo negro.

Quando uma energia radiante atinge a superfície de um material, parte da radiação é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida. Define-se como *refletividade* (ρ) a fração refletida, como

absortividade (α) a fração absorvida e como *transmissividade* (τ) a fração transmitida. A soma destas frações é naturalmente igual à unidade, ou seja:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.2)$$

Quando um fluxo de radiação atinge uma superfície, pode ocorrer reflexão difusa ou especular. A *reflexão difusa* é quando o raio incidente é distribuído uniformemente em todas as direções após a reflexão. A *reflexão especular* é quando o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Nenhuma superfície real é especular ou difusa. Em geral a reflexão de superfícies altamente polidas e lisas aproxima-se das características especulares, enquanto as superfícies ásperas, típicas da indústria, aproximam-se das características difusas. Para cálculos de engenharia, as superfícies revestidas, usinadas ou pintadas podem ser tratadas como se fossem completamente difusas⁹.

O *poder emissivo* de um corpo, definido como a energia emitida pelo corpo por unidade de área e por unidade de tempo, depende de suas propriedades físicas. A *emissividade* ε de um corpo é definido como a razão entre o poder emissivo do corpo e o poder emissivo de um corpo negro, ou seja:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_n} \quad (2.3)$$

A *emissividade monocromática* ε_λ é definida como a relação entre o poder emissivo monocromático do corpo e poder emissivo monocromático de um corpo negro no mesmo comprimento de onda e mesma temperatura e pode ser expressa matematicamente por:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{n\lambda}} \quad (2.4)$$

Um *corpo cinzento* é definido como aquele cuja emissividade monocromática ε_λ independe do comprimento de onda.

2.4.2. Fator de forma

Na maior parte dos problemas práticos envolvendo radiação, a intensidade da radiação térmica que passa entre superfícies não é afetada de modo apreciável pela presença de meio interveniente, pois, a menos que a temperatura seja tão alta a ponto de causar ionização ou dissociação, os gases monoatômicos, a maioria dos diatômicos e o ar são transparentes. Além disso, como a maior parte das superfícies industriais pode ser tratada como emissores e refletores difusos de radiação, numa análise de transmissão de calor, um problema chave no cálculo da transmissão de calor por meio de radiação entre superfícies consiste em determinar a fração de radiação difusa total que deixa uma superfície que é interceptada por outra superfície e vice-versa. A fração de energia que deixa a superfície A_i e alcança a superfície A_j é chamada de fator de forma para radiação denotada por $F_{A_i-A_j}$.

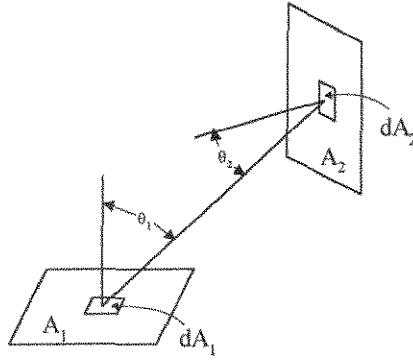


Figura 2.7: Notação do fator de forma geométrico.

Outros nomes para o fator de forma são fator de visibilidade, fator angular e fator de configuração.

Uma propriedade muito útil no cálculo dos fatores de forma é a relação de reciprocidade, que pode ser expressa pela equação 2.5, considerando o exemplo da figura 2.7.

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (2.5)$$

Em geral, a determinação de um fator de forma para qualquer configuração geométrica, exceto as mais simples, é bastante complexa. Para o exemplo da figura 2.7, o fator de forma geométrico pode ser calculado pela equação 2.6.

$$A_1 F_{1-2} = \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (2.6)$$

Para obter-se o fator de forma é necessário resolver esta integral dupla, que em geral é muito trabalhosa, especialmente para geometrias mais complexas. Os fatores de forma de um grande número de configurações podem ser encontradas em algumas referências bibliográficas^{9,10}, na forma de tabelas, equações e gráficos.

2.4.3. Analogia com circuitos elétricos - taxas de transferência de calor

Este subitem está dividido em três partes, a saber, radiação em invólucros com superfícies negras, radiação em invólucros com superfícies cinzentas e radiação em invólucros cheios de gás. Os conceitos empregados nestas três partes são os mesmos que serão úteis no desenvolvimento do circuito elétrico análogo para o incinerador.

I. Radiação em invólucros com superfícies negras

Para se determinar a taxa de transferência de calor por radiação é necessário considerar a radiação vinda de todas as direções. Isto é facilitado construindo-se um invólucro figuradamente ao redor da superfície e especificando-se as características de radiação da cada superfície.

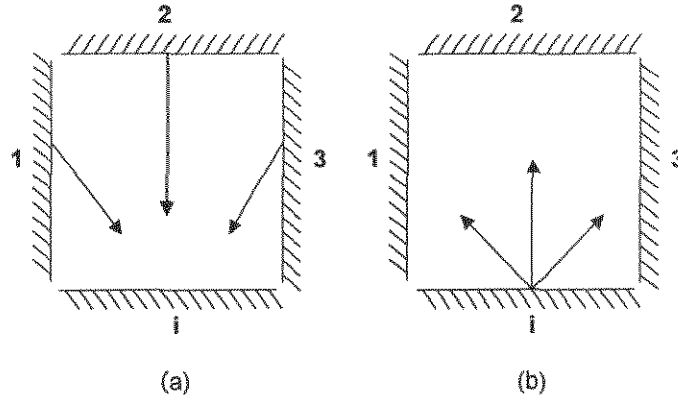


Figura 2.8 : Exemplo de um invólucro de 4 superfícies. Representação da radiação incidente na superfície “i” (a) e da radiação emitida da superfície “i” (b).

As superfícies que constituem o invólucro para uma dada superfície “i” são todas as superfícies que podem ser vistas por um observador colocado na superfície “i”, no espaço ao redor. O invólucro pode conter espaços abertos, chamados de “janelas”. A cada uma dessas janelas pode ser atribuída uma temperatura de corpo negro equivalente correspondente à radiação que entra. Se nenhuma radiação entra, uma janela age como um corpo negro à temperatura zero, que absorve toda energia que sai, e não emite nem reflete.

Considerando o exemplo representado na figura 2.8, a radiação incidente na superfície “i”, de área A_i , vem de outras N superfícies do invólucro. De uma superfície típica “j”, de área A_j , a radiação incidente é calculado pelos produtos entre a área de incidência, o fator de forma geométrico e o poder emissivo, ou seja, $E_{nj} A_j F_{j-i}$. Somando todas as contribuições de todas as N superfícies, obtém-se a radiação total incidente na superfície A_i :

$$E_{n1} A_1 F_{1-i} + E_{n2} A_2 F_{2-i} + \dots + E_{nN} A_N F_{N-i} = \sum_{j=1}^N E_{nj} A_j F_{j-i} = A_i G_i \quad (2.7)$$

na qual G_i é a radiação incidente na superfície por unidade de tempo por unidade de área, chamada de *irradiação*.

O poder emissivo total da superfície A_i , que está distribuído entre as N superfícies, é calculado pela soma das N contribuições, de acordo com:

$$E_{n1} A_1 F_{1-i} + E_{n2} A_2 F_{2-i} + \dots + E_{ni} A_i F_{i-i} = \sum_{j=1}^N E_{ni} A_i F_{i-j} = A_i E_{ni} \quad (2.8)$$

A perda líquida por meio de radiação por unidade de tempo da superfície A_i , $q_{i \leftrightarrow \text{invólucro}}$, é dada pela diferença entre a radiação emitida pela superfície e a radiação incidente na mesma, ou seja:

$$q_{i \leftrightarrow \text{invólucro}} = \sum_{j=1}^N E_{ni} A_i F_{i-j} - \sum_{j=1}^N E_{nj} A_j F_{j-i} = A_i E_{ni} - A_i G_i \quad (2.9)$$

Empregando a relação de reciprocidade $A_j F_{j-i} = A_i F_{i-j}$, obtém-se:

$$q_{i \leftrightarrow \text{invólucro}} = \sum_{j=1}^N (E_{ni} - E_{nj}) A_i F_{i-j} \quad (2.10)$$

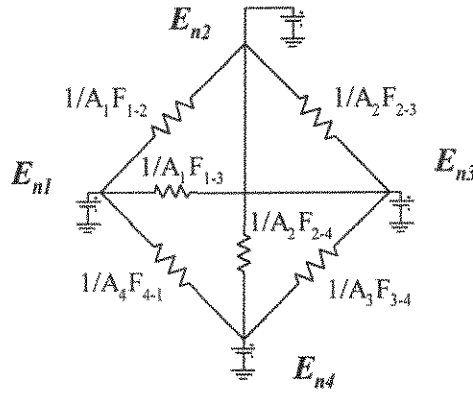


Figura 2.9 : Exemplo de um invólucro de 4 superfícies. Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas entre as superfícies negras.

Analisando-se a equação 2.10, observa-se que há uma analogia entre o fluxo de calor por meio de radiação e o fluxo de corrente elétrica. Se for considerado o poder emissivo do corpo negro agindo como potencial e o produto do fator de forma pela área como a condutância entre os nós dos potenciais E_{ni} e E_{nj} , então o fluxo de calor resultante será análogo ao fluxo de corrente elétrica num circuito equivalente, cuja representação esquemática pode ser observada na figura 2.9.

II .Radiação em invólucros com superfícies cinzentas

A radiação de superfícies cinzentas pode ser tratada convenientemente em termos de radiosidade “ J ”, que é definida como a quantidade de radiação que deixa uma dada superfície, por unidade de tempo e por unidade de área. A radiosidade é a soma das radiações emitidas, refletidas e transmitidas.

Para corpos opacos, que não transmitem radiação, a radiosidade de uma superfície típica i pode ser definida como:

$$J_i = \rho_i G_i + \varepsilon_i E_{ni} \quad (2.11)$$

em que:

J_i = radiosidade

G_i = irradiação (radiação incidente) por unidade de área e por unidade de tempo

E_{ni} = poder emissivo do corpo negro

ρ_i = refletividade

ε_i = emissividade

Considerando-se a superfície A_i , num invólucro de N superfícies, como mostra a figura 2.8, a perda líquida de calor por unidade de tempo é igual à diferença entre a radiação incidente e a que deixa a superfície, ou seja:

$$q_i = A_i (J_i - G_i) \quad (2.12)$$

Como a transmissividade é nula, ou seja, $\rho_i = 1 - \alpha_i$ e se as superfícies que trocam radiação são cinzentas, isto é, $\alpha_i = \varepsilon_i$ segundo a identidade de Kirchhoff, então:

$$\rho_i = 1 - \varepsilon_i \quad (2.13)$$

Combinando as equações 2.11, 2.12 e 2.13, obtém-se:

$$q_i = \frac{A_i \varepsilon_i}{\rho_i} (E_{ni} - J_i) = \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{ni} - J_i) \quad (2.14)$$

A equação 2.14 pode ser escrita numa forma equivalente a um circuito elétrico, ou seja:

$$q_i = \frac{(E_{ni} - J_i)}{(1 - \varepsilon_i) / A_i \varepsilon_i} \quad (2.15)$$

na qual, a quantidade de calor trocada por radiação por unidade de tempo, q_i , equivale à corrente elétrica num circuito elétrico entre os potenciais E_{ni} e J_i com a resistência $1 - \varepsilon_i / A_i \varepsilon_i$. Como o efeito da geometria do sistema, na radiação líquida entre duas superfícies cinzentas A_i e A_k quaisquer emitindo radiação à razão J_i e J_k , respectivamente, é o mesmo para superfícies negras geometricamente semelhantes, ele pode ser expresso em termos de fatores de forma geométricos. A troca direta de radiação entre duas superfícies opacas ($\tau_i = 0$) e difusas quaisquer A_i e A_j é dada pela equação:

$$q_{i \leftrightarrow j} = (J_i - J_j) A_i F_{i \rightarrow j} = (J_i - J_j) A_j F_{j \rightarrow i} \quad (2.16)$$

Na forma equivalente à circuito elétricos, esta equação pode ser escrita na forma:

$$q_{i \leftrightarrow j} = \frac{(J_i - J_j)}{1 / A_i F_{i \rightarrow j}} = \frac{(J_i - J_j)}{1 / A_j F_{j \rightarrow i}} \quad (2.17)$$

na qual, $(J_i - J_j)$ representa a diferença de potencial e $1 / A_i F_{i \rightarrow j}$ ou $1 / A_j F_{j \rightarrow i}$, representa a resistência.

A figura 2.10 representa o mesmo invólucro considerado na figura 2.8, porém, para superfícies cinzentas. O efeito da refletividade e da emissividade é levado em conta pela ligação do nodo potencial de corpo negro, E_{ni} , a cada um dos pontos nodais no circuito, por meio de uma resistência finita $1 - \varepsilon_i / A_i \varepsilon_i$. No caso de corpo negro, esta resistência é nula uma vez que $\varepsilon_i = 1$.

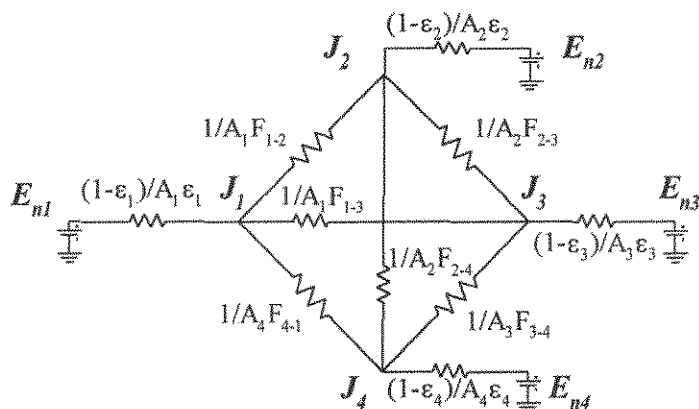


Figura 2.10: Exemplo de um invólucro de 4 superfícies. Circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas entre as superfícies cinzentas.

III .Radiação em invólucros cheios de gás

Para ilustrar o método de abordagem do cálculo da troca de calor radiativo entre superfícies através de um meio gasoso que tanto absorve como transmite, utiliza-se o exemplo de duas placas paralelas onde o espaço entre elas está preenchido com um gás, conforme esquematizado na figura 2.11.

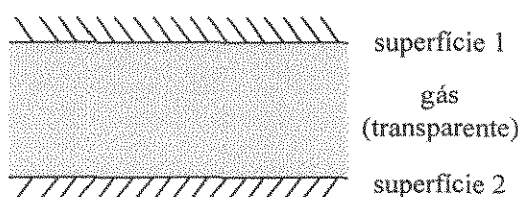


Figura 2.11: Trocas radiativas entre duas superfícies separadas por um meio gasoso.

O gás é identificado pelo índice “g”, e admite-se que o gás não contém quaisquer partículas que possam refletir e espalhar radiação. Aplicando-se a lei de Kirchhoff, tem-se:

$$\alpha_g + \tau_g = 1 \quad (2.18)$$

e pela identidade de Kirchhoff, esta equação torna-se:

$$\epsilon_g + \tau_g = 1 \quad (2.19)$$

A fração da radiação total que deixa a superfície 1 e chega à superfície 2 é:

$$J_1 A_1 F_{1-2} \tau_g$$

e a que deixa a superfície 2 e atinge a 1 é:

$$J_2 A_2 F_{2-1} \tau_g$$

A quantidade líquida de radiação transmitida por unidade de tempo entre duas superfícies separadas por um gás, é, portanto:

$$q_{1 \leftrightarrow 2} = A_1 F_{1-2} \tau_g (J_1 - J_2) = \frac{(J_1 - J_2)}{1/A_1 F_{1-2} \tau_g} = \frac{(J_1 - J_2)}{1/A_1 F_{1-2} (1 - \epsilon_g)} \quad (2.20)$$

A resistência equivalente entre os nodos J_1 e J_2 , é $1/A_1 F_{1-2} (1 - \epsilon_g)$, ou na forma equivalente $1/A_1 F_{1-2} \tau_g$.

Além disso, também ocorre a troca de radiação entre cada uma das superfícies e o gás. Considerando que o gás é transparente e portanto não absorve radiação, isto é, $G_i = 0$, a radiação emitida pelo gás na temperatura T_g é expressa por:

$$J_g = \epsilon_g E_{ng} \quad (2.21)$$

A fração da energia emitida pelo gás que atinge a superfície 1 é:

$$A_g F_{g-1} J_g = A_g F_{g-1} \epsilon_g E_{ng}$$

Analogamente, a fração de radiação que deixa A_1 e que é absorvida pelo gás transparente é:

$$J_1 A_1 F_{1-g} \alpha_g = J_1 A_1 F_{1-g} \epsilon_g$$

A quantidade líquida de calor transferida entre o gás e a superfície 1 por unidade de tempo é a diferença entre a radiação emitida pelo gás e atinge A_1 e a radiação que é emana de A_1 e é absorvida pelo gás. Portanto:

$$q_{g \leftrightarrow 1} = A_g F_{g-1} \epsilon_g E_{ng} - J_1 A_1 F_{1-g} \epsilon_g \quad (2.22)$$

Aplicando-se o teorema da reciprocidade, a troca líquida entre o gás e a superfície A_1 pode ser expressa por:

$$q_{g \leftrightarrow 1} = \frac{(E_{ng} - J_1)}{1/A_1 F_{1-g} \epsilon_g} \quad (2.23)$$

Analogamente, a troca líquida de radiação entre a superfície A_2 e o gás, pode ser calculada por:

$$q_{g \leftrightarrow 2} = \frac{(E_{ng} - J_2)}{1/A_2 F_{2-g} \epsilon_g} \quad (2.24)$$

Observa-se nas equações 2.23 e 2.24, que estas consistem da razão entre uma diferença de potencial e uma resistência, permitindo a analogia com circuitos elétricos. A figura 2.12 apresenta o circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor por radiação entre duas superfícies separadas por meio gasoso, esquematizada na figura 2.11.

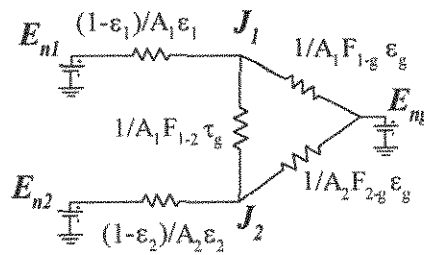


Figura 2.12: Circuito elétrico equivalente que representa as trocas de calor entre duas superfícies separadas por um meio gasoso transparente.

2.5 Transferência de calor em forno rotativo

Os fornos rotativos tem sido estudados por vários pesquisadores, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de modelos de transferência de calor. Jenkim e Moles¹¹ enfocaram a predição das temperaturas do gás e do refratário usando o modelo de Hottel e Sarofim¹² com algumas modificações, cujos resultados apresentaram boa concordância com os dados obtidos a partir de um forno rotativo de produção de cimento, mas não incluíram o cálculo da temperatura do sólido.

Numa série de três artigos, Gorog et al. examinaram a transferência de calor radiativa entre o gás e as superfícies interiores¹³, a taxa global de transferência de calor para o sólido¹⁴, e as taxas de transferência de calor na zona de chama¹⁵. Gorog et al. consideraram ainda que o leito de sólido é isotérmico e de altura constante na direção axial, e não consideraram o efeito da umidade do mesmo sobre a temperatura do sólido, nem tampouco a presença de substâncias voláteis e oxidáveis no resíduo.

Silcox e Pershing⁶ desenvolveram um modelo utilizando o modelo de radiação de Hottel e Sarofim¹² e analogia com circuitos elétricos, aplicado à zona uniformemente dividida na direção axial do forno.

Fudihara¹⁶, desenvolveu um modelo e um simulador numérico estacionário, baseado no trabalho de Silcox e Pershing⁶, e o aplicou no incinerador da Rhodia S.A.-Cubatão, obtendo uma boa concordância com os dados experimentais.

Estes trabalhos não consideraram, entretanto, a geração de calor devido à combustão dos compostos orgânicos presentes no resíduo sólido e nem a sua redução de massa e volume ao longo da direção axial. Estas simplificações são razoáveis quando aplicada à incineração de resíduos com baixas concentrações de compostos voláteis, oxidáveis ou umidade, como é o caso de solo contaminado com substâncias perigosas.

Os principais trabalhos são apresentados sucintamente a seguir.

2.5.1 Transferência de calor radiativo em fornos rotativos: trabalhos de Gorog, Brimacombe e Adams^{13,14,15}

a) Transferência de calor radiativo em fornos rotativos (1981)¹³

No trabalho de Gorog et al.¹³, intitulado “*Radiative Heat Transfer in Rotary Kiln*”, o objetivo principal foi examinar teoricamente as trocas radiativas entre o gás, o sólido e a parede do forno rotativo, sem considerar a presença da chama, e desenvolver um modelo de radiação baseado no comportamento real dos gases, tendo sido dividido em três seções:

- A caracterização radiativa dos gases, da parede do forno e do sólido, considerando uma mistura equimolar de dióxido de carbono e água;

- A determinação das trocas radiativas entre o gás e a parede do forno, entre o gás e o sólido, e entre a parede e o sólido;
- A predição do calor total trocado entre o gás, a parede do forno e o sólido baseado no modelo de radiação considerando o gás real, em comparação com o modelo de radiação considerando o gás cinzento.

No desenvolvimento do modelo de gás real, Gorog et al.¹³ consideraram o gás, a parede do forno e o sólido como isotérmicos e as superfícies da parede do forno e do sólido como cinzentas para a radiação. Com base nessas hipóteses, foi empregado um método de reflexão para prever as perdas líquidas de energia radiante do gás, da parede do forno e do sólido. A essência do método de reflexão é seguir a emissão e subsequentes reflexões a partir de cada superfície ou gás para determinar quanto dessas reflexões e emissões são absorvidas pela superfície ou gás de interesse. Uma vez traçadas as emissões e absorções a partir do gás, da parede e do sólido, a perda líquida de energia radiante pode então ser calculada tomando-se a diferença entre a quantidades totais de energia radiante emitida e absorvida. A figura 2.13 mostra um diagrama esquemático onde são mostrados os caminhos da energia radiante emitida para emissões a partir do gás e do leito de sólido.

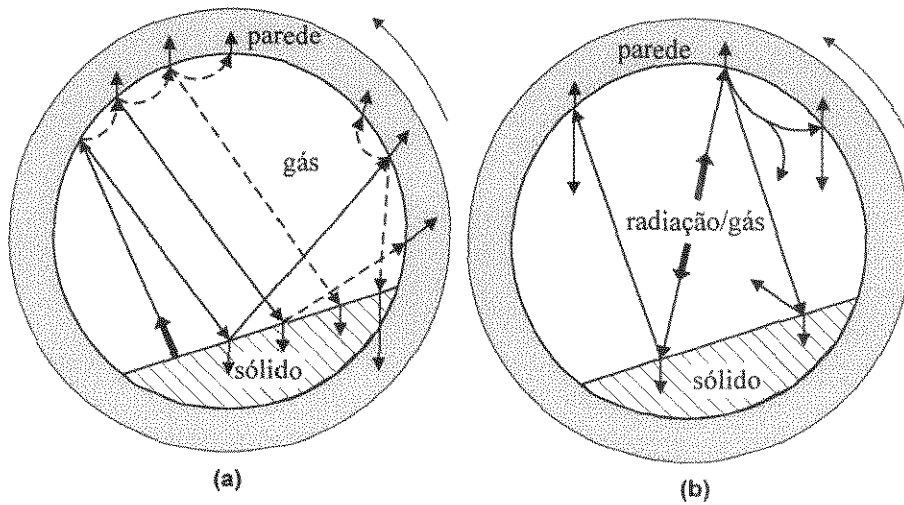


Figura 2.13: Diagrama esquemático de uma seção transversal do forno mostrando os caminhos da energia radiante emitida a partir do sólido (a) e do gás (b).

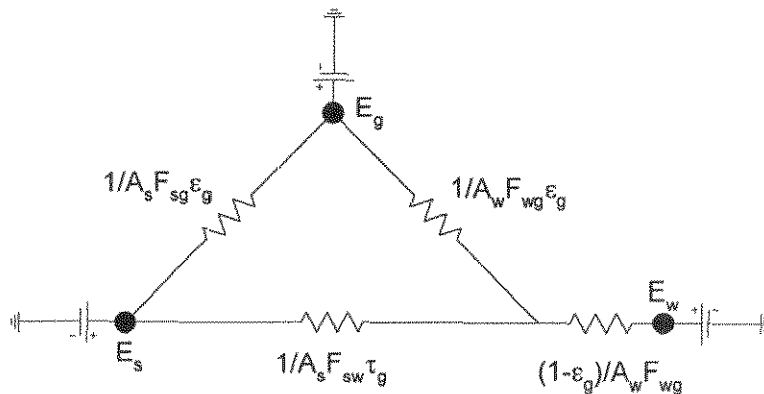


Figura 2.14: Representação esquemática do circuito elétrico resistivo para o forno rotativo onde o gás e as paredes são consideradas cinzentas e a superfície do sólido é considerada negra.

Para comparação, as trocas radiativas também foram calculadas utilizando um modelo simplificado que considera o gás cinzento o que permite o emprego da analogia com circuitos elétricos, conforme pode ser observado na figura 2.14. Para este modelo, a superfície do sólido foi considerada como negra para a radiação.

As principais conclusões enunciadas neste trabalho foram:

- devido à presença de dióxido de carbono e vapor de água nos gases no interior do forno, que emitem e absorvem radiação em bandas distintas, a aproximação de gás cinzento não é válida, devendo, esta mistura, ser tratada como gás real;
- A maior parte da energia radiante, 86%, recebida pela parede do forno ou pela superfície do sólido originam-se do gás dentro de uma faixa de $1/3$ do diâmetro ao longo do eixo axial. A natureza localizada das trocas radiativas gás-parede e gás-sólido resulta do fato da transmissividade do gás real ser muito pequena para sua própria radiação;
- A influência do gradiente de temperatura no gás sobre as trocas radiativas entre o gás e a parede do forno ou a superfície do sólido é desprezível;
- Mais de 80% da radiação refletida a partir da parede do forno ou da superfície do sólido é reabsorvida pelo gás na primeira reflexão. Portanto, a influência da radiação refletida do gás sobre a transferência de calor radiante total é mínima e é um fenômeno local;
- A troca radiante entre a superfície do sólido e a parede do forno ocorre numa faixa de $3/4$ do diâmetro ao longo de eixo axial. Portanto, a influência do gradiente de temperatura ao longo da parede do forno ou da superfície do sólido tem efeito desprezível sobre a troca radiativa entre a parede do forno e a superfície do sólido;
- As previsões das trocas radiativas num forno rotativo usando o modelo de gás real foram comparadas com aquelas usando a simplificação do gás cinzento e analogia com circuitos elétricos. O uso do gás cinzento, segundo este estudo, introduz um erro maior do que 20%.

b) Transferência de calor regenerativo em fornos rotativos (1982)¹⁴

Neste segundo trabalho, intitulado “*Regenerative Heat Transfer in Rotary Kiln*”, Gorog et al.¹⁴ desenvolveram um modelo matemático para determinar a distribuição da temperatura na parede de um forno rotativo.

Num forno rotativo, o calor é transferido para o leito de sólido por duas vias, ou seja, por meio da superfície superior exposta aos gases e pela superfície inferior em contato com a parede do forno. Os mecanismos de fluxo de calor para as duas superfícies são muito diferentes. A superfície superior do sólido recebe calor diretamente por radiação e convecção do gás enquanto para a superfície inferior, o calor é transferido por uma combinação de radiação e condução da parede para o sólido. Esta última via de transferência de calor é parte do **ciclo regenerativo** da parede do forno, e como este gira em torno de um “cilindro de gás”, também recebe calor por radiação e convecção a partir dos gases de combustão quentes, assim como, perde parte de energia para o meio externo. A figura 2.15 mostra um diagrama esquemático representando estes mecanismos.

Os objetivos principais desse trabalho podem ser resumidos por:

- Desenvolvimento de um modelo matemático para prever o perfil de temperatura na parede do forno;
- Determinação dos coeficientes de transferência de calor para uso no modelo;
- Aplicação do modelo para prever a ação regenerativa da parede e transferência de calor total para o sólido como uma função das variáveis do forno;

- Desenvolvimento de um modelo simplificado para prever as médias das temperaturas da parede interna, transferência de calor para o sólido e perda de calor através da parede.

O modelo foi empregado para avaliar o efeito de diferentes variáveis (velocidade rotacional, taxa de alimentação, temperatura do gás e do sólido, emissividade da parede e do sólido, coeficiente de transferência de calor convectivo na parede exposta e na parede coberta pelo sólido, e difusividade térmica da parede) sobre a transferência de calor total e regenerativo para o sólido, sem considerar a presença e o efeito da chama.

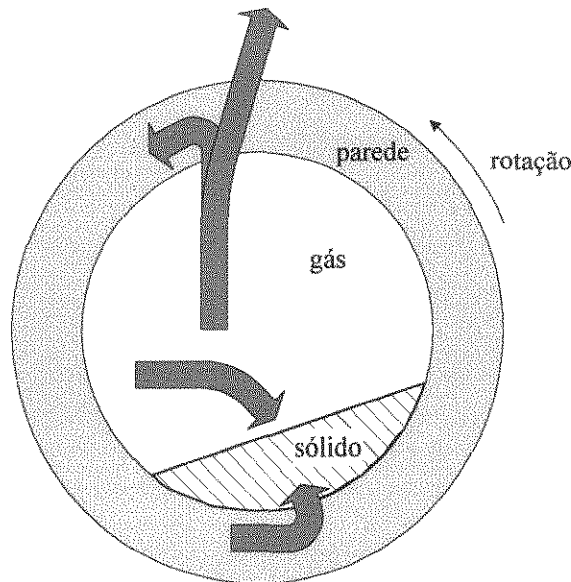


Figura 2.15: Diagrama esquemático de uma seção transversal de um forno rotativo mostrando os principais fluxos de calor para o sólido.

O trabalho contempla também uma detalhada formulação a respeito dos coeficientes de transferência de calor. Para os coeficientes radiativos de transferência de calor, o trabalho apresenta um estudo das estimativas da transferência de calor radiante no gás usando dois modelos, ou seja, modelo de uma zona e modelo de quatro zonas como aproximação da variação radial da temperatura da superfície interna da parede. Os resultados destes cálculos indicaram que o erro introduzido pelo uso da aproximação de uma zona é inferior a 3% em termos de energia radiante incidente líquida. No restante do trabalho foi adotado o modelo de uma zona para caracterizar o coeficiente de transferência de calor radiativo.

Para os cálculos da temperatura da parede e dos fluxos de calor, Gorog et al.¹⁴ empregaram neste trabalho o modelo simplificado, baseado na analogia com circuitos elétricos, cuja representação esquemática pode ser vista na figura 2.16.

As principais conclusões obtidas foram:

- Durante uma revolução do forno, o estado transiente ou a região cíclica de temperatura é limitada a uma fina camada na parte interna da parede do forno que raramente excede 15 mm de espessura;
- Em qualquer ponto da direção axial do forno, a variação cíclica da temperatura na superfície interna do forno está na faixa de 30 a 90 K;
- Nas regiões de altas temperaturas, 60 a 80% do calor recebido pelo sólido resulta de suas interações radiativas com o gás e a parede exposta;
- Na região de baixa temperatura, 70 % do calor recebido pelo sólido resulta da combinação da convecção com o aquecimento regenerativo da parede;

- A distribuição de temperatura dentro da parede em qualquer ponto ao longo do eixo axial do forno e o fluxo de calor total recebido pelo sólido e a perda para o meio externo, são independentes das variáveis consideradas neste estudo (velocidade rotacional, taxa de alimentação, temperatura do gás e do sólido, emissividade da parede e do sólido, coeficiente de transferência de calor convectivo na parede exposta e na parede coberta pelo sólido, e difusividade térmica da parede);
- Uma vez que a distribuição de temperatura da parede do forno e os fluxos de calor são claramente independentes das variáveis investigadas, o modelo usado para prever a quantidade de calor recebida pelo sólido e as perdas pelas paredes pode ser bastante simplificado mediante o uso de analogia com circuitos elétricos que incorpora os fluxos de calor radiativo, condutivo e convectivo. Usando este modelo simplificado, tanto a temperatura da parede quanto os fluxos de calor podem ser estimados com menos de 5% de erro, em qualquer ponto do eixo axial do forno¹⁴.

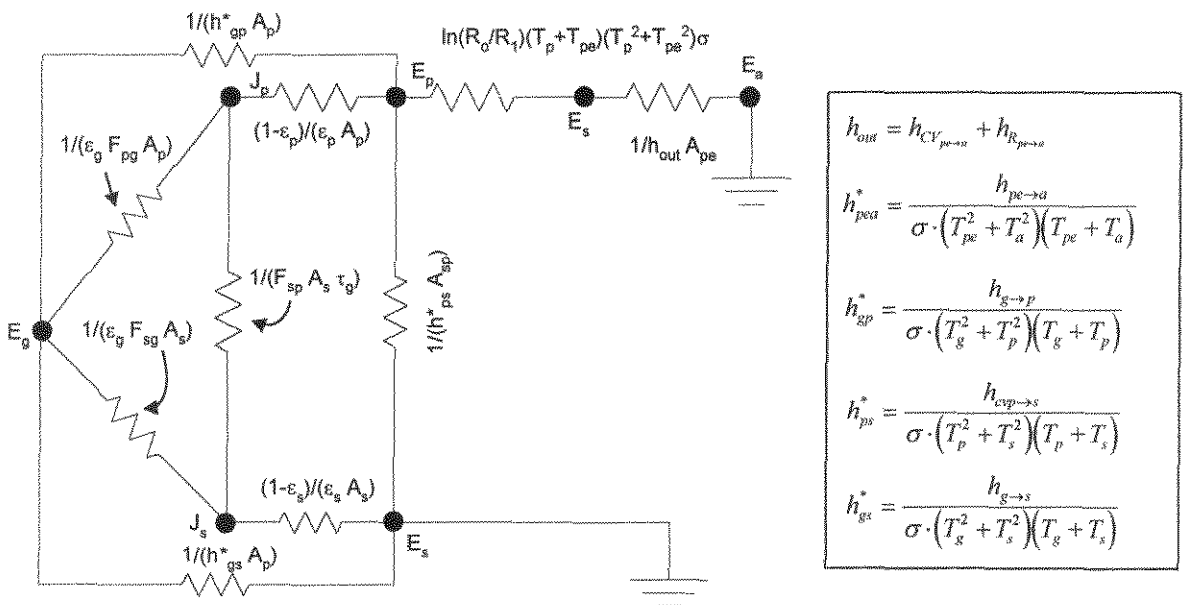


Figura 2.16: Esquema do circuito térmico resistivo análogo ao circuito elétrico usado para prever os fluxos de calor dentro do forno rotativo¹⁴.

c) Transferência de calor a partir da chama em fornos rotativos (1983)¹⁵

Nos dois primeiros artigos desta série^{13,14}, Gorog et al. , dedicaram-se à modelagem matemática de transferência de calor na região sem chama de um forno rotativo. Neste, intitulado “*Heat Transfer from flames in Rotary Kiln*”, o objetivo principal foi descrever matematicamente o processo global de transferência de calor na região com chama de um forno rotativo. O trabalho está dividido em duas seções principais:

- I. Desenvolvimento do modelo para prever as temperaturas e os fluxos de calor na presença da chama;
- II. Aplicação do modelo para examinar as características da chama e fluxos de calor em função das variáveis do forno.

Em ambas zonas, com e sem chama, o calor é transferido para superfície superior do leito de sólido por radiação e convecção e para a superfície inferior pela ação regenerativa a partir da parede do forno em rotação. No entanto, na região da chama (figura 2.17), gases intensamente radiantes

encontram-se confinados na chama visível, em contraste com a região sem chama onde os gases radiantes encontram-se ocupando todo espaço gasoso.

Neste estudo, um modelo unidimensional é proposto para estimar as temperaturas e os fluxos de calor dentro da zona da chama num forno rotativo. Esta técnica envolve a subdivisão axial da chama em comprimentos regulares em que as temperaturas são consideradas uniformes. Um balanço de energia é escrito para cada zona, e é utilizado a equação de Beér¹⁷ para determinar a taxa de calor liberado pela chama para combustível gasoso. A chama é considerada de forma cilíndrica e a taxa de entrada de ar na chama é caracterizada por uma equação empírica reportada na literatura. As trocas radiativas entre zonas adjacentes não são consideradas.

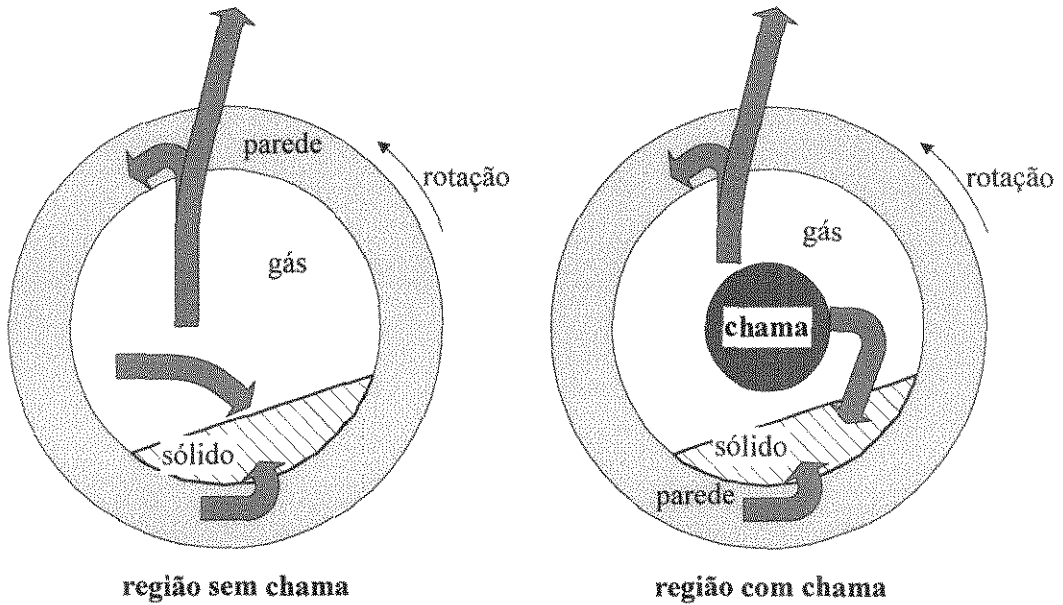


Figura 2.17: Diagrama esquemático de seções transversais de um forno rotativo na região com chama e sem chama, mostrando os mecanismos de transferência de calor.

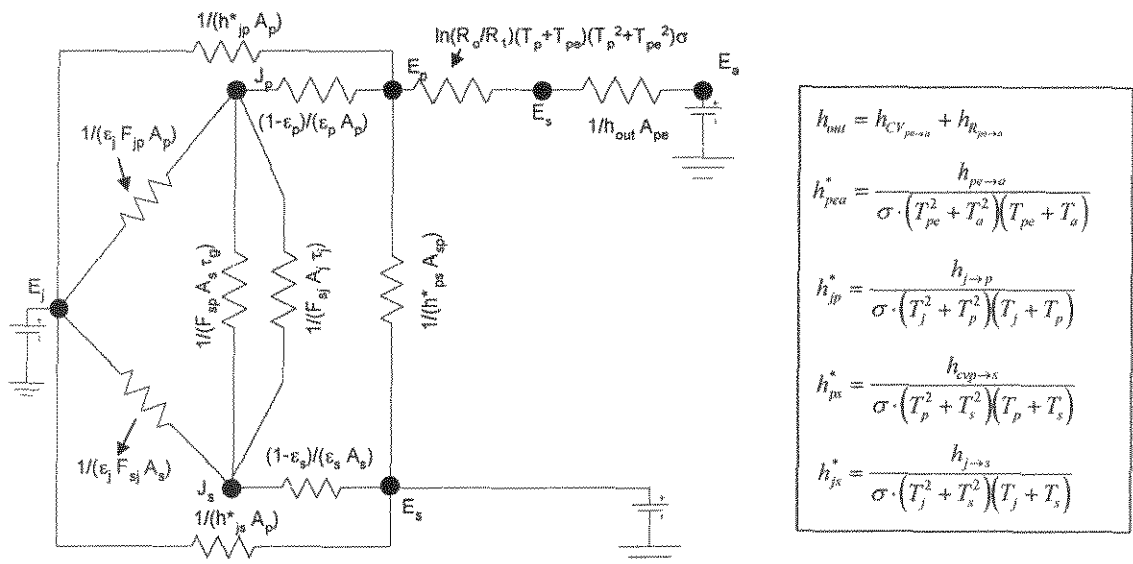


Figura 2.18: Circuito elétrico análogo usado para prever os fluxos de calor na região da chama num forno rotativo.

Os fluxos de calor dentro da zona da chama são caracterizados por um circuito resistivo análogo a um circuito elétrico, de forma similar ao desenvolvido no segundo artigo da série e apresentado no item b. Um esquema do circuito elétrico análogo é apresentado na figura 2.18.

É importante observar que este modelo considera a presença da chama, caracterizados como gases radiantes confinados na chama visível e que não preenchem todo espaço gasoso. O espaço não preenchido pela chama, que configura uma região gasosa anular não é considerada neste modelo, em termos de trocas radiativas.

Consta do trabalho também, estudos das influências do tipo de combustível, da taxa de queima, da temperatura do ar secundário, da porcentagem de ar primário e do enriquecimento com oxigênio, sobre o fluxo de calor no leito.

2.5.2 Transferência de calor radiativo em fornos rotativos: trabalhos de Silcox e Pershing⁶



Figura 2.19: Esquema das regiões e do zoneamento no forno rotativo considerados no modelo adotado por Silcox & Pershing.

Silcox & Pershing⁶ desenvolveram um modelo de transferência de calor para fornos rotativos de chama direta no intuito de verificar os efeitos das condições operacionais e de parâmetros de projeto sobre a temperatura do leito de sólido. Este modelo é baseado no zoneamento unidimensional ao longo do eixo longitudinal do forno e no modelo de radiação de Hottel & Sarofim¹².

Para o cálculo da transferência de calor, Silcox e Pershing utilizaram a analogia com circuitos elétricos e as equações de balanço de massa e energia resolvidas iterativamente.

O forno é dividido axialmente em zonas de igual comprimento, como é mostrado na figura 2.19. Dentro de cada zona, há três correntes de fluxo: a chama ou jato, os gases que circundam o jato (gás anular) e o sólido. Dentro de cada zona, cada corrente é caracterizada por uma única temperatura e é considerada com mistura perfeita.

A seguir estão relacionadas as hipóteses consideradas no desenvolvimento do modelo de Silcox e Pershing⁶.

- A chama é considerada como um cilindro de diâmetro constante.
- Os gases de combustão gerados pela chama têm também a forma cilíndrica com o mesmo diâmetro, prolongando-se até o final do forno (veja figura 2.19);
- A temperatura do pós-combustor é especificada e não calculada;

- A taxa de queima na chama e o seu comprimento são especificados e a taxa de entrada de gás anular é igual ao requerido para suprir a combustão.
- A taxa de fluxo de ar primário no queimador e do ar que circunda a chama podem ser ajustados independentemente;
- O resíduo sólido entra no forno rotativo continuamente, sendo que a rotação do forno é considerada suficiente para promover a mistura perfeita do sólido e manter o leito isotérmico radialmente;
- A altura do leito é considerada constante e portanto independente da posição axial;
- Para uma dada zona, a temperatura da parede é considerada independente da posição angular;
- A geração de calor devido à combustão dos hidrocarbonetos é considerada desprezível;
- A evaporação da umidade do sólido é desprezível para temperaturas inferiores a 100°C;
- A temperatura do leito de sólido permanece em 100°C até que toda umidade seja evaporada;
- O vapor gerado a partir da umidade sólido é incorporado pelo gás anular;
- Todas superfícies são consideradas cinzentas e difusas;
- As emissividades da chama e jato são especificada a cada zona;
- Os gases do jato e da chama são considerados cinzentos;
- São considerados os seguintes processos de transferência de calor:
 - radiação proveniente da chama e atingindo as paredes e o sólido;
 - convecção entre a corrente de gás anular e as paredes e o sólido;
 - condução através das paredes;
 - convecção e radiação entre as paredes e o sólido, e entre a superfície externa da parede e o meio externo;
 - radiação entre zonas imediatamente adjacentes, exceto entre elementos da chama;
 - trocas radiativas entre os gases e a superfície do sólido na última zona e o pós-combustor.

Coefficientes de transferência de calor:

No desenvolvimento da modelagem matemática de um incinerador de forno rotativo, são necessários quatro coeficientes de transferência de calor convectivo, ou seja, entre a parede e o sólido, entre o gás e parede, entre o gás e o sólido e entre a parede e o meio externo.

- Coeficiente convectivo parede-sólido:

Para calcular o coeficiente convectivo entre o sólido e a parede do forno, Silcox & Pershing empregaram a correlação proposta por Tscheng & Watkinson^{18,6} expressa por:

$$\frac{h_{ps} L_p}{K_s} = 11,6 \left(\frac{n \cdot r_m^2 \beta}{\alpha} \right) \quad (2.25)$$

sendo:

h_{ps} = coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede e o sólido (W/m²K);

L_p = comprimento do arco subtendido pelo ângulo β (m);

K_s = condutividade térmica do sólido (W/mK);

r_m = raio interno do forno (m);

α = difusividade térmica do sólido (m^2/s);

β = ângulo subtendido pela superfície do sólido, (radianos).

- Coeficiente convectivo gás-parede:

Para estimar o coeficiente de transferência de calor entre a parede e o gás, Silcox & Pershing empregaram a correlação de Gorog et al.¹⁴, expressa por:

$$h_{gp} = 0,036 \frac{k_g}{D} Re^{0,8} Pr^{0,33} \left(\frac{D}{L} \right)^{0,055} \quad (2.26)$$

sendo:

h_{gp} = coeficiente de transferência de calor convectivo entre o gás e a parede ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);

k_g = condutividade térmica do gás (m^2/s);

D = diâmetro interno do forno (m);

L = comprimento do forno (m);

- Coeficiente convectivo gás-sólido:

Para estimar o coeficiente de transferência de calor entre sólido e o gás, Silcox & Pershing empregaram a correlação de Gorog et al.¹⁴, expressa por:

$$h_{gs} = 0,04 (G_g)^{0,62} \quad (2.27)$$

sendo:

h_{gs} = coeficiente de transferência de calor convectivo entre o gás e o sólido ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);

G_g = fluxo de massa de gás através do forno ($\text{kg}/\text{m}^2\text{K}$);

D = diâmetro interno do forno em (m);

L = comprimento do forno em (m);

- Coeficiente convectivo gás-sólido:

O coeficiente de transferência de calor entre a superfície da parede externa e o meio externo, foi estimado por Silcox & Pershing considerando convecção natural para cilindro horizontal estacionário, de acordo com Incropera & DeWitt¹⁹, cujo valor estimado é de $6 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Circuito elétrico análogo:

O circuito elétrico análogo desenvolvido por Silcox & Pershing⁶ encontra-se representado na figura 2.20. Os símbolos **J** e **E** denotam a radiosidade e o poder emissivo respectivamente. Os subscritos identificam os seguintes elementos: *j* - jato, *p* - parede interna, *g* - gás anular, *pe* - parede externa e *a* - ambiente externo. Os superscritos + e - indicam que a variável diz respeito à zona posterior e anterior, respectivamente.

As resistências à transferência de calor constantes neste circuito estão definidas na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Resistências à transferência de calor do circuito análogo⁶.

$R_1 = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot A_j \cdot F_{jp}^a}$	$R_2 = R_1$	$R_3 = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot A_j \cdot F_{js}^a}$
$R_4 = R_3$	$R_5 = \frac{1}{\tau_g \cdot A_s \cdot F_{sp}^a}$	$R_6 = \frac{1}{\tau_g \cdot A_p \cdot F_{pp}^a}$
$R_7 = R_6$	$R_8 = R_5$	$R_9 = R_5$
$R_{10} = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot A_j \cdot F_{jp}}$	$R_{11} = R_5$	$R_{12} = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot A_j \cdot F_{js}}$
$R_{13} = \frac{1}{\tau_g \cdot A_s \cdot F_{sp}}$	$R_{14} = \frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p \cdot A_p}$	$R_{15} = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot A_j \cdot F_{jp}^a}$
$R_{16} = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot A_j \cdot F_{jsp}}$	$R_{17} = R_{15}$	$R_{18} = R_{16}$
$R_{19} = \frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s \cdot A_s}$	$R_{20} = \frac{1}{A_{sp} h_{ps}^*}$	$R_{21} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)}{2\pi \Delta z k_p^*}$
$R_{22} = \frac{1}{A_p h_{gp}^*}$	$R_{23} = \frac{1}{A_s h_{gs}^*}$	$R_{24} = \frac{1 - \varepsilon_{pe}}{\varepsilon_{pe} \cdot A_{pe}}$
$R_{25} = \frac{1}{A_{pe} h_{pea}^*}$	$R_{26} = \frac{1}{A_{pe}}$	

Nesta tabela, A representa a área, ε a emissividade, τ a transmissividade e F o fator de forma de radiação, referentes aos elementos identificados pelos subscritos. Os símbolos r_{ext} e r_{in} correspondem aos raios externo e interno do forno, respectivamente, e Δz representa o comprimento da zona. o subscrito “a” indica que o elemento refere-se à zona adjacente.

Os coeficientes de transferência de calor convectivos e condutivos são transformados em coeficientes análogos (identificados com asterisco), de acordo com o apresentado no Apêndice C, de forma que as resistências correspondentes sejam similares às resistências radiativas. A tabela 2.2 apresenta esses coeficientes convectivos.

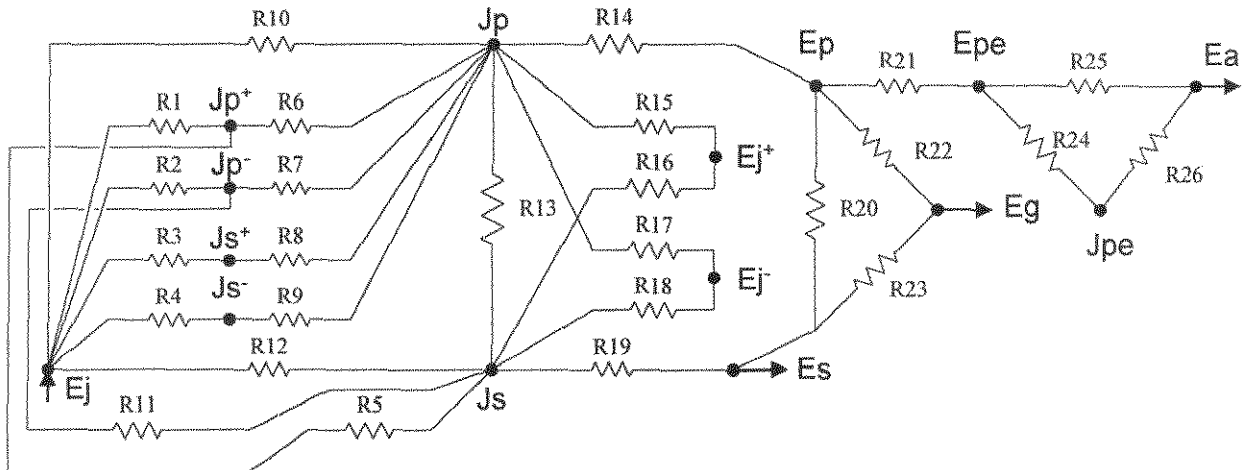


Figura 2.20: Circuito elétrico análogo para uma zona segundo o modelo de Silcox e Pershing⁶.

Tabela 2.2: Coeficientes convectivos e condutivos análogos para a transferência de calor no forno rotativo segundo Silcox & Pershing⁶.

Coeficientes de transferência de calor análogo	equação
Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre a parede interna da câmara de combustão e o sólido	$h_{ps}^* = \frac{h_{cp \rightarrow s}}{\sigma \cdot (T_p^2 + T_s^2)(T_p + T_s)}$
Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre o gás anular e a parede interna da câmara de combustão	$h_{gp}^* = \frac{h_{g \rightarrow p}}{\sigma \cdot (T_g^2 + T_p^2)(T_g + T_p)}$
Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre o gás anular e o sólido:	$h_{gs}^* = \frac{h_{g \rightarrow s}}{\sigma \cdot (T_g^2 + T_s^2)(T_g + T_s)}$
Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre a parede externa e o ambiente	$h_{pea}^* = \frac{h_{pe \rightarrow a}}{\sigma \cdot (T_{pe}^2 + T_a^2)(T_{pe} + T_a)}$
Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre a parede externa do queimador e o ambiente	$h_{qea}^* = \frac{h_{qe \rightarrow a}}{\sigma \cdot (T_{qe}^2 + T_a^2)(T_{qe} + T_a)}$
Coeficiente condutivo análogo para a transferência de calor através da parede da câmara de combustão:	$k_p^* = \frac{k_p}{\sigma \cdot (T_p^2 + T_{pe}^2)(T_p + T_{pe})}$
Coeficiente condutivo análogo para a transferência de calor através da parede do queimador:	$k_q^* = \frac{k_q}{\sigma \cdot (T_q^2 + T_{qe}^2)(T_q + T_{qe})}$

Nesta tabela, constante σ é constante de Stefan-Boltzman, T é a temperatura, h o coeficiente de transferência de calor convectivo e k a condutividade térmica dos elementos identificados como subscritos.

Os potenciais desconhecidos no circuito elétrico representado na figura 2.20 são as radiosidades J_p , J_s e J_{pe} e os poderes emissivos E_p e E_{pe} , e os conhecidos são E_j , E_g , E_s e E_a . Os potenciais E_j , E_g e E_s são calculados por meio dos balanços de energia das respectivas correntes de fluxo de massa e o potencial E_a é especificado indiretamente pela especificação da temperatura ambiente.

Realizando um balanço de correntes no circuito análogo em cada um dos nodos de potenciais desconhecidos, obtém-se um conjunto de equações algébricas, cuja solução pode ser obtida por meio de substituições sucessivas, aplicadas a cada zona.

$$J_p = \frac{\frac{E_j}{R_{10}} + \frac{E_p}{R_{14}} + \frac{E_j^+}{R_{15}} + \frac{E_j^-}{R_{17}} + \frac{J_s}{R_{13}} + \frac{J_s^-}{R_9} + \frac{J_s^+}{R_8} + \frac{J_p^-}{R_7} + \frac{J_p^+}{R_6}}{\frac{1}{R_{10}} + \frac{1}{R_{14}} + \frac{1}{R_{15}} + \frac{1}{R_{17}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_6}} \quad (2.28)$$

$$J_s = \frac{\frac{J_p}{R_{13}} + \frac{E_j^+}{R_{16}} + \frac{E_j^-}{R_{18}} + \frac{E_s}{R_{19}} + \frac{J_p^+}{R_{11}} + \frac{J_p^-}{R_5} + \frac{E_j}{R_{12}}}{\frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{16}} + \frac{1}{R_{18}} + \frac{1}{R_{19}} + \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_{12}}} \quad (2.29)$$

$$E_p = \frac{\frac{J_p}{R_{14}} + \frac{E_{pe}}{R_{21}} + \frac{E_g}{R_{22}} + \frac{E_s}{R_{20}}}{\frac{1}{R_{14}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_{20}}} \quad (2.30)$$

$$E_{pe} = \frac{\frac{E_p}{R_{21}} + \frac{E_a}{R_{25}} + \frac{J_{pe}}{R_{24}}}{\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{25}} + \frac{1}{R_{24}}} \quad (2.32)$$

$$J_{pe} = \frac{\frac{E_{pe}}{R_{24}} + \frac{E_a}{R_{26}}}{\frac{1}{R_{24}} + \frac{1}{R_{26}}} \quad (2.34)$$

Devido às trocas radiativas entre zonas adjacentes, estas equações são todas acopladas. Para a primeira e a última zonas, estas equações sofrem pequenas alterações devido às inclusões das trocas radiativas com a parede do queimador e com o pós-combustor, respectivamente.

Perfis das taxas de transferência de calor e de temperaturas:

As taxas de trocas de calor obtidas a partir do circuito análogo são:

- trocas radiativas a partir do sólido:

$$q_s = \frac{J_s - E_j}{R_{12}} + \frac{J_s^- - E_j}{R_4} + \frac{J_s^+ - E_j}{R_3} \quad (2.35)$$

- trocas radiativas a partir da parede:

$$q_p = \frac{J_p^- - E_j}{R_2} + \frac{J_p^+ - E_j}{R_1} + \frac{J_p - E_j}{R_{10}} \quad (2.36)$$

- trocas de calor convectivo a partir da parede e do sólido:

$$q_g = \frac{E_p - E_g}{R_{22}} + \frac{E_s - E_g}{R_{23}} \quad (2.37)$$

Uma vez calculadas as taxas de transferência de calor por radiação, condução e convecção a partir do circuito análogo, é possível obter-se as temperaturas das correntes do jato ou da chama, do gás anular e do sólido a partir dos respectivos balanços de energia aplicados a cada zona.

As temperaturas interna e externa das paredes são obtidas diretamente dos poderes emissivos correspondentes, calculados aplicando-se a lei de Kirchhoff ao circuito elétrico análogo.

Os autores analisaram também o efeito do número de subdivisões do forno, calculando os perfis de temperaturas do sólido para 10 e 20 zonas, resultando em variações pouco significativas. Analisaram também os efeitos do sentido de fluxo do leito, da fração de umidade no sólido alimentado e da taxa de queima de combustível sobre o perfil de temperatura do sólido, assim como, os efeitos do comprimento forno e do tempo de residência do leito de sólido sobre o tempo no qual o sólido permanece acima de 700K.

A figura 2.21, apresenta resultados obtidos pelos autores para uma simulação de referência.

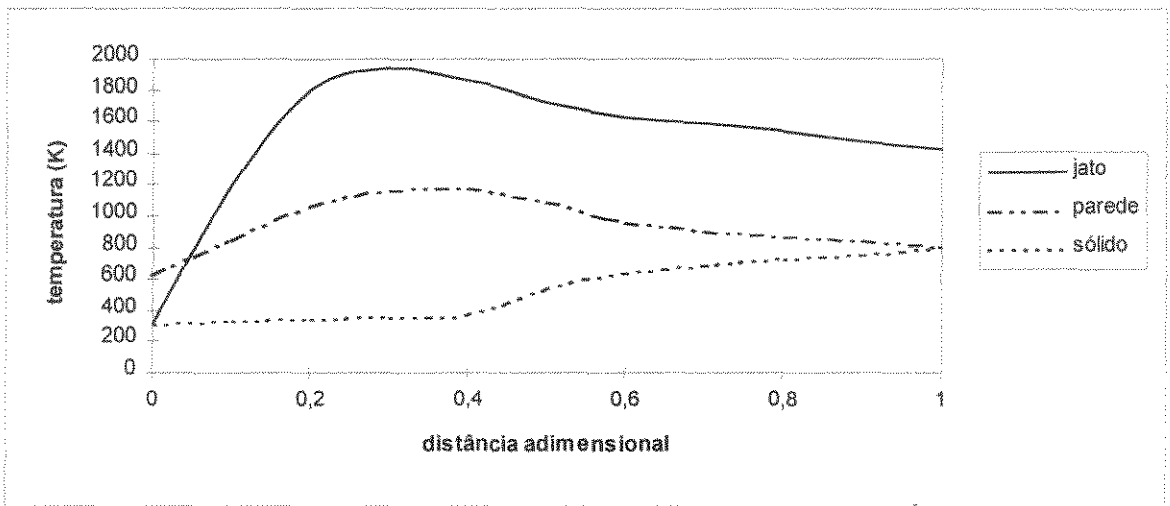


Figura 2.21: Perfis de temperaturas obtidos por Silcox & Pershing⁶, para condições de referência.

CAPÍTULO 3: MODELAGEM MATEMÁTICA EM ESTADO ESTACIONÁRIO

CAPÍTULO 3: MODELAGEM MATEMÁTICA EM ESTADO ESTACIONÁRIO

3.1 Introdução

Pretende-se neste capítulo, desenvolver um modelo matemático, acompanhado dos procedimentos de cálculos e de um código de simulação numérica, para um incinerador composto de um forno rotativo e uma câmara secundária de combustão, em estado estacionário, destinado à destruição térmica de resíduos industriais.

O produto gerado pelo conjunto dos elementos, modelo matemático, procedimento de cálculo e código de simulação numérica, será denominado convenientemente neste trabalho, de simulador do processo de incineração.

Basicamente, espera-se que este simulador, no estágio e nas condições considerados neste capítulo, a partir de condições iniciais de operação, como vazões, temperaturas e composições das correntes de ar primário, ar secundário, combustível auxiliar e resíduos sólidos, forneça os valores destas mesmas variáveis e outras de interesse operacional e de controle, em diversas seções transversais intermediárias ao longo do eixo axial da câmara de combustão.

Este simulador admite a aplicação na simulação do processo de incineração em diversas condições operacionais:

- com ou sem a presença de resíduos sólidos;
- com qualquer teor de cinzas, inclusive para a situação em que a quantidade de sólido a partir de determinada posição axial é nula ou tão pequena que assim pode ser considerada;
- com deficiência ou excesso de oxigênio;
- com resíduos com qualquer teor de umidade, composição ou poder calorífico.

Esta versatilidade permite ao simulador ser aplicável à simulação da câmara primária de combustão (forno rotativo), câmara secundária de combustão (pós-combustor), ou ambos acopladas.

Apesar do simulador ter diversas aplicações, neste trabalho, ele será usado para os testes de sensibilidade paramétrica e de verificação de sua robustez, que é um requisito fundamental para modelos destinados ao uso em controle de processos. Será também, o ponto de partida para o desenvolvimento de um simulador não-estacionário do processo de incineração para uso em controle de processo.

Entre outras aplicações possíveis, poderá ser usado para projeto de câmaras de combustão, para planejamento de operação em função do resíduo a ser queimado com objetivo de obter melhores performances, e finalmente, para treinamento de operadores. Além disso, pode ser ainda empregado como uma ferramenta para ensino e compreensão dos fenômenos que ocorrem em tais sistemas.

3.2 Considerações Sobre o Modelo (hipóteses):

3.2.1 Geometria:

A exemplo do que já foi adotado por outros autores (Silcox & Pershing ⁶ e Fudihara ¹⁶), adotar-se-á uma geometria simplificada para o forno rotativo consistindo de cilindros concêntricos, conforme pode ser visto na figura 3.1.

Para efeito da simulação numérica, o forno será dividido em seções transversais uniformes, delimitando zonas (ou volumes de controle), onde todas as propriedades permanecem constantes.

Dentro de cada zona, há três correntes de fluxos: a chama ou jato, os gases ao redor do jato ou da chama (gás anular), e o leito de sólido.

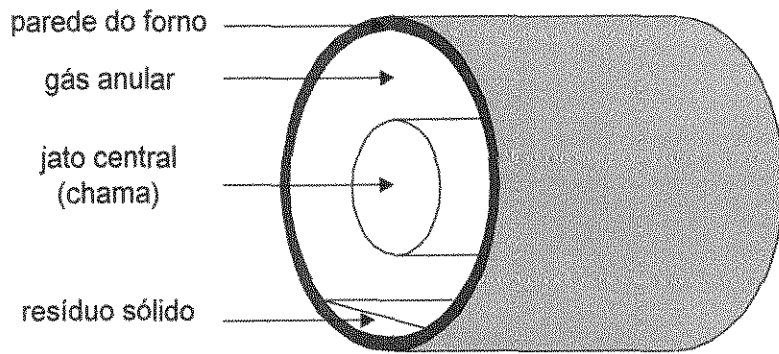


Figura 3.1: Representação das correntes de fluxos do forno rotativo segundo o modelo adotado.

3.2.2. Jato ou chama:

Considera-se a chama com geometria cilíndrica, cujo diâmetro e comprimento dependem da geometria do queimador e das vazões mássicas do combustível e do ar primário. Além disso, a chama pode ter seu diâmetro diferenciado a cada zona, permitindo uma aproximação da chama real que tem geometria aproximadamente cônica. Após o final da chama, o jato é composto de produtos de combustão e produtos de combustão incompleta.

O jato é dividido em três regiões distintas, como pode ser observado na figura 3.2:

- região do estabelecimento da chama onde não ocorre combustão nem aporte de ar secundário;
- região da chama, onde ocorre a reação de combustão do combustível auxiliar, com aporte de gases ricos em oxigênio e nitrogênio proveniente da região anular gasosa;
- região dos produtos de combustão, quando todo combustível auxiliar já foi consumido.

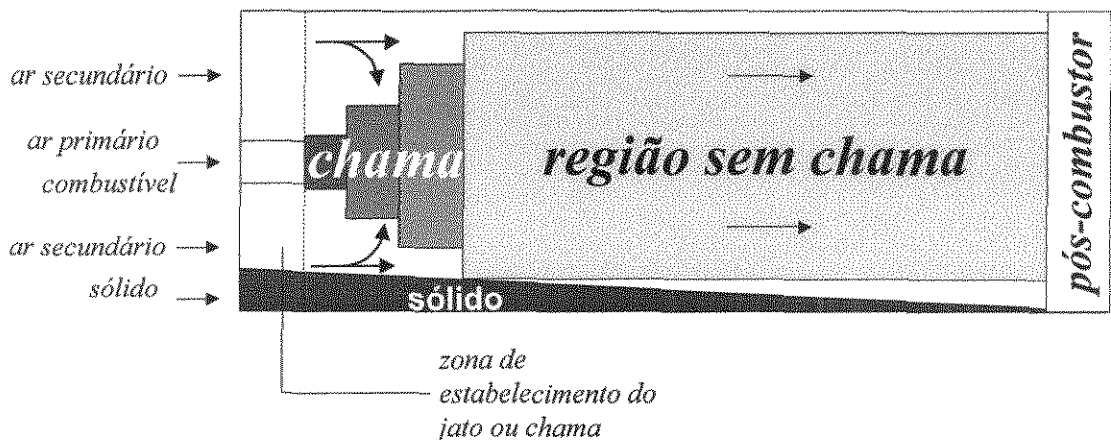


Figura 3.2 : Representação unidimensional das correntes e das regiões da câmara de combustão primária, conforme o modelo adotado.

Outras considerações sobre o jato estão relacionadas a seguir:

- a cinética de combustão é considerada instantânea, limitada pela disponibilidade de oxigênio;
- o oxigênio secundário é fornecido pelo gás anular;
- não há entrada de gás anular no jato na região de estabelecimento do mesmo;
- todo ar primário é consumido devido à pré-mistura;
- o jato tem escoamento empistonado e em regime estacionário;
- os perfis radiais de temperatura são constantes;
- não há trocas radiativas na chama entre zonas adjacentes
- o jato é especificado por uma única temperatura em cada zona.

3.2.3. Resíduos Sólidos.

Os resíduos sólidos a serem incinerados são alimentados na câmara primária de forma que o escoamento seja co-corrente com os gases de combustão.

O sólido, ao longo do forno, sofre perda de massa, de umidade e de substâncias voláteis ou produtos de pirólise.

Sobre o sólido, são formuladas as seguintes hipóteses:

- escoamento empistonado e cocorrente com os gases;
- a superfície do sólido é considerada plana e de altura constante dentro de cada zona. Entretanto, a altura do leito varia de zona para zona devido à perda de massa de sólido;
- não ocorre evaporação de água contida no sólido até que a temperatura atinja 100°C , após o que a temperatura permanece constante até que toda água evapore;
- a perda de massa do sólido será considerada segundo um perfil de redução de massa especificada inicialmente, sendo que a queima efetiva destes gases ocorrerá na região do gás anular;
- a rotação do forno é considerada suficiente para agitar completamente o sólido e manter o leito isotérmico radialmente.

3.2.4. Gás Anular:

A região anular do forno rotativo, pelas hipóteses do modelo, é por onde é admitido o ar secundário que realiza o suprimento do oxigênio necessário para a combustão da chama.

Após o final da chama, a troca de oxigênio deixa de ocorrer e o fluxo torna-se empistonado e uniforme em toda seção do incinerador.

Para efeito de cálculo, a divisão em cilindros concêntricos será mantida na zona sem chama. A hipótese da uniformidade do escoamento será mantida adotando-se as mesmas propriedades físicas e variáveis de processo para as duas regiões (jato e gás anular).

Outras considerações sobre o gás anular são:

- fluxo empistonado em regime estacionário;
- transparente à radiação;
- recebe a umidade e os produtos de volatilização e pirólise provenientes dos resíduos;
- é a região onde ocorre a combustão dos produtos de pirólise e volatilização provenientes do sólido, com cinética instantânea;

- transfere massa para o jato servindo como fonte de oxigênio secundário na região com chama.

3.2.5 Câmara de combustão secundária e câmara de interligação

As hipóteses formuladas anteriormente para a câmara de combustão primária (forno rotativo) são igualmente válidas para as câmaras secundária e de interligação, excetuando-se aquelas referentes ao resíduo sólido. Entretanto, outras hipóteses precisam ser acrescentadas conforme pode ser visto a seguir:

- o resíduo líquido, o ar primário, o ar secundário e o combustível líquido auxiliar são injetados na mesma zona, podendo ser em qualquer posição da câmara secundária;
- a chama é considerada central, paralela ao eixo longitudinal, de forma cilíndrica em cada zona, podendo ter seu raio variado, para simular geometria irregular da chama real;
- a energia remanescente no forno, acrescida daquela referente a injeção do combustível auxiliar na câmara secundária, é suficiente para evaporar instantaneamente todos os componentes voláteis do resíduo líquido, inclusive a umidade, na zona de injeção.
- na câmara de interligação ocorre a remoção das cinzas dos resíduos sólidos.
- para câmara de interligação é utilizado o diâmetro equivalente do cilindro que tem a mesma área interna e o mesmo comprimento, uma vez que, em geral, esta câmara não tem geometria cilíndrica.

A câmara de interligação e as zonas que antecedem a zona de injeção na câmara secundária comportam-se como se fossem zonas da câmara primária na ausência de sólidos, submetidas às novas dimensões e propriedades de transportes. As características são distintas entre as câmaras, especialmente no que diz respeito ao raio interno, espessura da parede e às propriedades do isolamento térmico.

Observando-se a figura 3.3, identifica-se as varias regiões que constituem a câmara de combustão secundária, ou seja, a zona de interligação entre as câmaras, as zonas que antecedem a injeção, a zona de injeção e de estabelecimento do jato da chama do combustível auxiliar, a região da chama, a região pós-chama e a interface com a chaminé.



Figura 3.3 : Representação unidimensional das correntes e das regiões da câmara de combustão secundária, conforme o modelo adotado.

3.2.6. Considerações gerais comuns à todas regiões:

As seguintes hipóteses simplificadoras são comuns à todas as regiões do incinerador:

- todas as superfícies são isotérmicas e cinzentas numa dada zona;
- a radiação refletida em todas as superfícies está difusamente distribuída (intensidade de reflexão independe da direção);
- a radiação emitida por todas as superfícies está difusamente distribuída;
- numa dada zona, a temperatura da superfície da parede do forno é considerada uniforme independente da posição angular;
- todas as vazões mássicas podem ser ajustadas independentemente, assim como as suas composições;
- são consideradas as trocas radiativas entre zonas adjacentes.
- considera-se ainda as trocas radiativas entre a parede do queimador e a primeira e a segunda zonas, sendo que nesta última é onde inicia-se a chama e onde espera-se o maior valor para a temperatura.

3.2.7 Principais diferenças em relação aos modelos apresentados por outros autores:

O presente trabalho tem por base os trabalhos dos autores Silcox e Pershing⁶ e Fudihara¹⁶, em relação aos quais apresenta várias modificações, atendendo aos objetivos principais desta pesquisa.

Estas modificações podem ser resumidas por:

1. admite-se a presença de substância passíveis de combustão ou volatilização no resíduo sólido;
2. admite-se a variação axial da altura do leito de sólido devido à redução de massa provocada pela perda de umidade, compostos voláteis e produtos de pirólise;
3. admite-se a variação axial do diâmetro da chama visando a aproximação da geometria real que é aproximadamente cônica;
4. admite-se a alteração da composição dos gases devido às transferências de massas internas e à geração dos produtos de combustão;
5. considera-se a influência da composição e da temperatura sobre as propriedades físicas, principalmente, as capacidades caloríficas;
6. admite-se as trocas radiativas da parede do queimador com a segunda zona;
7. admite-se a possibilidade do enriquecimento do ar de combustão com oxigênio;
8. o simulador pode ser aplicado à câmara de combustão primária, à câmara de combustão secundária, ou à ambas simultaneamente, acopladas por uma câmara de interligação;
9. admite-se a injeção de resíduos líquidos na câmara de combustão secundária.
10. a temperatura da última seção é calculada e não especificada inicialmente;
11. o gás anular e o jato (produtos de combustão) tornam-se uma única corrente após o final da chama, à qual está associada uma única temperatura e uma única composição a cada zona.

As inovações introduzidas e listadas acima, têm por objetivo transformar os modelos já desenvolvidos e publicados na literatura, em modelos que se aproximam mais da realidade das plantas industriais que destinam-se à incineração de resíduos industriais; e que distinguem-se significativamente de fornos rotativos destinados à simples descontaminação de solos mediante

destruição térmica. Nestes casos, a redução de massa do leito de sólido e a energia gerada pela combustão dos contaminantes podem ser ignoradas sem afetar os resultados da simulação numérica. Além disso, a umidade do sólido está, em geral, dentro de limites estreitos. A partir do modelo proposto neste trabalho, e do código de simulação numérica desenvolvido, pode-se simular a queima de resíduos sólidos industriais, com qualquer taxa de umidade, poder calorífico, composição, ou cinética de destruição do resíduo.

3.3. Modelagem matemática e procedimento de cálculo para os processos de transferência de calor na câmara de combustão primária considerando a presença de resíduo sólido.

3.3.1 Introdução:

Os processos de transferência de calor considerados no modelo proposto neste trabalho para a incineração de resíduos sólidos em câmara primária são:

- radiação do jato atingindo a parede e a carga sólida;
- convecção entre o gás anular, a parede e a superfície do leito de sólido;
- condução através da parede;
- convecção e radiação entre a parede e o sólido;
- convecção e radiação no lado externo da parede (entre a parede externa e o meio ambiente);
- trocas radiativas entre a parede interna do queimador e os demais elementos da primeira e da segunda zonas (jato da chama, carga sólida e parede interna);
- trocas radiativas na última zona entre a câmara de pós-combustão e o jato cilíndrico sem chama, carga sólida e parede interna.

Para representar os processos de transferência de calor em cada zona da câmara de combustão, segundo o modelo adotado, pode ser empregada a analogia com circuitos elétricos proposta por Oppenheim²⁰ em 1956, na qual os potenciais elétricos, resistências e correntes elétricas são equivalentes aos potenciais térmicos (radiosidades e poderes emissivos), resistência à transferência de calor e taxa de transferência de calor, respectivamente.

A condução e a convecção incluem-se no circuito por um artifício, onde os coeficientes condutivos e convectivos são transformados em coeficientes análogos (Apêndice C). Desta forma, pode-se construir circuitos elétricos análogo para obter-se os potenciais (radiosidades e poderes emissivos) e as trocas de calor, a exemplo do que fizeram Silcox & Pershing⁶ e Fudihara¹⁶.

A seguir são apresentados diferentes circuitos elétricos correspondentes à primeira zona, onde há interação com a parede do queimador e a zona 2, às zonas intermediárias na região da chama, às zonas intermediárias na região sem chama e à última zona, onde há interação com o pós combustor.

O circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas para zonas intermediárias na região sem chama pode ser visto na figura 3.4. O circuito visto nesta figura, possui resistências que representam as trocas radiativas entre o jato, a parede cilíndrica e a superfície do sólido (R_{jp} , R_{js} , R_{ps} , R_p , R_s), as trocas convectivas entre o gás, a parede e o leito sólido (R_{cps} , R_{cpg} , R_{csg}), as trocas condutivas através da parede da câmara de combustão (R_{cppe}) e finalmente, as trocas radiativas e convectivas entre a parede externa e o meio ambiente (R_{pe} , R_{pea} , R_{cpea}). Também podem ser observadas na figura 3.4, as trocas radiativas entre as superfícies de zonas adjacentes, representadas pelas resistências R_{sjp} , R_{jsp} , R_{psp} , R_{spp} , R_{jpp} , R_{pjp} e R_{ppp} .

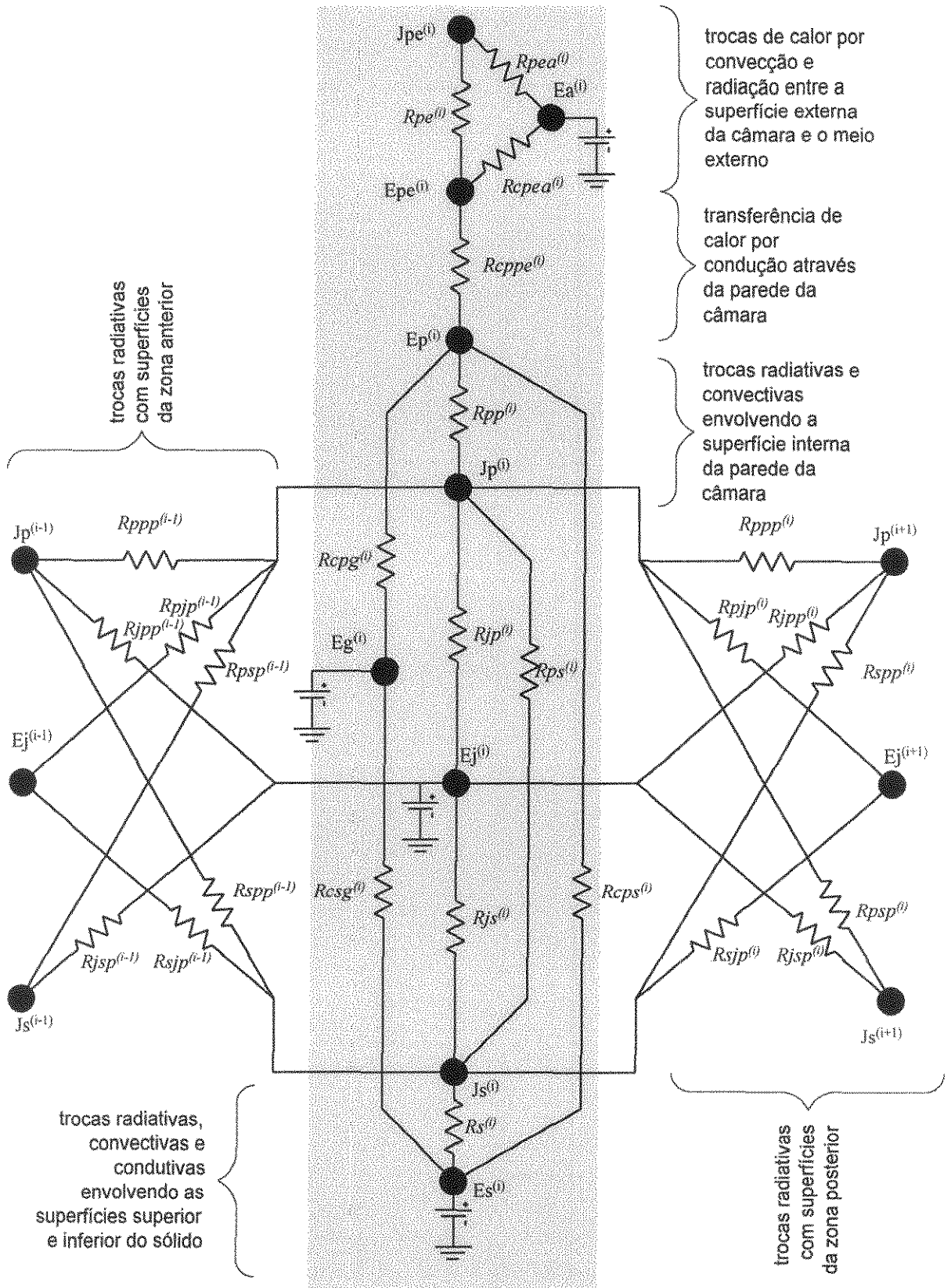


Figura 3.4: Circuito elétrico resistivo que representa as trocas radiativas, convectivas e condutivas nas zonas intermediárias da câmara de combustão primária.

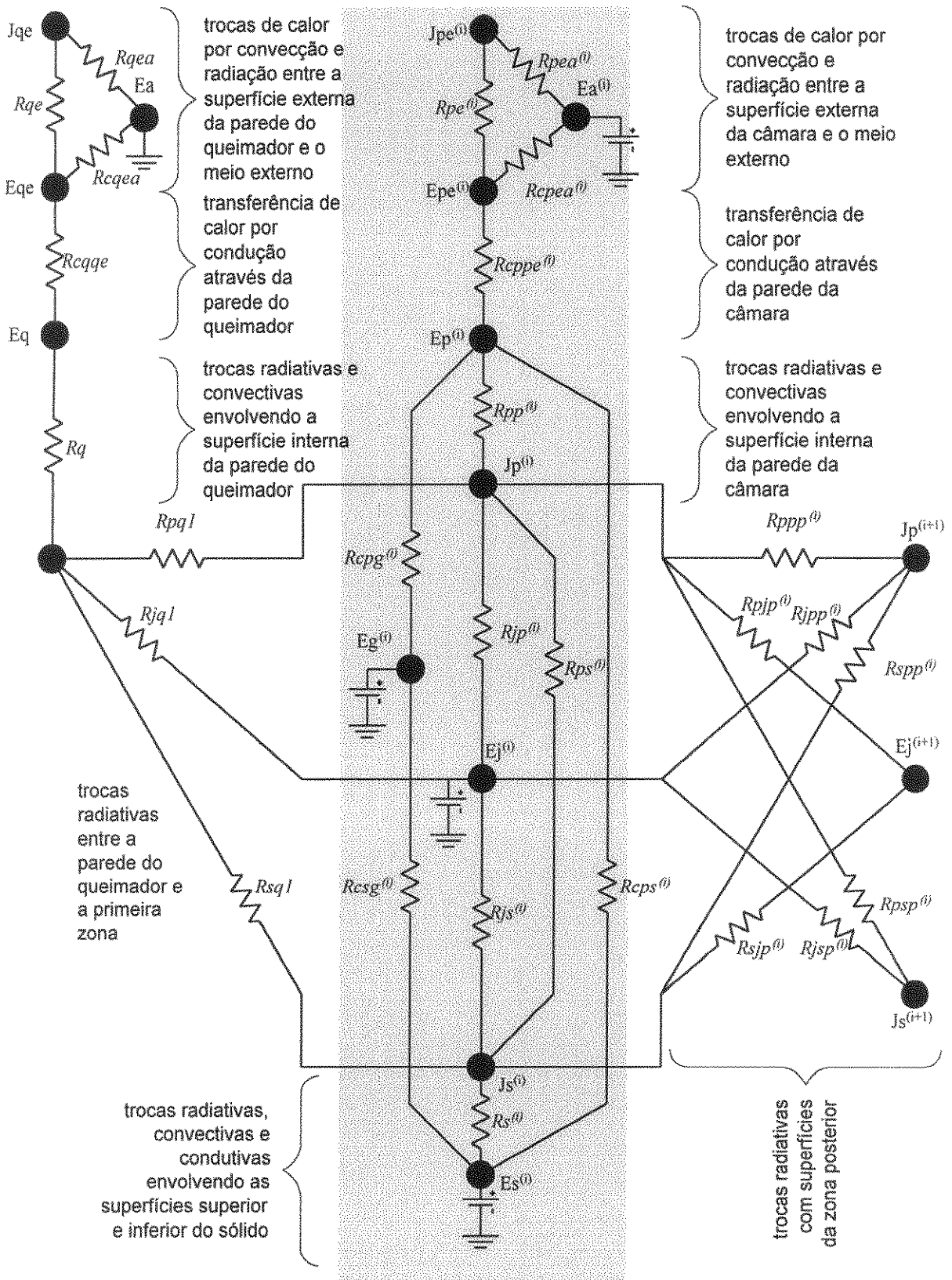


Figura 3.5: Circuito elétrico resistivo que representa as trocas de calor por radiação, convecção e condução na primeira zona da câmara de combustão primária.

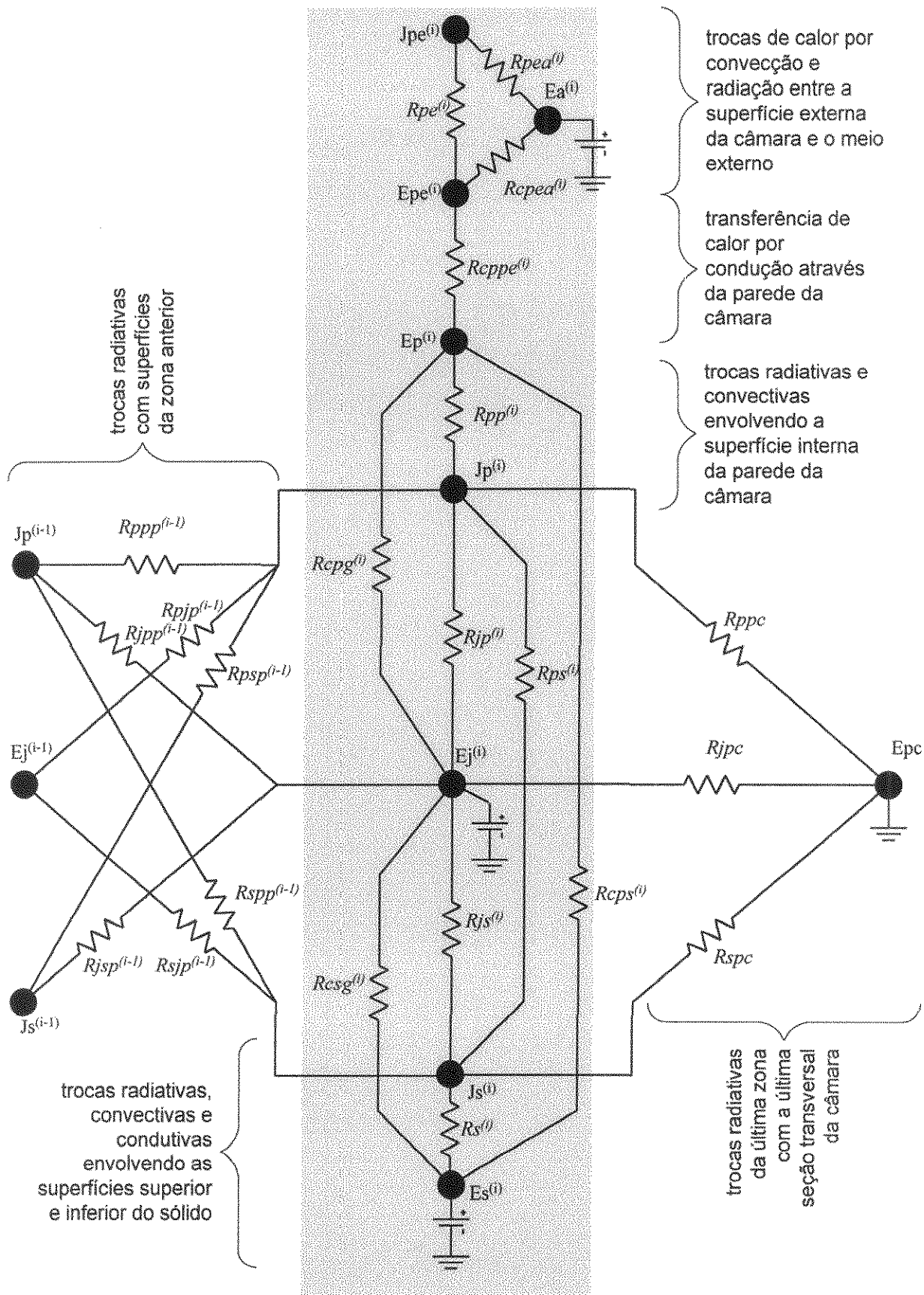


Figura 3.6: Circuito elétrico resistivo que representa as trocas de calor por radiação, convecção e condução na última zona da câmara de combustão primária.

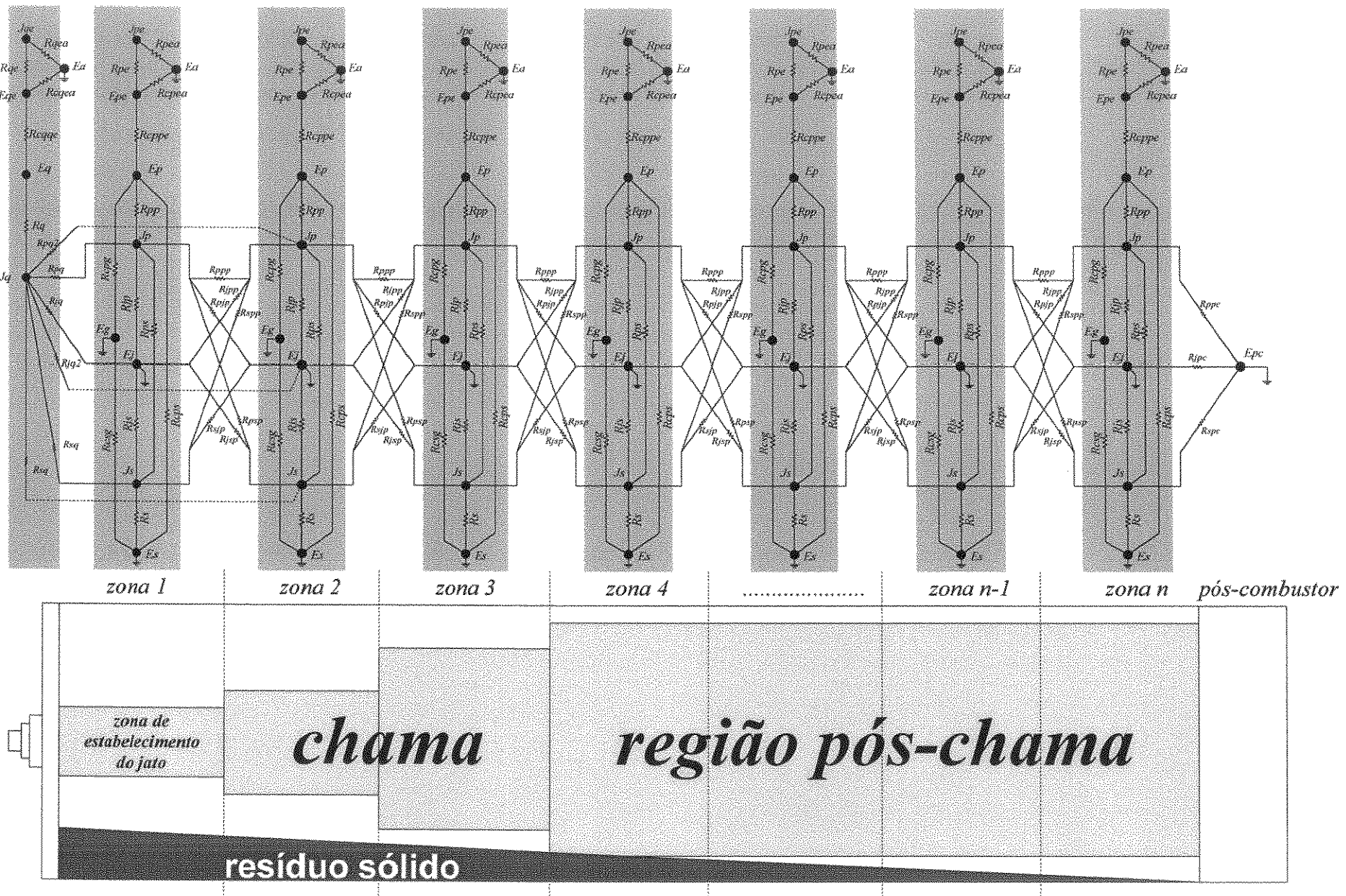


Figura 3.7: Circuito elétrico resistivo que representa os processos de transferência de calor na câmara de combustão primária.

O circuito referente à primeira zona (figura 3.5) diferencia-se daquele visto na figura 3.4, pela inclusão de resistências que representam as trocas radiativas entre as superfícies desta com a parede do queimador (R_{pq1} , R_{jq1} , R_{sq1} , R_q), a troca condutiva através da parede do queimador (R_{cqqe}), e as trocas radiativas e convectivas da parede externa do queimador e o meio ambiente (R_{qe} , R_{qea} e R_{cqea}).

O circuito referente à última zona (figura 3.6) inclui as trocas radiativas com o pós-combustor (R_{jpc} , R_{spc} , R_{ppc}) cuja fronteira corresponde à última seção transversal que delimita a última zona. Considera-se, para a simulação da câmara de combustão primária isoladamente, que o pós-combustor é representado por um único valor de temperatura (T_{pc}), diferentemente do que ocorre para a simulação completa que inclui a predição dos perfis axiais de temperatura e de outras variáveis para a câmara de combustão secundária (pós-combustor).

O circuito referente à segunda zona leva em conta, segundo as hipóteses do modelo, as trocas de calor radiativas desta zona com a parede do queimador, acarretando a inclusão no circuito elétrico geral das resistências R_{pq2} , R_{jq2} e R_{sq2} , conforme pode ser visto na figura 3.7.

Nestes circuitos considera-se como potenciais desconhecidos as radiosidades do sólido (J_s), da parede interna da câmara de combustão (J_p), da parede externa da câmara (J_{pe}), da parede interna do queimador (J_q), da parede externa do queimador (J_{qe}) e os poderes emissivos da parede interna da câmara (E_p), da parede externa da câmara (E_{pe}), da parede interna do queimador (E_q) e da parede externa do queimador (E_{qe}).

Os potenciais conhecidos são os poderes emissivos do sólido (E_s), do gás (E_g), do jato (E_j) e do ambiente (E_a).

O potencial poder emissivo do pós-combustor (E_{pc}), no modelo proposto neste trabalho, representa o potencial referente à interface da câmara primária com o pós-combustor, para o caso da simulação exclusivamente da câmara primária; ou o potencial referente à interface entre a câmara secundária e a chaminé, no caso da simulação das câmaras primária e secundária acopladas. Em ambos os casos, o potencial E_{pc} é uma variável desconhecida e deve ser calculada.

3.3.2. Definições das Resistências à transferência de calor:

Os coeficientes convectivos e condutivos são transformados em coeficientes análogos, a exemplo do que realizaram os autores já citados^{6,16}, cujo desenvolvimento matemático pode ser acompanhado pelo Apêndice C.

- Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre a parede interna da câmara de combustão e o sólido:

$$h_{ps}^* = \frac{h_{ps}}{\sigma \cdot (T_p^2 + T_s^2)(T_p + T_s)} \quad (3.1)$$

- Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre o gás anular e a parede interna da câmara de combustão:

$$h_{gp}^* = \frac{h_{gp}}{\sigma \cdot (T_g^2 + T_p^2)(T_g + T_p)} \quad (3.2)$$

- Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre o gás anular e o sólido:

$$h_{gs}^* = \frac{h_{gs}}{\sigma \cdot (T_g^2 + T_s^2)(T_g + T_s)} \quad (3.3)$$

• Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre a parede externa e o ambiente:

$$h_{pea}^* = \frac{h_{pea}}{\sigma \cdot (T_{pe}^2 + T_a^2)(T_{pe} + T_a)} \quad (3.4)$$

• Coeficiente convectivo análogo para a transferência de calor entre a parede externa do queimador e o ambiente:

$$h_{qea}^* = \frac{h_{qea}}{\sigma \cdot (T_{qe}^2 + T_a^2)(T_{qe} + T_a)} \quad (3.5)$$

• Coeficiente condutivo análogo para transferência de calor através da parede da câmara de combustão:

$$k_p^* = \frac{k_p}{\sigma \cdot (T_p^2 + T_{pe}^2)(T_p + T_{pe})} \quad (3.6)$$

• Coeficiente condutivo análogo para transferência de calor através da parede do queimador:

$$k_q^* = \frac{k_q}{\sigma \cdot (T_q^2 + T_{qe}^2)(T_q + T_{qe})} \quad (3.7)$$

De acordo com Silcox & Pershing⁶ pode-se definir as resistências à transferência de calor representadas nas figuras 3.4 a 3.7, a partir dos coeficientes análogos, das emissividades, das transmissividades e fatores de forma. As identidades observadas na tabela 2.1, onde constam as resistências definidas no trabalho de Silcox & Pershing⁶, não são aplicáveis neste caso, pois as áreas das superfícies que trocam radiação variam de zona para zona, devido à redução de massa do sólido, diferentemente do que considera em suas hipóteses, o autor citado.

A seguir, estão relacionadas as resistências à transferência de calor, onde constam à frente de cada uma, entre parênteses, os potenciais entre os quais a resistência se interpõe.

Para entender a lógica da nomenclatura adotada para as resistências, é descrita a seguir, de forma sucinta.

- R_{ab} resistência à transferência de calor por **radiação** entre a superfície “a” e a “b”, ambas dentro da mesma zona;
- R_{abp} resistência à transferência de calor por **radiação** entre a superfície “a” e a “b”, sendo que “b” pertence à zona posterior (indicado por “p”) a qual pertence “a”;
- R_{cab} resistência à transferência de calor por **convecção** entre a superfície “a” e a “b”, ambas dentro da mesma zona
- R_{aq}^i resistência à transferência de calor por **radiação** entre a superfície “a” da zona “i” e a superfície da parede do queimador. O índex “i” pode ser 1 ou 2.

Interações dentro da mesma zona:

$$R_{jp} = \frac{1}{\mathcal{E}_j A_j F_{jp}} \quad (E_j^i, J_p^i) \quad (3.8)$$

$$R_{js} = \frac{1}{\mathcal{E}_j A_j F_{js}} \quad (E_j^i, J_s^i) \quad (3.9)$$

$$R_{pp} = \frac{1 - \mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_p A_p} \quad (J_p^i, E_p^i) \quad (3.10)$$

$$R_{ps} = \frac{1}{\tau_g A_s F_{sp}} \quad (J_p^i, J_s^i) \quad (3.11)$$

$$R_{ss} = \frac{1 - \mathcal{E}_s}{\mathcal{E}_s A_s} \quad (J_s^i, E_s^i) \quad (3.12)$$

$$R_{cps} = \frac{1}{A_{sp} h_{ps}^*} \quad (E_p^i, E_s^i) \quad (3.13)$$

$$R_{cpg} = \frac{1}{A_p h_{gp}^*} \quad (E_p^i, E_g^i) \quad (3.14)$$

$$R_{csg} = \frac{1}{A_s h_{gs}^*} \quad (E_s^i, E_q^i) \quad (3.15)$$

Interações do primeira zona com a parede do queimador:

$$R_q = \frac{1 - \mathcal{E}_q}{\mathcal{E}_q A_q} \quad (J_q, E_q) \quad (3.16)$$

$$R_{jq}^{(1)} = \frac{1}{\mathcal{E}_j A_j F_{jq}^{(1)}} \quad (E_j^1, J_q^1) \quad (3.17)$$

$$R_{sq}^{(1)} = \frac{1}{\tau_g A_s F_{sq}^{(1)}} \quad (J_s^1, J_q) \quad (3.18)$$

$$R_{pq}^{(1)} = \frac{1}{\tau_g A_p F_{pq}^{(1)}} \quad (J_p^1, J_q^1) \quad (3.19)$$

Interações da segunda zona com a parede do queimador:

$$Rjq^{(2)} = \frac{I}{\mathcal{E}_j A_j F_{jq}^{(2)}} \quad (Ej^2, Jq) \quad (3.20)$$

$$Rsq^{(2)} = \frac{I}{\tau_s A_s F_{sq}^{(2)}} \quad (Js^2, Jq) \quad (3.21)$$

$$Rpq^{(2)} = \frac{I}{\tau_g A_p F_{pq}^{(2)}} \quad (Jp^2, Jq) \quad (3.22)$$

Interação do última zona com o pós-combustor:

$$Rjpc = \frac{1}{\mathcal{E}_j A_j F_{jpc}} \quad (Ej^n, Epc) \quad (3.23)$$

$$Rspc = \frac{1}{\tau_s A_s F_{spc}} \quad (Js^n, Epc) \quad (3.24)$$

$$Rppc = \frac{1}{\tau_g A_p F_{ppc}} \quad (Jp^n, Epc) \quad (3.25)$$

Interações com zonas adjacentes:

$$Rjpp^{(i)} = \frac{1}{\epsilon_j \cdot A_j^{(i)} \cdot F_{jpp}^{(i)}} \quad (Ej^i, Jp^{i-1}) \quad (3.24)$$

$$Rjsp^{(i)} = \frac{1}{\epsilon_j \cdot A_j^{(i)} \cdot F_{jsp}^{(i)}} \quad (Ej^i, Js^{i-1}) \quad (3.25)$$

$$Rpsp^{(i)} = \frac{1}{\tau_g \cdot A_p^{(i)} \cdot F_{psp}^{(i)}} \quad (Jp^i, Js^{i-1}) \quad (3.26)$$

$$Rppp^{(i)} = \frac{1}{\tau_g \cdot A_p^{(i)} \cdot F_{ppp}^{(i)}} \quad (Jp^i, Jp^{i-1}) \quad (3.27)$$

$$Rpjp^{(i)} = \frac{1}{\epsilon_p \cdot A_p^{(i)} \cdot F_{rip}^{(i)}} \quad (Ej^i, Jp^{i-1}) \quad (3.28)$$

$$Rsjp^{(i)} = \frac{1}{\epsilon_s \cdot A_s^{(i)} \cdot F_{sjp}^{(i)}} \quad (Ej^i, Js^{i-1}) \quad (3.29)$$

$$Rspj^{(i)} = \frac{1}{\tau_g \cdot A_s^{(i)} \cdot F_{spp}^{(i)}} \quad (Jp^i, Js^{i-1}) \quad (3.30)$$

Interações com o meio externo:

$$R_{qea} = \frac{1}{A_{qe}} \quad (J_{qe}, E_a) \quad (3.31)$$

$$R_{pea} = \frac{1}{A_{pe}} \quad (J_{pe}^1, E_a) \quad (3.32)$$

$$R_{pe} = \frac{1 - \mathcal{E}_{pe}}{\mathcal{E}_{pe} A_{pe}} \quad (J_{pe}, E_{pe}) \quad (3.33)$$

$$R_{qe} = \frac{1 - \mathcal{E}_{qe}}{\mathcal{E}_{qe} A_{qe}} \quad (J_{qe}, E_{qe}) \quad (3.34)$$

$$R_{cppe} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)}{2\pi\Delta z k_p^*} \quad (E_{pe}^i, E_{pe}^i) \quad (3.35)$$

$$R_{cpea} = \frac{l}{A_{pe} h_{pea}^*} \quad (E_{pe}^i, E_a) \quad (3.36)$$

$$R_{cqqe} = \frac{h_q}{A_q k_q^*} \quad (E_q, E_{qe}) \quad (3.37)$$

$$R_{cqe} = \frac{l}{A_q h_{qea}^*} \quad (E_{qe}, E_a) \quad (3.38)$$

3.3.3. Cálculo dos potenciais do circuito análogo com a presença de sólidos:

Aplicando-se a lei das correntes de Kirchhoff nos circuitos elétricos, obtêm-se vários sistemas de equações lineares, aplicados especificamente a cada zona, conforme mostrado a seguir.

• Para a primeira zona:

a. Potencial $J_p(i)$:

$$J_p^{(1)} = \frac{\frac{J_s^{(1)}}{R_{ps}} + \frac{E_p^{(1)}}{R_p} + \frac{E_j^{(1)}}{R_{jp}} + \left(\frac{J_q}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{J_s^{(2)}}{R_{psp}^{(1)}} + \frac{J_p^{(2)}}{R_{ppp}^{(1)}} + \frac{E_j^{(2)}}{R_{pjp}^{(1)}} \right)}{\frac{1}{R_{ps}} + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{jp}} + \left(\frac{1}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{psp}^{(1)}} + \frac{1}{R_{ppp}^{(1)}} + \frac{1}{R_{pjp}^{(1)}} \right)} \quad (3.39)$$

b. Potencial $J_s(i)$:

$$J_s^{(1)} = \frac{\frac{J_p^{(1)}}{R_{ps}} + \left(\frac{J_q}{R_{sq}} + \frac{E_j^{(2)}}{R_{sjp}^{(1)}} + \frac{J_p^{(2)}}{R_{spp}^{(1)}} \right) + \frac{E_s^{(1)}}{R_s} + \frac{E_j^{(1)}}{R_{js}}}{\frac{1}{R_{ps}} + \left(\frac{1}{R_{sq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{sjp}^{(1)}} + \frac{1}{R_{spp}^{(1)}} \right) + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{js}}} \quad (3.40)$$

c. Potencial $Ep(i)$:

$$Ep^{(i)} = \frac{\frac{J_p}{R_p} + \frac{E_{pe}}{R_{cppe}} + \frac{E_g^{(i)}}{R_{cpg}} + \frac{E_s^{(i)}}{R_{cps}}}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cppe}} + \frac{1}{R_{cpg}} + \frac{1}{R_{cps}}} \quad (3.41)$$

d. Potencial $Epe(i)$:

$$Epe^{(i)} = \frac{\frac{Ep^{(1)}}{R_{cppe}} + \frac{Ea}{R_{cpea}} + \frac{J_{pe}}{R_{pe}}}{\frac{1}{R_{cppe}} + \frac{1}{R_{cpea}} + \frac{1}{R_{pe}}} \quad (3.42)$$

e. Potencial $Jpe(i)$:

$$Jpe^{(i)} = \frac{\frac{Epe^{(i)}}{R_{pe}} + \frac{Ea}{R_{pea}}}{\frac{1}{R_{pe}} + \frac{1}{R_{pea}}} \quad (3.43)$$

f. Potencial Jq :

$$Jq = \frac{\frac{Eq}{R_q} + \frac{J_p^{(1)}}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{E_j^{(1)}}{R_{jq}^{(1)}} + \frac{J_s^{(1)}}{R_{sq}^{(1)}} + \frac{J_p^{(2)}}{R_{pq}^{(2)}} + \frac{E_j^{(2)}}{R_{jq}^{(2)}} + \frac{J_s^{(2)}}{R_{sq}^{(2)}}}{\frac{1}{R_q} + \frac{1}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{jq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{sq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{pq}^{(2)}} + \frac{1}{R_{jq}^{(2)}} + \frac{1}{R_{sq}^{(2)}}} \quad (3.44)$$

g. Potencial Eq :

$$Eq = \frac{\frac{J_q}{R_q} + \frac{E_{qe}}{R_{cqqe}}}{\frac{1}{R_q} + \frac{1}{R_{cqqe}}} \quad (3.45)$$

h. Potencial Eqe :

$$E_{qe} = \frac{\frac{E_q}{R_{cqqe}} + \frac{J_{qe}}{R_{qe}} + \frac{E_a}{R_{cqe a}}}{\frac{1}{R_{cqqe}} + \frac{1}{R_{qe}} + \frac{1}{R_{cqe a}}} \quad (3.46)$$

i. Potencial J_{qe} :

$$J_{qe} = \frac{\frac{E_{qe}}{R_{qe}} + \frac{E_a}{R_{qe a}}}{\frac{1}{R_{qe}} + \frac{1}{R_{qe a}}} \quad (3.47)$$

Rearranjando,obtem-se:

$$-J_p^{(1)} \cdot S1 + \frac{J_s^{(1)}}{R_{ps}} + \frac{E_p^{(1)}}{R_p} + \frac{J_q}{R_{pq}} = -\frac{E_j^{(1)}}{R_{jp}} - \frac{J_s^{(2)}}{R_{psp}^{(1)}} - \frac{J_p^{(2)}}{R_{ppp}^{(1)}} - \frac{E_j^{(2)}}{R_{jpp}^{(1)}} \quad (3.48)$$

$$\frac{J_p^{(1)}}{R_{ps}} - J_s^{(1)} \cdot S2 + \frac{J_q}{R_{sq}} = -\frac{E_s^{(1)}}{R_s} - \frac{E_j^{(1)}}{R_{js}} - \frac{E_j^{(2)}}{R_{sjp}^{(1)}} - \frac{J_p^{(2)}}{R_{spp}^{(1)}} \quad (3.49)$$

$$\frac{J_p^{(1)}}{R_p} - E_p^{(1)} \cdot S3 + \frac{E_{pe}^{(1)}}{R_{cppe}} = -\frac{E_g^{(1)}}{R_{cpg}} - \frac{E_s^{(1)}}{R_{cps}} \quad (3.50)$$

$$\frac{E_p^{(1)}}{R_{cppe}} + \frac{J_{pe}^{(1)}}{R_{pe}} - E_{pe}^{(1)} \cdot S4 = -\frac{E_a}{R_{cpe a}} \quad (3.51)$$

$$\frac{E_{pe}^{(1)}}{R_{pe}} - S5 \cdot J_{pe}^{(1)} = -\frac{E_a}{R_{pe a}} \quad (3.52)$$

$$\frac{J_p^{(1)}}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{J_s^{(1)}}{R_{sq}^{(1)}} - S6 \cdot J_q + \frac{E_q}{R_q} = \frac{E_j^{(1)}}{R_{jq}^{(1)}} + \frac{J_p^{(2)}}{R_{pq}^{(2)}} + \frac{E_j^{(2)}}{R_{jq}^{(2)}} + \frac{J_s^{(2)}}{R_{sq}^{(2)}} \quad (3.53)$$

$$\frac{J_q}{R_q} - S7 \cdot E_q + \frac{E_{qe}}{R_{cqqe}} = 0 \quad (3.54)$$

$$\frac{J_{qe}}{R_{qe}} - S8 \cdot E_{qe} + \frac{E_q}{R_{cqqe}} = -\frac{E_a}{R_{cqe a}} \quad (3.55)$$

$$\frac{E_{qe}}{R_{qe}} - S9 \cdot J_{qe} = -\frac{E_a}{R_{qe a}} \quad (3.56)$$

nas quais:

$$S1 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} + \left(\frac{1}{Rpq^{(1)}} + \frac{1}{Rpsp^{(1)}} + \frac{1}{Rppp^{(1)}} + \frac{1}{Rpjp^{(1)}} \right) \quad (3.57)$$

$$S2 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rs q^{(1)}} + \frac{1}{Rs jp^{(1)}} + \frac{1}{Rs pp^{(1)}} + \frac{1}{Rs} + \frac{1}{Rjs} \quad (3.58)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcp g} + \frac{1}{Rcps} \quad (3.59)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea} \quad (3.61)$$

$$S6 = \frac{1}{Rq} + \frac{1}{Rp q^{(1)}} + \frac{1}{Rj q^{(1)}} + \frac{1}{Rs q^{(1)}} + \frac{1}{Rp q^{(2)}} + \frac{1}{Rj q^{(2)}} + \frac{1}{Rs q^{(2)}} \quad (3.62)$$

$$S7 = \frac{1}{Rq} + \frac{1}{Rcq qe} \quad (3.63)$$

$$S8 = \frac{1}{Rcq qe} + \frac{1}{Rqe} + \frac{1}{Rqea} \quad (3.64)$$

$$S9 = \frac{1}{Rqe} + \frac{1}{Rqea} \quad (3.65)$$

As equações 3.48 a 3.56 podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$-S1 \frac{1}{Rps} \quad \frac{1}{Rp} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rpq} \quad 0 \quad 0 \quad 0$	$Jp^{(i)}$	$A1$
$\frac{1}{Rps} -S2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rs q} \quad 0 \quad 0 \quad 0$	$Js^{(i)}$	$A2$
$\frac{1}{Rp} \quad 0 \quad -S3 \quad \frac{1}{Rcppe} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$	$Ep^{(i)}$	$\frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps}$
$0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rcppe} -S4 \quad \frac{1}{Rpe} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$	$Epe^{(i)}$	$-\frac{Ea}{Rcpea}$
$0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rpe} -S5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$	$Jpe^{(i)}$	$-\frac{Ea}{Rpea}$
$\frac{1}{Rpq} \quad \frac{1}{Rs q} \quad 0 \quad 0 \quad 0 -S6 \quad \frac{1}{Rq} \quad 0 \quad 0$	Jq	$-\frac{Ej^{(i)}}{Rjq^{(1)}}$
$0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rq} -S7 \quad \frac{1}{Rcq qe} \quad 0$	Eq	0
$0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rcq qe} -S8 \quad \frac{1}{Rqe}$	Eqe	$-\frac{Ea}{Rcq ea}$
$0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{Rqe} -S9$	Jqe	$-\frac{Ea}{Rqea}$

(3.66)

sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^1}{Rjp} - \left(\frac{Js^{(2)}}{Rpsp^{(1)}} + \frac{Jp^{(2)}}{Rppp^{(1)}} + \frac{Ej^{(2)}}{Rpjp^{(1)}} \right) \quad (3.67)$$

$$A2 = -\frac{Es^i}{Rs} - \frac{Ej^i}{Rjs} - \left(\frac{Ej^{(2)}}{Rsjp^{(1)}} + \frac{Jp^{(2)}}{Rspp^{(1)}} \right) \quad (3.68)$$

• Para a segunda zona:

a. Potencial $Jp(i)$:

$$Jp^{(i)} = \frac{\left[\left(\frac{Js^{(i)}}{Rps} + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} + \frac{Ej^{(i)}}{Rjp} \right) + \left(\frac{Js^{(i+1)}}{Rpsp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i+1)}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rpjp^{(i)}} \right) \right]}{\left[\left(\frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} \right) + \left(\frac{1}{Rpsp^{(i)}} + \frac{1}{Rppp^{(i)}} + \frac{1}{Rpjp^{(i)}} \right) \right]} + \frac{Jq}{Rpq^{(2)}} \quad (3.69)$$

b. Potencial $J_s(i)$:

$$J_s^{(i)} = \frac{\left[\left(\frac{Jp^{(i)}}{Rps} + \frac{Es^{(i)}}{Rs} + \frac{Ej^{(i)}}{Rjs} \right) + \left(\frac{Ej^{(i+1)}}{Rsjp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i+1)}}{Rspp^{(i)}} \right) \right]}{\left[\left(\frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rs} + \frac{1}{Rjs} \right) + \left(\frac{1}{Rsjp^{(i)}} + \frac{1}{Rspp^{(i)}} \right) \right]} + \frac{Jq}{Rs^{(2)}} \quad (3.70)$$

c. Potencial $Ep(i)$ (idem à primeira zona):

$$Ep^{(i)} = \frac{\frac{Jp}{Rp} + \frac{Epe}{Rcppe} + \frac{Eg(i)}{Rcpge} + \frac{Es(i)}{Rcps}}{\frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpge} + \frac{1}{Rcps}} \quad (3.41)$$

d. Potencial $Epe(i)$ (idem à primeira zona):

$$Epe^{(i)} = \frac{\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Ea}{Rcpea} + \frac{Jpe}{Rpe}}{\frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe}} \quad (3.42)$$

e. Potencial $Jpe(i)$ (idem à primeira zona):

$$Jpe^{(i)} = \frac{\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} + \frac{Ea}{Rpea}}{\frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea}} \quad (3.43)$$

Rearranjando,obtem-se:

$$-Jp^{(i)} \cdot SI + \frac{Js^{(i)}}{Rps} + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjp} - \left(\frac{Js^{(i+1)}}{Rpsp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i+1)}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rpjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Js^{(i-1)}}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rppp^{(i-1)}} \right) + \frac{Jq}{Rpq^{(2)}} \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} \frac{Jp^{(i)}}{Rps} - Js^{(i)} \cdot S2 = & - \left(\frac{Ej^{(i)}}{Rjs} + \frac{Es^{(i)}}{Rs} \right) - \left(\frac{Jp^{(i+1)}}{Rspp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rsjp^{(i)}} \right) \\ & - \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rspp^{(i-1)}} \right) + \frac{Jq}{Rs q^{(2)}} \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp} - Ep^{(i)} \cdot S3 + \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} = - \frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \quad (3.50)$$

$$\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(i)}}{Rpe} - Epe^{(i)} \cdot S4 = - \frac{Ea}{Rcpea} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} - S5 \cdot Jpe^{(i)} = - \frac{Ea}{Rpea} \quad (3.52)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp q^{(2)}} + \frac{Js^{(i)}}{Rs q^{(2)}} - S6 \cdot Jq + \frac{Eq}{Rq} = \frac{Ej^{(i)}}{Rj q^{(2)}} \quad (3.73)$$

Nas quais;

$$\begin{aligned} S1 = & \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i)}} + \frac{1}{Rppp^{(i)}} \right) \\ & + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) + \frac{1}{Rp q^{(2)}} \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$S2 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rs} + \frac{1}{Rsjp^{(i)}} + \frac{1}{Rspp^{(i)}} + \frac{1}{Rjs} + \frac{1}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rspp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rs q^{(2)}} \quad (3.75)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcp g} + \frac{1}{Rcps} \quad (3.59)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea} \quad (3.61)$$

As equações de 3.71 a 3.73 e de 3.50 a 3.52 podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rps} & \frac{1}{Rp} & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rps} & -S2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & 0 & -S3 & \frac{1}{Rcppe} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rcppe} & -S4 & \frac{1}{Rpe} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rpe} & -S5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Js^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epe^{(i)} \\ Jpe^{(i)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ A2 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \\ -\frac{Ea}{Rcpea} \\ -\frac{Ea}{Rpea} \end{vmatrix} \quad (3.76)$$

Sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^i}{Rjp} - \left(\frac{Js^{i+1}}{Rpsp^{(i)}} + \frac{Jp^{i+1}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{i+1}}{Rpjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Js^{i-1}}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rppp^{(i-1)}} \right) + \frac{Jq}{Rpq^{(2)}} \quad (3.77)$$

$$A2 = -\frac{Es^i}{Rs} - \frac{Ej^i}{Rjs} - \left(\frac{Ej^{i+1}}{Rsjp^{(i)}} + \frac{Jp^{i+1}}{Rspp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rspp^{(i-1)}} \right) + \frac{Jq}{Rs q^{(2)}} \quad (3.78)$$

• Para as zonas intermediárias:

a. Potencial $Jp(i)$:

$$Jp^{(i)} = \frac{\left[\left(\frac{Js^{(i)}}{Rps} + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} + \frac{Ej^{(i)}}{Rjp} \right) + \left(\frac{Js^{(i+1)}}{Rpsp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i+1)}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rpjp^{(i)}} \right) + \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Js^{(i-1)}}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \right]}{\left[\left(\frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} \right) + \left(\frac{1}{Rpsp^{(i)}} + \frac{1}{Rppp^{(i)}} + \frac{1}{Rpjp^{(i)}} \right) + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) \right]} \quad (3.79)$$

b. Potencial $Js(i)$:

$$Js^{(i)} = \frac{\left(\frac{Jp^{(i)}}{Rps} + \frac{Es^{(i)}}{Rs} + \frac{Ej^{(i)}}{Rjs} \right) + \left(\frac{Ej^{(i+1)}}{Rsjp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i+1)}}{Rspp^{(i)}} \right) + \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rspp^{(i-1)}} \right)}{\left(\frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rs} + \frac{1}{Rjs} \right) + \left(\frac{1}{Rsjp^{(i)}} + \frac{1}{Rspp^{(i)}} \right) + \left(\frac{1}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rspp^{(i-1)}} \right)} \quad (3.80)$$

c. Potencial $Ep(i)$ (idem à primeira zona):

$$Ep^{(i)} = \frac{\frac{Jp}{Rp} + \frac{Epe}{Rcppe} + \frac{Eg(i)}{Rcp g} + \frac{Es(i)}{Rcps}}{\frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcp g} + \frac{1}{Rcps}} \quad (3.41)$$

d. Potencial $Epe(i)$ (ídem à primeira zona):

$$Epe^{(i)} = \frac{\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Ea}{Rcpea} + \frac{Jpe}{Rpe}}{\frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe}} \quad (3.42)$$

e. Potencial $Jpe(i)$ (ídem à primeira zona):

$$Jpe^{(i)} = \frac{\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} + \frac{Ea}{Rpea}}{\frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea}} \quad (3.43)$$

Rearranjando,obtem-se:

$$\begin{aligned} -Jp^{(i)}.S1 + \frac{Js^{(i)}}{Rps} + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjp} - \left(\frac{Js^{(i+1)}}{Rpsp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i+1)}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rpjp^{(i)}} \right) \\ - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Js^{i-1}}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \end{aligned} \quad (3.81)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rps} - Js^{(i)}.S2 = -\left(\frac{Ej^{(i)}}{Rjs} + \frac{Es^{(i)}}{Rs} \right) - \left(\frac{Jp^{(i+1)}}{Rspp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rsjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rspp^{(i-1)}} \right) \quad (3.82)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp} - Ep^{(i)}.S3 + \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} = -\frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \quad (3.50)$$

$$\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(i)}}{Rpe} - Epe^{(i)}.S4 = -\frac{Ea}{Rcpea} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} - S5.Jpe^{(i)} = -\frac{Ea}{Rpea} \quad (3.52)$$

nas quais:

$$S1 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} + \left(\frac{1}{Rpsp^{(i)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i)}} + \frac{1}{Rppp^{(i)}} \right) + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.83)$$

$$S2 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rs} + \frac{1}{Rjs} + \frac{1}{Rsjp^{(i)}} + \frac{1}{Rspp^{(i)}} + \frac{1}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rsp^{(i-1)}} \quad (3.84)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpge} + \frac{1}{Rcps} \quad (3.59)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea} \quad (3.61)$$

As equações 3.81, 3.82 e de 3.50 a 3.52, podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rps} & \frac{1}{Rp} & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rps} & -S2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & 0 & -S3 & \frac{1}{Rcppe} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rcppe} & -S4 & \frac{1}{Rpe} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rpe} & -S5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Js^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epe^{(i)} \\ Jpe^{(i)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ A2 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \\ -\frac{Ea}{Rcpea} \\ -\frac{Ea}{Rpea} \end{vmatrix} \quad (3.85)$$

sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^i}{Rjp} - \left(\frac{Js^{i+1}}{Rpsp^{(i)}} + \frac{Jp^{i+1}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{i+1}}{Rpjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Js^{i-1}}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.86)$$

$$A2 = -\frac{Es^i}{Rs} - \frac{Ej^i}{Rjs} - \left(\frac{Ej^{i+1}}{Rsjp^{(i)}} + \frac{Jp^{i+1}}{Rspp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rspp^{(i-1)}} \right) \quad (3.87)$$

• Para a última zona:

a. Potencial $Jp(i)$:

$$Jp^{(i)} = \frac{\left(\frac{Js^{(i)}}{Rps} + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} + \frac{Ej^{(i)}}{Rjp} \right) + \frac{Epc}{Rppc} + \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Js^{(i-1)}}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rppp^{(i-1)}} \right)}{\left(\frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} \right) + \frac{1}{Rppc} + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right)} \quad (3.88)$$

b. Potencial $Js(i)$:

$$J_s^{(i)} = \frac{\left(\frac{J_p^{(i)}}{R_{ps}} + \frac{E_s^{(i)}}{R_s} + \frac{E_j^{(i)}}{R_{js}} \right) + \frac{E_{pc}}{R_{spc}} + \left(\frac{E_j^{(i-1)}}{R_{sjp}^{(i-1)}} + \frac{J_p^{(i-1)}}{R_{spp}^{(i-1)}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{ps}} + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{js}} \right) + \frac{1}{R_{spc}} + \left(\frac{1}{R_{sjp}^{(i-1)}} + \frac{1}{R_{spp}^{(i-1)}} \right)} \quad (3.89)$$

c. Potencial $E_p(i)$ (idem à primeira zona) :

$$E_p^{(i)} = \frac{\frac{J_p}{R_p} + \frac{E_{pe}}{R_{cppe}} + \frac{E_g(i)}{R_{cpg}} + \frac{E_s(i)}{R_{cps}}}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cppe}} + \frac{1}{R_{cpg}} + \frac{1}{R_{cps}}} \quad (3.41)$$

d. Potencial $E_{pe}(i)$ (idem à primeira zona) :

$$E_{pe}^{(i)} = \frac{\frac{E_p^{(i)}}{R_{cppe}} + \frac{E_a}{R_{cpea}} + \frac{J_{pe}}{R_{pe}}}{\frac{1}{R_{cppe}} + \frac{1}{R_{cpea}} + \frac{1}{R_{pe}}} \quad (3.42)$$

e. Potencial $J_{pe}(i)$ (idem à primeira zona) :

$$J_{pe}^{(i)} = \frac{\frac{E_{pe}^{(i)}}{R_{pe}} + \frac{E_a}{R_{pea}}}{\frac{1}{R_{pe}} + \frac{1}{R_{pea}}} \quad (3.43)$$

f. Potencial E_{pc} :

$$E_{pc} = \frac{\frac{J_p^{(i)}}{R_{ppc}} + \frac{J_s^{(i)}}{R_{spc}} + \frac{E_j^{(i)}}{R_{jpc}}}{\frac{1}{R_{ppc}} + \frac{1}{R_{spc}} + \frac{1}{R_{jpc}}} \quad (3.90)$$

Rearranjando,obtem-se:

$$-J_p^{(i)} \cdot S1 + \frac{J_s^{(i)}}{R_{ps}} + \frac{E_p^{(i)}}{R_p} + \frac{E_{pc}}{R_{ppc}} = -\frac{E_j^{(i)}}{R_{jp}} - \left(\frac{E_j^{(i-1)}}{R_{pj}^{(i-1)}} + \frac{J_s^{(i-1)}}{R_{psp}^{(i-1)}} + \frac{J_p^{(i-1)}}{R_{ppp}^{(i-1)}} \right) \quad (3.91)$$

$$\frac{J_p^{(i)}}{R_{ps}} - J_s^{(i)} \cdot S2 = -\frac{E_s^{(i)}}{R_s} - \frac{E_j^{(i)}}{R_{js}} - \frac{E_{pc}}{R_{spc}} - \left(\frac{E_j^{(i-1)}}{R_{sjp}^{(i-1)}} + \frac{J_p^{(i-1)}}{R_{spp}^{(i-1)}} \right) \quad (3.92)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp} - Ep^{(i)} \cdot S3 + \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} = -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \quad (3.50)$$

$$\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(i)}}{Rpe} - Epe^{(i)} \cdot S4 = -\frac{Ea}{Rcpea} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} - S5 \cdot Jpe^{(i)} = -\frac{Ea}{Rpea} \quad (3.52)$$

$$\frac{Js^{(i)}}{Rspc} + \frac{Jp^{(i)}}{Rppc} - S10 \cdot Epc = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjpc} \quad (3.93)$$

nas quais;

$$S1 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} + \frac{1}{Rppc} + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rpsp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.94)$$

$$S2 = \frac{1}{Rps} + \frac{1}{Rs} + \frac{1}{Rjs} + \frac{1}{Rsjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rsp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rspc} \quad (3.95)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpge} + \frac{1}{Rcps} \quad (3.59)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea} \quad (3.61)$$

$$S10 = \frac{1}{Rppc} + \frac{1}{Rspc} + \frac{1}{Rjpc} \quad (3.96)$$

O conjunto de equações de 3.91 a 3.93 e de 3.50 a 3.52 podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$qj^{(2)} = \frac{Js^{(2)} - Ej^{(2)}}{Rjs} + \frac{Jp^{(2)} - Ej^{(2)}}{Rjp} + \frac{Jq - Ej^{(2)}}{Rjq^{(2)}} + \frac{Jp^{(3)} - Ej^{(2)}}{Rjpp^{(2)}} + \frac{Js^{(3)} - Ej^{(2)}}{Rjsp^{(2)}} + \frac{Jp^{(1)} - Ej^{(2)}}{Rjpp^{(1)}} + \frac{Js^{(1)} - Ej^{(2)}}{Rjsp^{(1)}} \quad (3.102)$$

para zonas intermediárias:

$$qj^{(i)} = \frac{Js^{(i)} - Ej^{(i)}}{Rjs} + \frac{Jp^{(i)} - Ej^{(i)}}{Rjp} + \frac{Jp^{(i+1)} - Ej^{(i)}}{Rjpp^{(i)}} + \frac{Js^{(i+1)} - Ej^{(i)}}{Rjsp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i-1)} - Ej^{(i)}}{Rjpp^{(i-1)}} + \frac{Js^{(i-1)} - Ej^{(i)}}{Rjsp^{(i-1)}} \quad (3.103)$$

para a última zona:

$$qj^i = \frac{Js^i - Ej^i}{Rjs} + \frac{Jp^i - Ej^i}{Rjp} + \frac{Epc - Ej^i}{Rjpc} + \frac{Jp^{i-1} - Ej^i}{Rjpp} + \frac{Js^{i-1} - Ej^i}{Rjsp} \quad (3.104)$$

c) Calor total trocado pelo gás:

$$qg^i = \frac{Ep^i - Eg^i}{Rcp} + \frac{Es^i - Eg^i}{Rcsg} \quad (3.105)$$

3.4 Modelagem matemática e procedimento de cálculo para os processos de transferência de calor considerando a ausência de resíduos sólidos

3.4.1 Introdução:

Nos casos em que não é alimentado sólido no incinerador, ou a vazão mássica de sólido no mesmo é inferior a 2% da vazão mássica global, ou ainda, quando pretende-se aplicar este procedimento de cálculo à câmara de combustão secundária, utiliza-se os sistemas de equações abaixo aplicadas a cada zona.

O limite de 2% estabelecido acima foi obtido mediante testes de robustez com o simulador, para condições típicas industriais, cujo valor pode ser alterado de acordo com cada caso especificamente. Para vazões mássicas de resíduo sólido muito baixas, a sua temperatura calculada em iterações intermediárias pode elevar-se a níveis que torna o simulador vulnerável à erros numéricos de domínio ou do tipo “overflow”. Os potenciais e as resistências referentes ao resíduo sólido são, neste caso, excluídos do circuito elétrico análogo equivalente, e a quantidade de calor trocada pelo sólido é estimada como uma fração daquela trocada pela parede, como pode ser visto com mais detalhes, mais adiante, em item específico deste capítulo

A diferença básica entre o conjunto de equações destinado ao cálculo dos potenciais na ausência de sólidos, apresentado a seguir, e o apresentado no item 3.3., referente ao cálculo dos potenciais na presença de sólido, é a exclusão dos termos e equações relacionados com o sólido. O desenvolvimento matemático é análogo, e por isso, apresentar-se-á a seguir, apenas os sistemas de equações resultantes e as matrizes correspondentes.

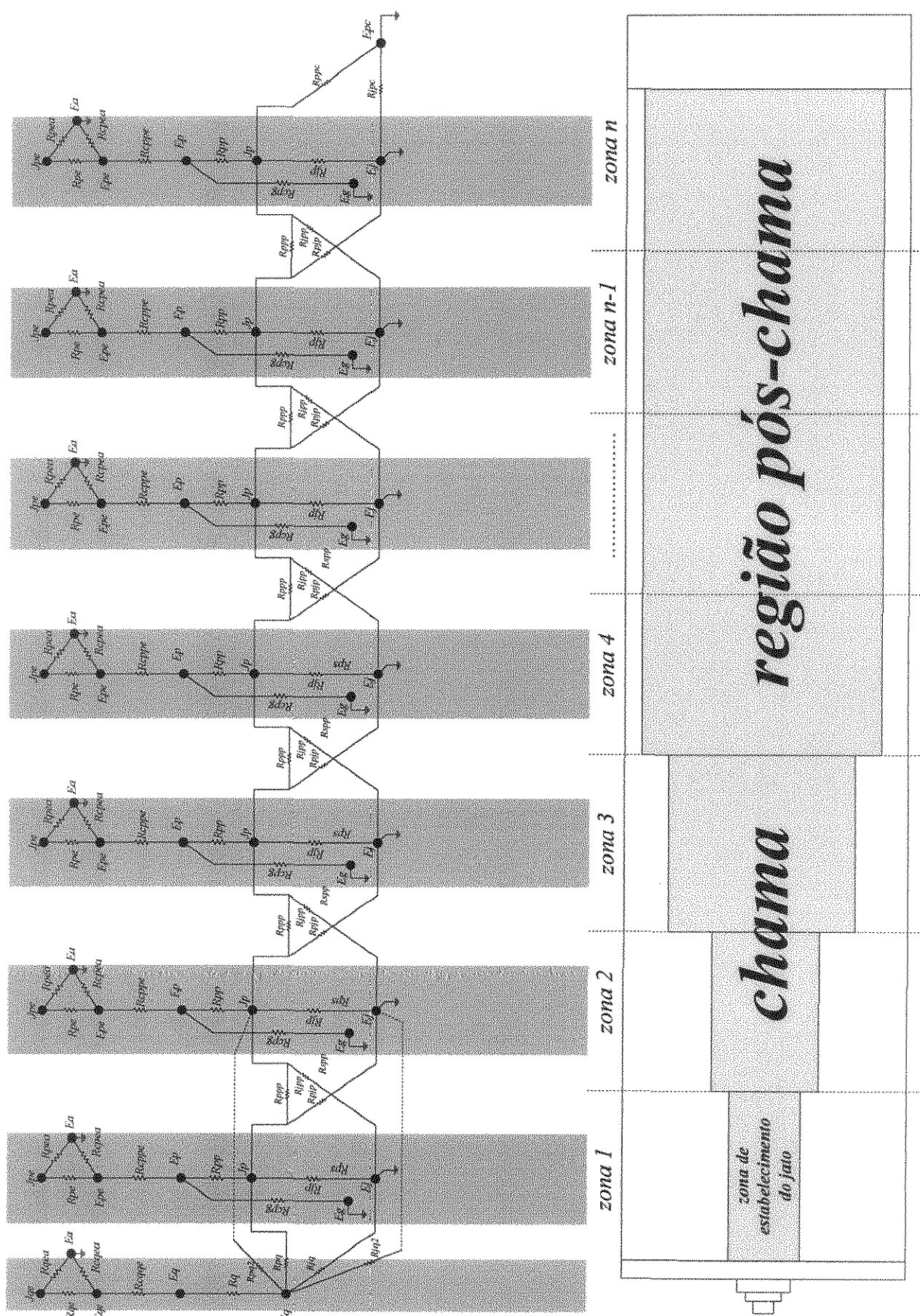


Figura 3.8: Circuito elétrico resistivo que representa os processos de transferência de calor na câmara primária, sem alimentação de sólido ou com vazão mássica muito baixa.

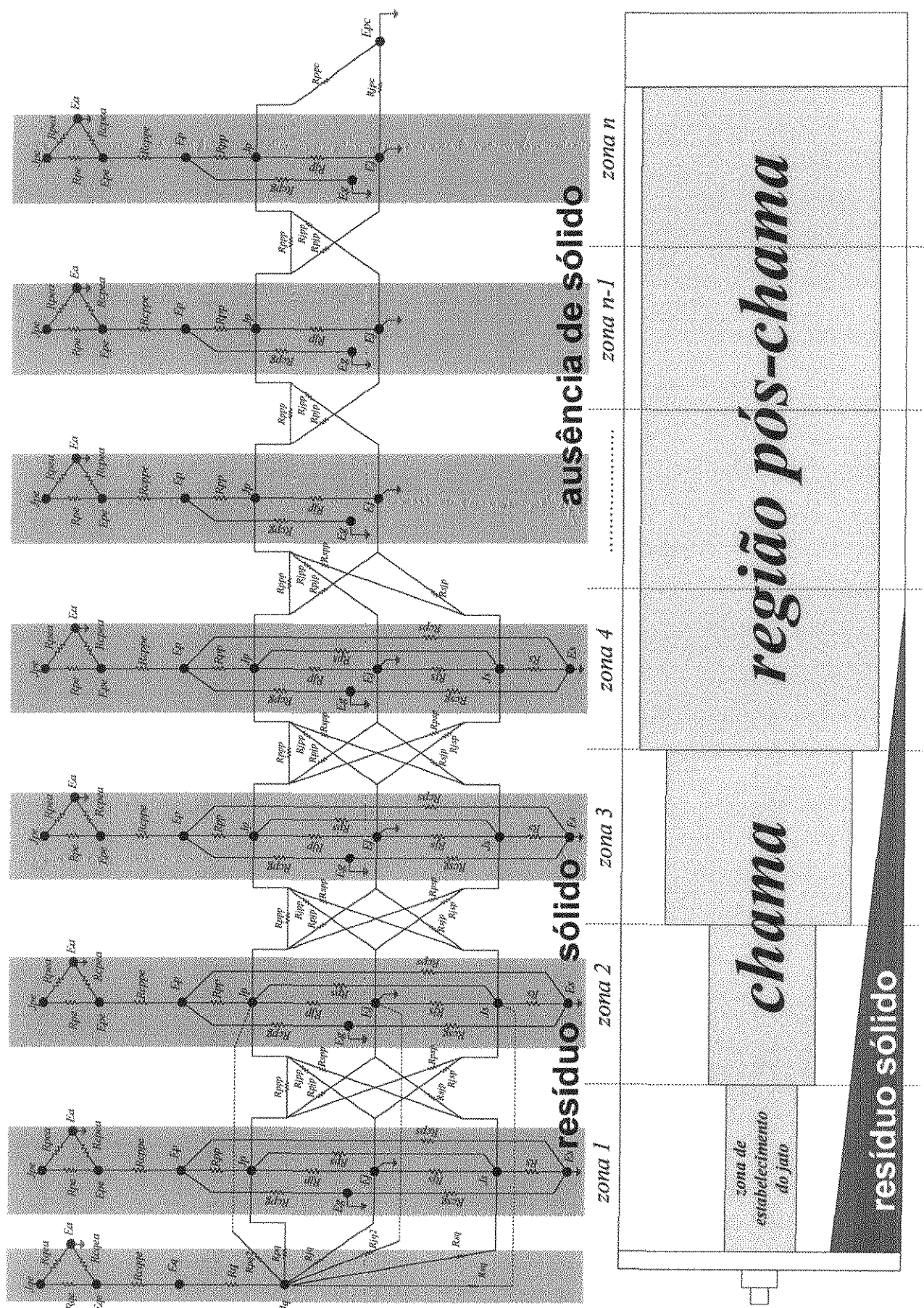


Figura 3.9: Circuito elétrico resistivo que representa os processos de transferência de calor na câmara primária, com vazões mássicas de sólido muito baixas ou nulas a partir de uma determinada posição axial.

O circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor radiativas, condutivas e convectivas na câmara de combustão fica parcialmente alterado, na ausência de sólido, em relação àquele que representa o processo com a presença do mesmo (figura 3.7). Isto pode ser verificado mediante a observação e análise da figura 3.8, que contém a representação esquemática do circuito elétrico análogo equivalente para o caso em que desconsidera-se a presença do sólido.

Na figura 3.9 está esquematicamente representada uma condição operacional provável para resíduos sólidos com baixo teor de cinzas, em que a vazão mássica na alimentação é significativa e ao longo do forno reduz-se a valores muito baixos. Para a primeira parte da câmara primária considera-se a presença do sólido e para a segunda o mesmo é desconsiderado devido à sua baixa vazão. O circuito elétrico análogo equivalente neste caso é híbrido, com as primeiras zonas idênticas às correspondentes representadas na figura 3.7 e as demais idênticas às correspondentes representadas na figura 3.8.

3.4.2 Cálculo dos potenciais do circuito análogo na ausência de sólidos:

A seguir, são apresentados os procedimentos de cálculos dos potenciais radiativos e das taxas de trocas de calor para o caso onde desconsidera-se a presença de sólido, de forma análoga ao desenvolvido para o caso onde considera-se a presença do mesmo, com a exclusão dos termos e equações referentes ao resíduo sólido.

• Para a primeira zona:

$$-Jp^{(1)} \cdot S1 + \frac{Ep^{(1)}}{Rp} + \frac{Jq}{Rpq} = -\frac{Ej^{(1)}}{Rjp} - \frac{Jp^{(2)}}{Rppp^{(1)}} - \frac{Ej^{(2)}}{Rjpp^{(1)}} \quad (3.106)$$

$$\frac{Jp^{(1)}}{Rp} - Ep^{(1)} \cdot S3 + \frac{Epe^{(1)}}{Rcppe} = -\frac{Eg^{(1)}}{Rcpg} \quad (3.107)$$

$$\frac{Ep^{(1)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(1)}}{Rpe} - Epe^{(1)} \cdot S4 = -\frac{Ea}{Rcpea} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(1)}}{Rpe} - S5 \cdot Jpe^{(1)} = -\frac{Ea}{Rpea} \quad (3.52)$$

$$\frac{Jp^{(1)}}{Rpq^{(1)}} - S6 \cdot Jq + \frac{Eq}{Rq} = \frac{Ej^{(1)}}{Rjq^{(1)}} + \frac{Jp^{(2)}}{Rpq^{(2)}} + \frac{Ej^{(2)}}{Rjq^{(2)}} \quad (3.108)$$

$$\frac{Jq}{Rq} - S7 \cdot Eq + \frac{Eqe}{Rcqqe} = 0 \quad (3.109)$$

$$\frac{Jqe}{Rqe} - S8 \cdot Eqe + \frac{Eq}{Rcqqe} = -\frac{Ea}{Rqea} \quad (3.110)$$

$$\frac{Eqe}{Rqe} - S9 \cdot Jqe = -\frac{Ea}{Rqea} \quad (3.111)$$

nas quais:

$$S1 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{jp}} + \left(\frac{1}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{ppp}^{(1)}} + \frac{1}{R_{pjp}^{(1)}} \right) \quad (3.112)$$

$$S3 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cppe}} + \frac{1}{R_{cpg}} \quad (3.113)$$

$$S4 = \frac{1}{R_{cppe}} + \frac{1}{R_{cpea}} + \frac{1}{R_{pe}} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{R_{pe}} + \frac{1}{R_{pea}} \quad (3.61)$$

$$S6 = \frac{1}{R_q} + \frac{1}{R_{pq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{jq}^{(1)}} + \frac{1}{R_{pq}^{(2)}} + \frac{1}{R_{jq}^{(2)}} \quad (3.114)$$

$$S7 = \frac{1}{R_q} + \frac{1}{R_{cqqe}} \quad (3.115)$$

$$S8 = \frac{1}{R_{cqqe}} + \frac{1}{R_{qe}} + \frac{1}{R_{qea}} \quad (3.116)$$

$$S9 = \frac{1}{R_{qe}} + \frac{1}{R_{qea}} \quad (3.117)$$

As equações 3.106 a 3.111, 3.51 e 3.52 podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$\begin{bmatrix} -S1 & \frac{1}{R_p} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{pq}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_p} & -S3 & \frac{1}{R_{cppe}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{cppe}} & -S4 & \frac{1}{R_{pe}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{pe}} & -S5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_{pq}} & 0 & 0 & 0 & -S6 & \frac{1}{R_q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_q} & -S7 & \frac{1}{R_{cqqe}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{cqqe}} & -S8 & \frac{1}{R_{qe}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{qe}} & -S9 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epe^{(i)} \\ Jpe^{(i)} \\ Jq \\ Eq \\ Eqe \\ Jqe \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A1 \\ \frac{Eg^{(i)}}{R_{cpg}} - \frac{Es^{(i)}}{R_{cps}} \\ -\frac{Ea}{R_{cpea}} \\ -\frac{Ea}{R_{pea}} \\ -\frac{Ej^{(i)}}{R_{jq}^{(1)}} \\ 0 \\ -\frac{Ea}{R_{qea}} \\ -\frac{Ea}{R_{qea}} \end{bmatrix} \quad (3.118)$$

sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^1}{Rjp} - \left(\frac{Jp^{(2)}}{Rppp^{(1)}} + \frac{Ej^{(2)}}{Rpjp^{(1)}} \right) \quad (3.119)$$

• Para a segunda zona:

$$-Jp^{(i)} \cdot S1 + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjp} - \left(\frac{Jp^{(i+1)}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rpjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rppp^{(i-1)}} \right) + \frac{Jq}{Rpq^{(2)}} \quad (3.120)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp} - Ep^{(i)} \cdot S3 + \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} = -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} \quad (3.121)$$

$$\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(i)}}{Rpe} - Epe^{(i)} \cdot S4 = -\frac{Ea}{Rcepa} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} - S5 \cdot Jpe^{(i)} = -\frac{Ea}{Rcepa} \quad (3.52)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rpq^{(2)}} - S6 \cdot Jq + \frac{Eq}{Rq} = \frac{Ej^{(i)}}{Rjq^{(2)}} \quad (3.122)$$

nas quais:

$$S1 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i)}} + \frac{1}{Rppp^{(i)}} \right) + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) + \frac{1}{Rpq^{(2)}} \quad (3.123)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpge} \quad (3.124)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcepa} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rcepa} \quad (3.61)$$

As equações 3.120 a 3.122, 3.51 e 3.52 podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rp} & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & -S3 & \frac{1}{Rcppe} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Rcppe} & -S4 & \frac{1}{Rpe} \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rpe} & -S5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epe^{(i)} \\ Jpe^{(i)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ \frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \\ -\frac{Ea}{Rcpea} \\ -\frac{Ea}{Rpea} \end{vmatrix} \quad (3.125)$$

sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^i}{Rjp} - \left(\frac{Jp^{i+1}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{i+1}}{Rpjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rppp^{(i-1)}} \right) + \frac{Jq}{Rpq^{(2)}} \quad (3.126)$$

• Para zonas intermediárias:

$$-Jp^{(i)} \cdot S1 + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjp} - \left(\frac{Jp^{(i+1)}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{(i+1)}}{Rpjp^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.127)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp} - Ep^{(i)} \cdot S3 + \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} = -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} \quad (3.128)$$

$$\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(i)}}{Rpe} - Epe^{(i)} \cdot S4 = -\frac{Ea}{Rcpea} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} - S5 \cdot Jpe^{(i)} = -\frac{Ea}{Rpea} \quad (3.52)$$

nas quais;

$$S1 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjp} + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i)}} \frac{1}{Rppp^{(i)}} \right) + \left(\frac{1}{Rpjp^{(i-1)}} \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.129)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpge} \quad (3.130)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea} \quad (3.61)$$

As equações 3.127, 3.128, 3.51 e 3.52 podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$\begin{bmatrix} -S1 & \frac{1}{Rp} & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & -S3 & \frac{1}{Rcppe} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Rcppe} & -S4 & \frac{1}{Rpe} \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rpe} & -S5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epe^{(i)} \\ Jpe^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A1 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \\ -\frac{Ea}{Rcpea} \\ -\frac{Ea}{Rpea} \end{bmatrix} \quad (3.131)$$

sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^i}{Rjpe} - \left(\frac{Jp^{i+1}}{Rppp^{(i)}} + \frac{Ej^{i+1}}{Rpjpe^{(i)}} \right) - \left(\frac{Ej^{i-1}}{Rpjpe^{(i-1)}} + \frac{Jp^{i-1}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.132)$$

• Para a última zona:

$$-Jp^{(i)} \cdot S1 + \frac{Ep^{(i)}}{Rp} + \frac{Epc}{Rppc} = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjpe} - \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rpjpe^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.133)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rp} - Ep^{(i)} \cdot S3 + \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} = -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpge} \quad (3.134)$$

$$\frac{Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Jpe^{(i)}}{Rpe} - Epe^{(i)} \cdot S4 = -\frac{Ea}{Rcpea} \quad (3.51)$$

$$\frac{Epe^{(i)}}{Rpe} - S5 \cdot Jpe^{(i)} = -\frac{Ea}{Rpea} \quad (3.52)$$

$$\frac{Jp^{(i)}}{Rppc} - S10 \cdot Epc = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjpc} \quad (3.135)$$

nas quais;

$$S1 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rjpe} + \frac{1}{Rppc} + \left(\frac{1}{Rpjpe^{(i-1)}} + \frac{1}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.136)$$

$$S3 = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpge} \quad (3.137)$$

$$S4 = \frac{1}{Rcppe} + \frac{1}{Rcpea} + \frac{1}{Rpe} \quad (3.60)$$

$$S5 = \frac{1}{Rpe} + \frac{1}{Rpea} \quad (3.61)$$

$$S10 = \frac{1}{Rppc} + \frac{1}{Rjpc} \quad (3.138)$$

O conjunto de equações acima podem ser escritas na forma matricial, como segue:

$$\begin{bmatrix} -S1 & \frac{1}{Rp} & 0 & 0 & \frac{1}{Rppc} \\ \frac{1}{Rp} & -S3 & \frac{1}{Rcppe} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Rcppe} & -S4 & \frac{1}{Rpe} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rpe} & -S5 & 0 \\ \frac{1}{Rppc} & 0 & 0 & 0 & -S10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epe^{(i)} \\ Jpe^{(i)} \\ Epc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A1 \\ \frac{Eg^{(i)}}{Rcpg} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} \\ -\frac{Ea}{Rcpea} \\ -\frac{Ea}{Rpea} \\ -\frac{Ej^{(i)}}{Rjpc} \end{bmatrix} \quad (3.139)$$

sendo:

$$A1 = -\frac{Ej^{(i)}}{Rjp} - \left(\frac{Ej^{(i-1)}}{Rpjp^{(i-1)}} + \frac{Jp^{(i-1)}}{Rppp^{(i-1)}} \right) \quad (3.140)$$

3.4.3 Cálculos das taxas de trocas de calor na ausência de sólidos:

Analogamente ao apresentado no item 3.3.4, com a exclusão dos termos relativos ao sólido, as taxas de trocas de calor podem ser calculadas por:

a) Calor total trocado pelo jato:

para a primeira zona:

$$qj^{(1)} = \frac{Jp^{(1)} - Ej^{(1)}}{Rjp} + \frac{Jq - Ej^{(1)}}{Rjq^{(1)}} + \frac{Jp^{(2)} - Ej^{(1)}}{Rjpp^{(1)}} \quad (3.141)$$

para a segunda zona:

$$qj^{(2)} = \frac{Jp^{(2)} - Ej^{(2)}}{Rjp} + \frac{Jq - Ej^{(2)}}{Rjq^{(2)}} + \frac{Jp^{(3)} - Ej^{(2)}}{Rjpp^{(2)}} + \frac{Jp^{(1)} - Ej^{(2)}}{Rjpp^{(1)}} \quad (3.142)$$

para zonas intermediárias:

$$qj^{(i)} = \frac{Jp^{(i)} - Ej^{(i)}}{Rjp} + \frac{Jp^{(i+1)} - Ej^{(i)}}{Rjpp^{(i)}} + \frac{Jp^{(i-1)} - Ej^{(i)}}{Rjpp^{(i-1)}} \quad (3.143)$$

para a última zona:

$$qj^i = \frac{Jp^i - Ej^i}{Rjp} + \frac{Epc - Ej^i}{Rjpc} + \frac{Jp^{i-1} - Ej^i}{Rjp^-} \quad (3.144)$$

b) Calor total trocado pelo gás:

$$qg^i = \frac{Ep^i - Eg^i}{Rcpg} \quad (3.145)$$

c) Calor total trocado pelo sólido (para baixas vazões mássicas):

Para as situações em que o sólido não é considerado no cálculo dos potenciais no circuito análogo devido à sua baixa vazão mássica, o calor total trocado pelo mesmo pode ser estimado como uma fração do calor total trocado pela parede.

O calor total trocado pela parede pode ser calculado por:

$$qp^{(i)} = \frac{Epe^{(i)} - Ep^{(i)}}{Rcppe} + \frac{Eg^{(i)} - Ep^{(i)}}{Rcpg} + \frac{Jp^{(i)} - Ep^{(i)}}{Rp} \quad (3.146)$$

Esta fração pode ser estimada como a razão entre o volume ocupado pelo sólido na zona i, e a soma deste com o volume da parede da câmara de combustão subtendido no ângulo β , que é o ângulo determinado pela superfície do sólido plana exposta à radiação. Assim sendo, o calor total trocado pelo sólido pode ser estimado por:

$$qs^{(i)} = \frac{Ats}{\frac{\beta}{2}(r_{ext}^2 - r_{in}^2) + Ats} qp^{(i)} \quad (3.147)$$

em que, Ats representa a área da seção transversal do leito de sólido na zona i, cujo procedimento de cálculo pode ser acompanhado pelo apêndice A.

3.5 Modelagem matemática e procedimento de cálculo para os processos de transferência de calor para as câmaras primária e secundária associadas.

A modelagem matemática e o procedimento de cálculo desenvolvidos nos itens 3.3 e 3.4 podem ser empregados de forma direta para a predição dos perfis de temperaturas nas câmaras de combustão primária e secundária associadas. Neste caso, as alterações mais significativas ocorrem nos balanços de massa e energia devido à injeção de combustível auxiliar, resíduo líquido e ar de combustão na câmara secundária.

A figura 3.10 ilustra o circuito elétrico análogo que representa as trocas de calor nas câmaras de combustão primária e secundária associadas por meio de uma câmara de interligação. Conforme pode-se observar nesta figura, as zonas correspondentes à câmara de interligação e à câmara

secundária podem ser representadas, no que diz respeito às trocas de calor, pelo circuito elétrico análogo desenvolvido no item 3.4, no qual desconsidera-se a presença de sólidos.

3.6. Balanços de massa e energia para o sólido na região de chama na câmara primária:

3.6.1 Introdução:

Os componentes voláteis presentes no resíduo transferem-se para a região gasosa anular onde sofrem combustão. Por esse mecanismo, a composição do gás anular alterar-se-á ao longo do forno, reduzindo de forma importante a concentração de oxigênio via diluição devido à incorporação dos voláteis, dos seus produtos de combustão e da água, e via consumo do próprio oxigênio pela reação de combustão.

Se o forno fosse alimentado com resíduos isentos de voláteis e umidade, seria uma boa aproximação admitirmos que a fração de oxigênio que alimenta a chama como ar secundário como igual à do ar atmosférico. Entretanto, no presente trabalho, é conveniente considerar que a presença de umidade e de substância combustíveis no resíduo alteram significativamente a concentração de oxigênio nessa mistura gasosa.

Se um resíduo muito úmido é alimentado no forno, a água evaporada provoca uma diluição no gás anular, fazendo com que menos oxigênio seja admitido na região da chama, acarretando no aumento no teor de água na mistura.

Efeito similar ocorre devido ao consumo do oxigênio devido à oxidação dos voláteis do resíduo e diluição provocada pelo seus produtos de combustão.

A presença de umidade apresenta um outro efeito importante que é a transformação de parte da energia do sistema em calor latente de vaporização da água.

Com base nas hipóteses formuladas para a obtenção do modelo matemático proposto neste trabalho, desenvolver-se-á as equações matemáticas e os procedimentos de cálculos para os balanços de massa e energia no incinerador de forno rotativo, objeto do presente estudo.

Os balanços de massa e energia serão aplicados dentro de cada zona e para cada corrente, ou seja, resíduo sólido, jato central e gás anular, nas regiões de estabelecimento do jato, de chama e de pós-chama. Na região sem chama, as correntes de gás anular e jato central formarão uma única corrente gasosa, para a qual será aplicada o balanço de massa e energia.

Deve-se ressaltar que, neste trabalho, a região delimitada pela seção transversal, onde a partir da qual não há combustível auxiliar a ser consumido, e a última seção transversal, é denominada de *região sem chama*. Nesta região sem chama, poderá haver, não obstante, a queima de compostos orgânicos provenientes do resíduo sólido.

3.6.2 Balanço de massa global para a corrente de sólido:

O resíduo sólido a ser alimentado ao incinerador é composto basicamente de cinzas, umidade e matérias voláteis, combustíveis ou não.

Por conveniência, esta corrente será subdividida em duas, sendo uma a de sólido seco e a outra de água, correspondente à umidade do mesmo.

Os balanços de massa para as correntes de sólido seco e umidade, representados na figura 3.11, podem ser expressos, respectivamente, como:

$$M_{ss}(i) = M_{ss}(i+1) + \Delta M_{ss}(i) \quad (3.148)$$

$$M_{ag}(i) = M_{ag}(i+1) + \Delta M_{ag}(i) \quad (3.149)$$

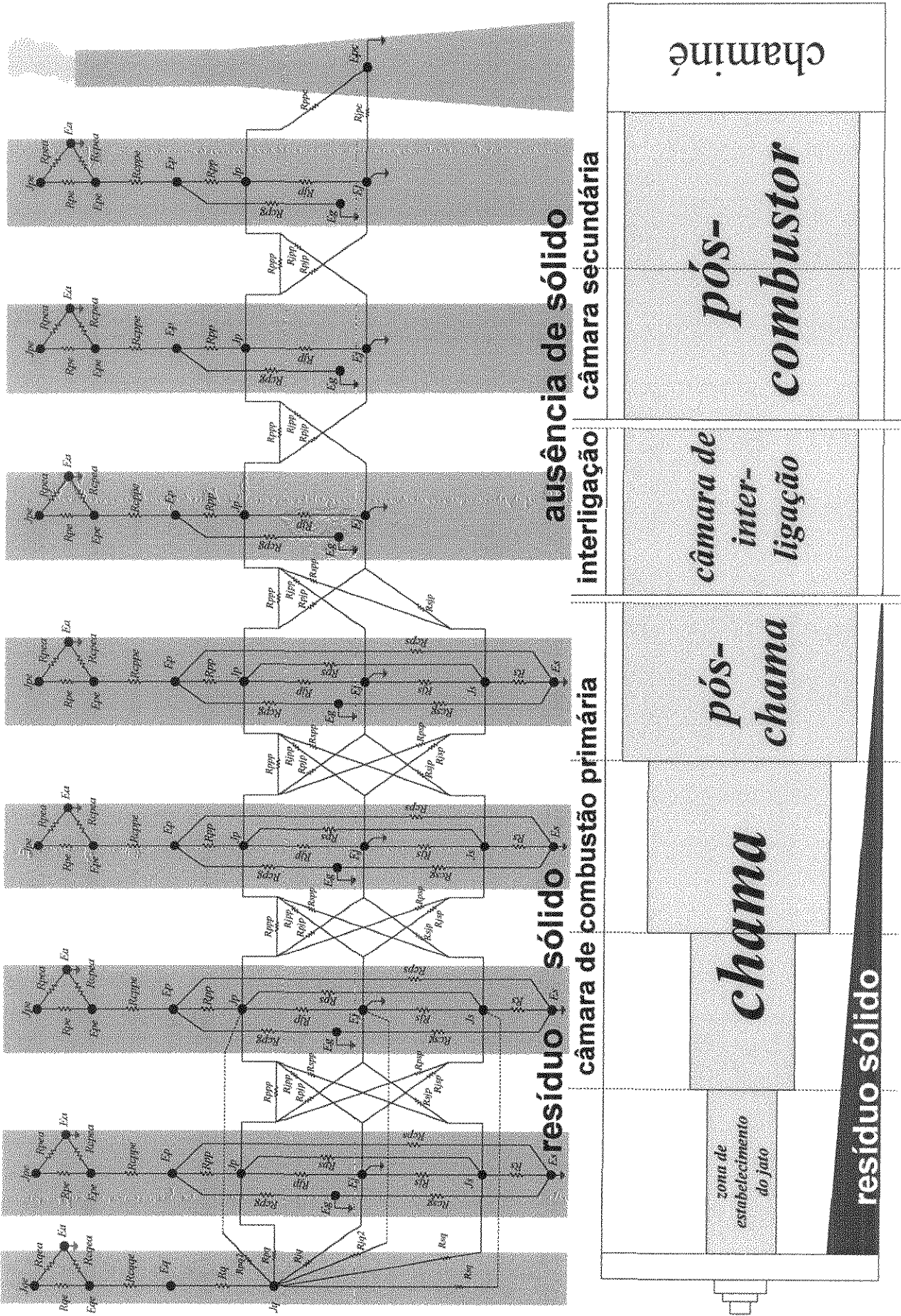


Figura 3.10: Circuito elétrico resistivo que representa os processos de transferência de calor nas câmaras primária, secundária e de interligação.

em que:

- $Mag(i)$ = vazão mássica de água que entra na zona i ;
 $Mag(i+1)$ = vazão mássica de água que sai da zona i ;
 $Mss(i)$ = vazão mássica de sólido seco que entra na zona i ;
 $Mss(i+1)$ = vazão mássica de sólido seco que sai da zona i ;
 $\Delta mag(i)$ = vazão mássica de água evaporada do sólido na zona i ;
 $\Delta mss(i)$ = vazão mássica de voláteis equivalente à redução de massa do sólido na zona i .

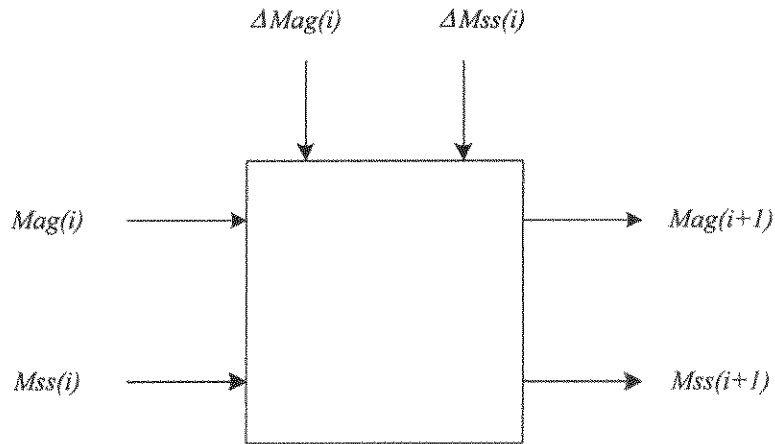


Figura 3.11: Representação esquemática do balanço de massa no sólido úmido na zona i .

3.6.3 Balanço de energia para a corrente de sólido:

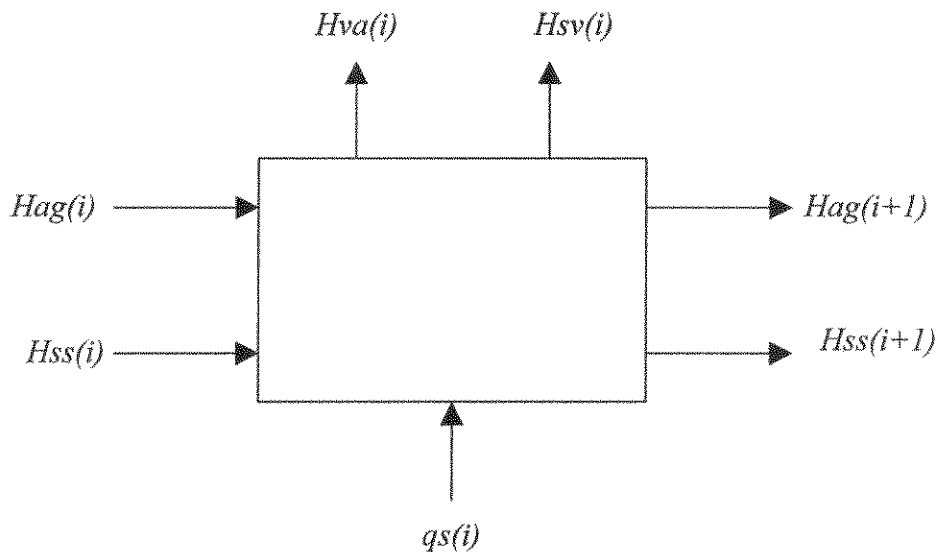


Figura 3.12: Representação esquemática do balanço de energia no sólido na zona i :

Pelas hipóteses do modelo, não há geração de energia no interior do sólido. O sólido sofre um processo de aquecimento e redução de massa como consequência da evaporação da água e dos compostos voláteis. Estes são, por sua vez, oxidados na região gasosa anular.

Uma vez que o sólido com umidade terá uma única temperatura uniforme dentro da zona i , então o balanço de energia engloba as correntes de sólido seco e de umidade, como se pode observar na seguinte equação:

$$H_{ss}(i+1) + H_{ag}(i+1) = H_{ss}(i) + H_{ag}(i) - H_{va}(i) - H_{sv}(i) + q_s(i) \quad (3.150)$$

na qual:

- A entalpia da corrente de sólido que entra na zona i é dada por:

$$H_{ss}(i) = M_{ss}(i) \cdot cp_{ss} \cdot (T_s(i) - T_{ref}) \quad (3.151)$$

sendo que cp_{ss} representa a capacidade calorífica do sólido seco e T_{ref} a temperatura de referência.

- A entalpia da corrente de umidade que entra na zona i junto com o sólido é dada por:

$$H_{ag}(i) = M_{ag}(i) \cdot cpa \cdot (T_s(i) - T_{ref}) \quad (3.152)$$

na qual cpa representa a capacidade calorífica da água.

- A entalpia da corrente de sólido que sai da zona i é dada por:

$$H_{ss}(i+1) = M_{ss}(i+1) \cdot cp_{ss} \cdot (T_s(i+1) - T_{ref}) \quad (3.153)$$

- A entalpia da corrente de umidade que sai da zona i junto com o sólido é dada por:

$$H_{ag}(i+1) = M_{ag}(i+1) \cdot cpa \cdot (T_s(i+1) - T_{ref}) \quad (3.154)$$

- A entalpia da corrente de vapor d'água que deixa o sólido na zona i é dada por:

$$H_{va}(i) = \Delta M_{ag}(i) \cdot (cpa \cdot (373 - T_{ref}) + \Delta H_{va}) \quad (3.155)$$

na qual ΔH_{va} representa a entalpia de vaporização da água.

- A entalpia da corrente de voláteis e produtos de decomposição térmica que saem do sólido na zona i é dada por:

$$H_{sv}(i) = \Delta M_{ss}(i) \cdot (cp_{sv} \cdot (T_{ebsv} - T_{ref}) + \Delta H_{sv}) \quad (3.156)$$

na qual T_{ebsv} representa a temperatura de ebulição das substâncias voláteis.

Rigorosamente, seria esta a forma mais correta de representar a entalpia desta corrente. Entretanto, a composição e as propriedades desta corrente são desconhecidas o que inviabiliza a estimativa da contribuição entálpica da mesma.

A grandeza ΔH_{sv} (entalpia de vaporização dos voláteis presentes no sólido) já está incluída no poder calorífico do resíduo determinado em laboratório. Portanto, o poder calorífico do resíduo é o calor de reação de combustão do resíduo já deduzido todos os calores latentes das substâncias voláteis.

De acordo com as considerações acima, é razoável admitir-se a seguinte equação para o cálculo da entalpia desta corrente:

$$H_{sv}(i) = \Delta M_{ss}(i) \cdot c_{psv} \cdot (T_s(i) - T_{ref}) \quad (3.157)$$

na qual c_{psv} representa a capacidade calorífica dos voláteis oriundo do sólido.

Há dificuldades na estimativa deste parâmetro uma vez que desconhece-se a composição desta corrente.

Substituindo as equações 3.153 e 3.154 no balanço de energia (equação 3.150) obtem-se:

$$T_s(i+1) = \frac{H_{ss}(i) + H_{ag}(i) - H_{va}(i) - H_{sv}(i) + q_s(i)}{M_{ss}(i+1) \cdot c_{pss} + M_{ag}(i+1) \cdot c_{pa}} + T_{ref} \quad (3.158)$$

na qual $q_s(i)$ é obtido por meio da equação 3.100 ou 3.147.

Pelas hipóteses do modelo , a temperatura do sólido permanecerá igual a 100°C enquanto houver água no sólido para evaporar. Assim sendo, ter-se-á três situações diferentes para os balanços de massa e energia, como segue.

CASO A: Energia insuficiente para elevar a temperatura do sólido até 100°C.

Se a energia da corrente de sólido com umidade que entra na zona, acrescida da energia trocada dentro da mesma zona, for menor do que a energia da corrente de sólido com umidade se esta estivesse à 373 K, então, segundo as hipóteses do modelo, não haverá perda de umidade do sólido. Ou seja, definindo a entalpia da corrente de sólido úmido na zona i, na ausência de evaporação de água, como:

$$Q_{su} = q_s(i) + H_{ss}(i) + H_{ag}(i) - H_{sv}(i) \quad (3.159)$$

e a entalpia da corrente de sólido úmido que deixa a zona i se esta estivesse à 373K como:

$$Q_{373} = (M_{ss}(i+1) \cdot c_{pss} + M_{ag}(i+1) \cdot c_{pa})(373 - T_s(i)) \quad (3.160)$$

então, se

$$Q_{su} < Q_{373} ,$$

não haverá perda de umidade pelo sólido, isto é:

$$\Delta M_{ag}(i) = 0 , \text{ e portanto } M_{ag}(i) = M_{ag}(i+1) \quad (3.161)$$

Neste caso, deve-se calcular a temperatura do sólido que deixa a zona i ($T_s(i+1)$), considerando $H_{va}(i) = 0$, e portanto tem-se:

$$Ts(i+1) = \frac{Q_{su}}{Mss(i+1) \cdot cpss + Mag(i+1) \cdot cpa} + T_{ref} \quad (3.162)$$

CASO B: Energia insuficiente para evaporar toda a umidade do sólido:

Se a energia da corrente de sólido com umidade que entra na zona, acrescida da energia trocada dentro da mesma zona, for maior do que a energia da corrente de sólido que deixa a zona com umidade se esta estivesse à 373 K, e se, no entanto, for menor do que esta acrescida da entalpia de vaporização de toda água que entra na zona, então, segundo as hipóteses do modelo, nem toda umidade será transferida do sólido. Ou seja:

$$Q_{373} < Q_{su} < Q_{373} + Mag(i) \left(Cpa(373 - T_{ref}) + \Delta H_{va} \right) \quad (3.163)$$

Portanto, a temperatura da corrente de sólido úmido que deixa a zona i será de 373 K e a taxa de evaporação de água dentro da zona deverá ser calculada como se segue:

Do balanço de energia, tem-se:

$$Hss(i) + Hag(i) - Hsv(i) + qs(i) - Hva(i) = Hag(i+1) + Hss(i+1) \quad (3.164)$$

Uma vez que $Ts(i+1) = 373$ e $Hva(i) = 0$, a equação acima pode ser escrita como:

$$Q_{su} = Q_{373} + \Delta Mag(i) \left(Cpa(373 - T_{ref}) + \Delta H_{va} \right) \quad (3.165)$$

e se, Q_{373} pode ser expandida como:

$$Q_{373} = (Mss(i+1) \cdot cpss + Mag(i) \cdot cpa) (373 - Ts(i)) - \Delta Mag(i) \cdot cpa \cdot (373 - Ts(i)) \quad (3.166)$$

então, o balanço de energia acima pode ser escrito como:

$$Q_{su} = (Mss(i+1)cpss + Mag(i+1)cpa) (373 - T_{ref}) + \Delta Mag(i) \Delta H_{va} \quad (3.167)$$

Neste caso, a quantidade de água evaporada por unidade de tempo, dentro da zona i, pode ser calculada por:

$$\Delta Mag(i) = \frac{Hss(i) + Hag(i) - Hsv(i) + qs(i) - (Mag(i)cpa + Mss(i+1)cpss) (Ts(i+1) - T_{ref})}{\Delta H_{va}} \quad (3.168)$$

ou ainda

$$\Delta Mag(i) = \frac{Q_{su} - (Mag(i)cpa + Mss(i+1)cpss) (Ts(i+1) - T_{ref})}{\Delta H_{va}} \quad (3.169)$$

CASO C: Energia suficiente para evaporar toda água presente no sólido e ainda elevar a sua temperatura acima de 100°C.

Se a energia da corrente de sólido com umidade que entra na zona, acrescida da energia trocada dentro da mesma zona, for maior do que a energia da corrente de sólido que deixa a zona

sem umidade se esta estivesse à 373 K acrescida da entalpia de vaporização de toda água que entra na zona , então, segundo as hipóteses do modelo, toda umidade será transferida do sólido. Ou seja:

$$Q_{su} > Q_{j3} + Mag(i)(Cpa(373 - Tref) + \Delta Hva) \quad (3.170)$$

Portanto, o sólido deixa a zona i seco, isto é:

$$Mag(i + 1) = 0 \quad (3.171)$$

e consequentemente:

$$\Delta Mag(i) = Mag(i) \quad (3.172)$$

Portanto, do balanço de energia pode-se calcular a temperatura $Ts(i+1)$:

$$Ts(i+1) = \frac{Hss(i) + Hag(i) - Hsv(i) + qs(i) - Hva(i)}{Mss(i+1) \cdot cpss} + T_{ref} \quad (3.173)$$

ou ainda:

$$Ts(i+1) = \frac{Q_{su} - Hva(i)}{Mss(i+1) \cdot cpss} + T_{ref} \quad (3.174)$$

3.6.4 Balanço de energia para o sólido a baixas vazões mássicas de sólido:

Para baixas vazões mássicas de sólidos na câmara de combustão primária, tipicamente, abaixo de 2% da vazão mássica global, a temperatura de sólido é calculada da mesma forma, através das equações apresentadas no item anterior. Apenas a grandeza $qs(i)$ é que tem uma forma diferenciada de estimativa para este caso, conforme pode ser visto no item 3.4.3. Para o caso onde há a ausência de sólido, a temperatura do sólido não precisa ser calculada.

3.7 Balanços de massa para o jato central na região de chama na câmara primária

3.7.1 Balanço de massa global para o jato:

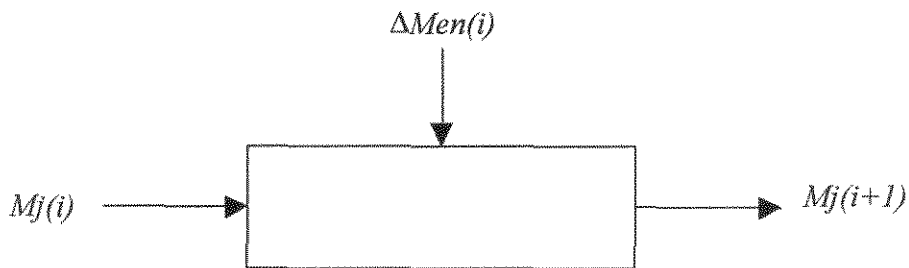


Figura 3.13: Representação esquemática do balanço de massa global para o jato na zona i

O balanço de massa global para o jato, representado na Figura 3.13, pode ser expresso matematicamente por:

$$Mj(i+1) = Mj(i) + \Delta Men(i) \quad (3.175)$$

em que:

$Mj(i)$ = vazão mássica da corrente do jato que entra na zona i;

$Mj(i+1)$ = vazão mássica da corrente do jato que sai da zona i;

$\Delta Men(i)$ = vazão mássica da corrente que entra no jato na zona i proveniente da região anular.

3.7.2 Balanço de energia:

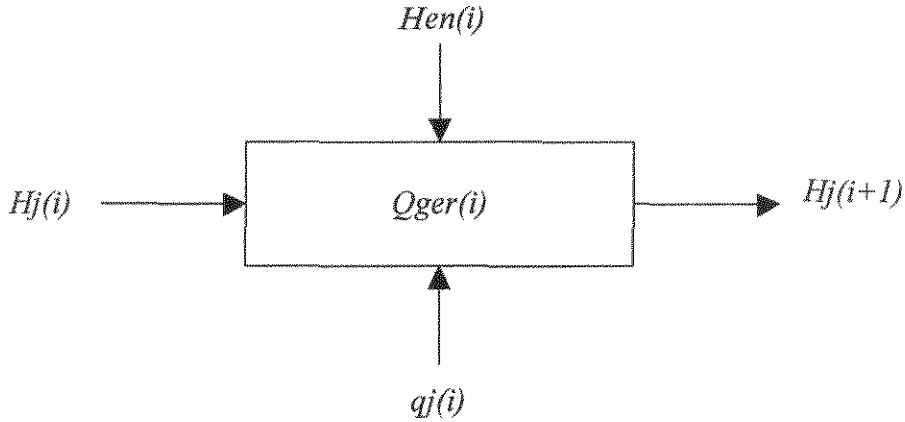


Figura 3.14: Representação esquemática do balanço de energia global para o jato na zona i.

O balanço de energia para a corrente de jato central na zona i, representado na Figura 3.14, pode ser expresso matematicamente por:

$$Hj(i) + Hen(i) + Qger(i) = -qj(i) + Hj(i+1) \quad (3.176)$$

em que:

- A entalpia do jato que entra na zona i é dada por:

$$Hj(i) = Mj(i).cpj.(Tj(i) - T_{ref}) \quad (3.177)$$

na qual cpj representa capacidade calorífica do jato e $Tj(i)$ a temperatura do jato que entra na zona i.

- A entalpia do jato que sai da zona i é dada por:

$$Hj(i+1) = Mj(i+1).cpj.(Tj(i+1) - T_{ref}) \quad (3.178)$$

- A entalpia da corrente de ar secundário que entra na zona i, proveniente da região anular, é dada por:

$$Hen(i) = \Delta Men(i).cpg.(Tj(i+1) - T_{ref}) \quad (3.179)$$

na qual cpg representa a capacidade calorífica do gás

- O calor gerado pela queima do combustível auxiliar é dada por:

$$q_{ger}(i) = \Delta M_{cb}(i) \cdot PC_{cb} \cdot (1 - H_L) \quad (3.180)$$

na qual PC_{cb} representa o poder calorífico do combustível e H_L a fração de perda de hidrogênio:

Substituindo a equação 3.178 no balanço de energia (3.176) e isolando $T_j(i+1)$, obtem-se:

$$T_j(i+1) = \frac{H_j(i) + Hen(i) + Q_{ger}(i) + q_j(i)}{M_j(i+1) \cdot c_{pj}} + T_{ref} \quad (3.181)$$

sendo que o calor líquido trocado pelo jato ($q_j(i)$) é calculado a partir das expressões matemáticas 3.101 a 3.104 e 3.141 a 144.

3.7.3 Balanço de massa por componente no jato central na região da chama:

O jato central, na região da chama, considerado no modelo, é composto basicamente de combustível não queimado e produtos de combustão (CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , HCl , HF , I_2 , etc)

O balanço de massa por componente para o jato na zona i pode ser representado pela figura 3.15. A corrente representada por $M_j(i)$ é desmembrada em duas correntes secundárias, a saber, vazão mássica de produtos de combustão e vazão mássica de combustível auxiliar. Assim pode-se escrever:

$$M_j(i) = M_{pc}(i) + M_{cb}(i) \quad (3.182)$$

em que:

$M_{pc}(i)$ = vazão mássica dos produtos de combustão;

$M_{cb}(i)$ = vazão mássica do combustível auxiliar

Assim, o balanço de massa pode ser escrito como:

$$M_{cb}(i) + M_{pc}(i) + \Delta Men(i) = M_{cb}(i+1) + M_{pc}(i+1) \quad (3.183)$$

Rearranjando, obtem-se:

$$\begin{aligned} M_{pc}(i+1) &= M_{pc}(i) + \Delta Men(i) + M_{cb}(i) - M_{cb}(i+1) = \\ M_{pc}(i+1) &= M_{pc}(i) + \Delta Men(i) + \Delta M_{cb}(i) \end{aligned} \quad (3.184)$$

em que:

$$\Delta M_{cb}(i) = M_{cb}(i) - M_{cb}(i+1) \quad (3.185)$$

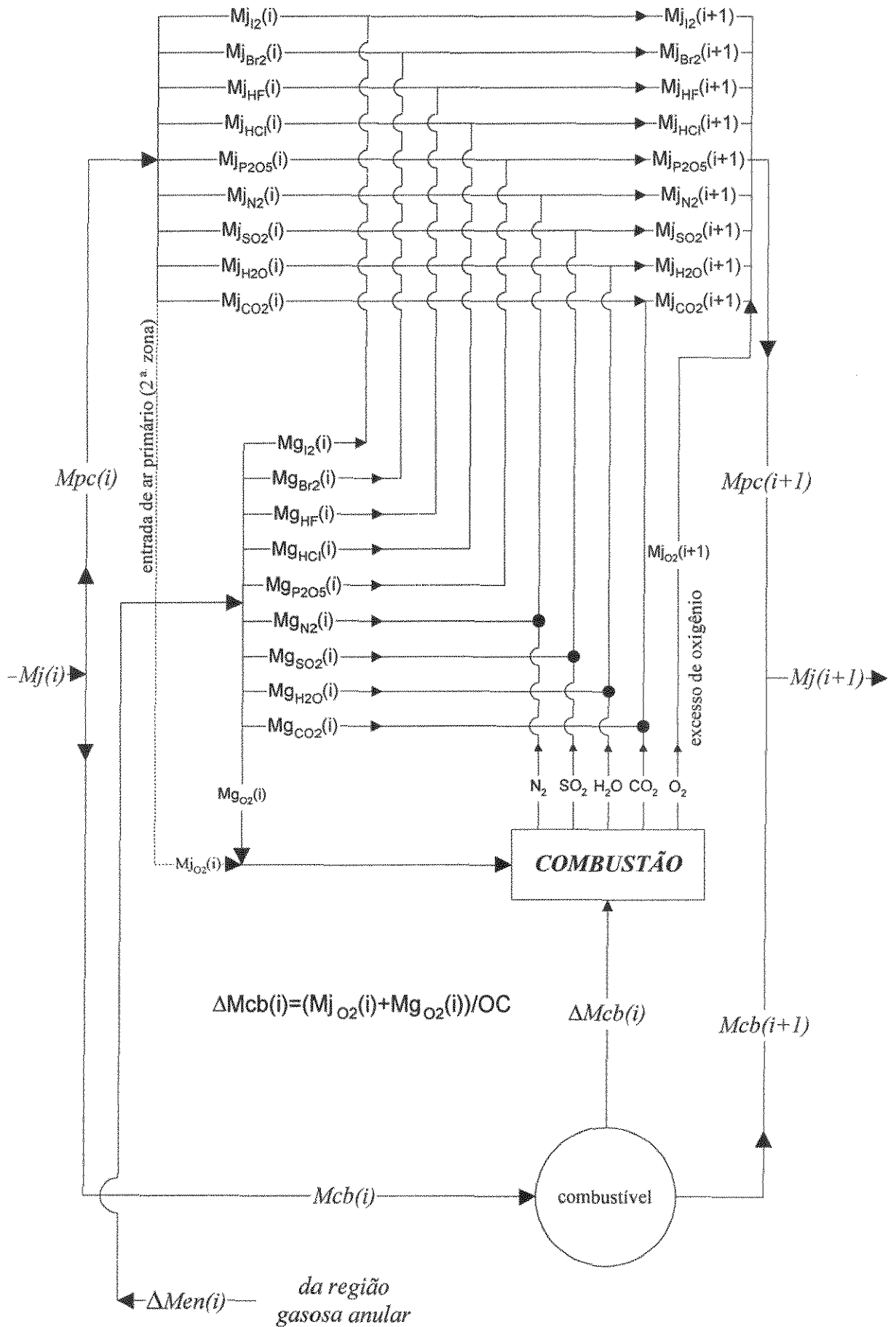


Figura 3.15 : Esquema do balanço de massa por componente no jato na região da chama.

As quantidades de CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , HCl , etc..., acrescidas na zona i devido à contribuição do fluxo proveniente do gás anular e à combustão da massa de combustível ΔM_{cb} são calculadas através do produto desta pelo *fator de geração de produtos de combustão* (apêndice B) e denotado por $FM(j)$, onde j representa o produto de combustão. Desta forma, o balanço de massa para cada componente pode ser expresso na forma da equação 3.186 apresentada a seguir:

$$M_{jc}(i+1, j) = M_{jc}(i, j) + y_g(i, j) \cdot \Delta M_{en}(i) + FM(j) \cdot \Delta M_{cb}(i) \quad (3.186)$$

Em que:

- $y_g(i, j)$ é a fração mássica do componente “ j ” na corrente de gás anular, na zona i ;
- $M_{jc}(i, j)$ é a vazão mássica do componente “ j ” no jato na região da chama, na zona i ;
- j assume valores de 1 a 10, correspondentes aos produtos de combustão CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , P_2O_5 , HCl , HF , Br_2 , I_2 e O_2 , respectivamente.

As duas somatórias a seguir são iguais à unidade :

$$\sum_{j=1}^{10} y_g(i, j) = 1 \quad (3.187)$$

$$\sum_{j=1}^{10} FM(j) = 1 \quad (3.188)$$

3.7.4 Cálculo da taxa de consumo de combustível (Δm_{cb}) :

A quantidade de combustível queimado na zona i é limitada à quantidade de oxigênio disponível na chama, considerando-se combustão completa do combustível. Portanto, a quantidade de combustível queimado é calculado pela razão entre a quantidade de oxigênio disponível e o fator estequiométrico oxigênio/combustível, ou seja:

$$\Delta M_{cb}(i) = \frac{y_{g_{\text{O}_2}}(i) \cdot \Delta M_{en}(i) + M_{j_{\text{O}_2}}(i)}{OC} \quad (3.189)$$

O numerador da equação acima, que representa a quantidade de oxigênio disponível, é a soma da vazão mássica do oxigênio presente no jato com aquela que entra junto com o gás anular no jato.

Na primeira zona, não há combustão nem há entrada de ar secundário por ser a zona de estabelecimento da chama, ou seja:

$$\begin{aligned} \Delta M_{en}(1) &= 0 \\ \Delta M_{cb}(1) &= 0 \end{aligned} \quad (3.190)$$

3.8. Balanços de massa e energia no gás anular na região da chama na câmara primária:

3.8.1 Balanço de massa global para a corrente de gás anular:

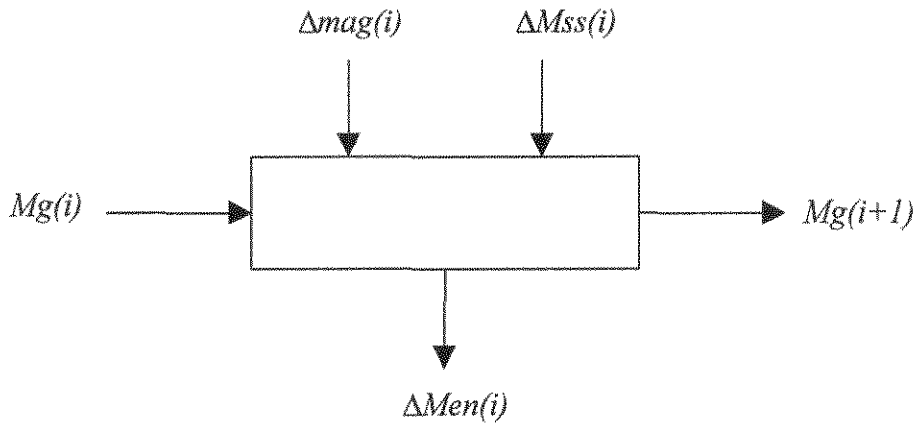


Figura 3.16 : Representação esquemática do balanço de massa na região gasosa anular na zona i:

O balanço de massa para a corrente gasosa anular na zona i, representado na Figura 3.16, pode ser expresso por:

$$Mg(i+1) = Mg(i) + \Delta Mss(i) - \Delta Men(i) - \Delta Mag(i) \quad (3.191)$$

na qual

- $Mg(i)$ = vazão mássica da corrente de gás anular que entra na zona i;
- $Mg(i+1)$ = vazão mássica da corrente de gás anular que sai da zona i e entra na zona i+1;
- $\Delta Mag(i)$ = vazão mássica de umidade que entra na zona i, proveniente do sólido;
- $\Delta Mss(i)$ = vazão mássica de voláteis que entra na zona i, proveniente do sólido;
- $\Delta Men(i)$ = vazão mássica da corrente de gás que sai da região anular e entra no jato, na zona i .

3.8.2 Balanço de massa por componente no gás anular:

O balanço de massa por componente está representado na figura 3.17, e pode ser expresso como:

$$yg(i+1, j) \cdot Mg(i+1) = (Mg(i) - Msv(i) - \Delta Men(i)) \cdot yg(i, j) + FM(j) \cdot \Delta Msvc(i) \quad (3.192)$$

Para o componente água, a equação 3.192, deve ser modificada pela inclusão do termo da água que evapora do leito de sólido e transfere-se para o gás anular, ou seja:

$$yg(i+1, j) \cdot Mg(i+1) = (Mg(i) - Msv(i) - \Delta Men(i)) \cdot yg(i, j) + FM(j) \cdot \Delta Msvc(i) + \Delta Mag(i) \quad (3.193)$$

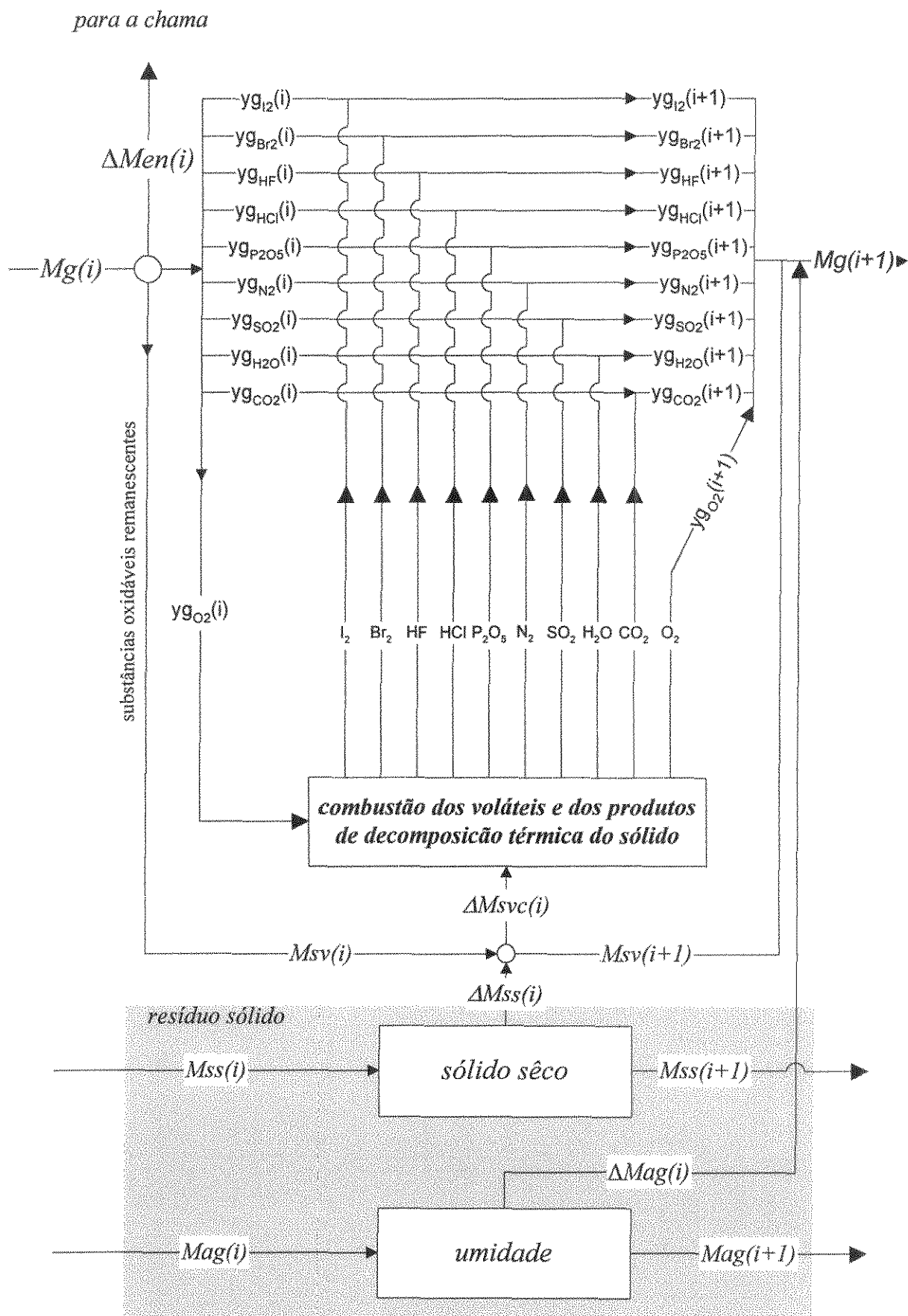


Figura 3.17: Esquema do balanço de massa por componente na região gasosa na zona i .

em que:

$\Delta M_{svc}(i)$ = massa de voláteis e produtos de decomposição térmica, oriundos do sólido, por unidade de tempo, que sofrem combustão em condições estequiométricas de acordo com o oxigênio disponível, calculado através da equação:

$$\Delta M_{svc}(i) = (Mg(i) + M_{sv}(i) - \Delta M_{en}(i)) y_{g(i,10)} / OC \quad (3.194)$$

$M_{sv}(i)$ = massa de voláteis e produtos de decomposição térmica, oriundos do sólido, por unidade de tempo, que não sofreram combustão nas zonas anteriores, (por exemplo, devido à deficiência de oxigênio), e que entram na zona i .

O balanço de massa para esses voláteis e produtos de decomposição térmica oriundos do sólido, pode ser escrito como:

$$M_{sv}(i+1) = M_{sv}(i) + \Delta M_{ss}(i) - \Delta M_{svc}(i) \quad (3.195)$$

Se numa determinada zona, houver oxigênio disponível para oxidar todos os voláteis e produtos de decomposição térmica que entram na zona i , então:

$$\Delta M_{svc}(i) = M_{sv}(i) + \Delta M_{ss}(i) \quad (3.196)$$

e portanto:

$$M_{sv}(i+1) = 0 \quad (3.197)$$

Em condições normais de operação, ou seja, naquelas situações onde há excesso de oxigênio, e que, aliás, é a única que interessa do ponto de vista operacional e ambiental, não haverá voláteis e produtos de decomposição térmica oriundos do sólido em quantidades significativas (ou seja, $M_{sv}(i) = 0$), uma vez que os incineradores operam com excesso de oxigênio em relação ao estequiométrico.

Entretanto, admite-se aqui a possibilidade de haver essa deficiência de oxigênio com o aparecimento dos produtos de combustão incompleta por dois motivos, basicamente. Em primeiro lugar, para determinadas condições operacionais, a deficiência de oxigênio pode ocorrer em determinadas zonas da câmara de combustão, especialmente próximas à chama, desaparecendo em zonas posteriores. Em segundo lugar, para permitir que o simulador continue funcionando de forma adequada, mesmo nas condições indesejadas de deficiência de oxigênio e geração de produtos de combustão incompleta. Ambos os casos, não são condições operacionais típicas e aceitáveis, mas estão incluídas aqui para garantir a robustez do simulador, impedindo, por exemplo, o aparecimento de resultados de cálculos de concentrações de oxigênio menores do que zero, o que poderia levar a erros de execução das tarefas. Adicionalmente, tais situações indesejadas também podem ocorrer nos processos de partida e parada do incinerador, que devem ser evitadas como forma de prevenir eventuais prejuízos ambientais.

3.8.3 Balanço de energia na região gasosa anular:

O balanço de energia para a corrente gasosa anular, representado na Figura 3.18, pode ser expresso matematicamente por:

$$Hg(i+1) = Hg(i) + Hva(i) + Hsv(i) + \Delta Hr(i) - Hen(i) + qg(i) \quad (3.198)$$

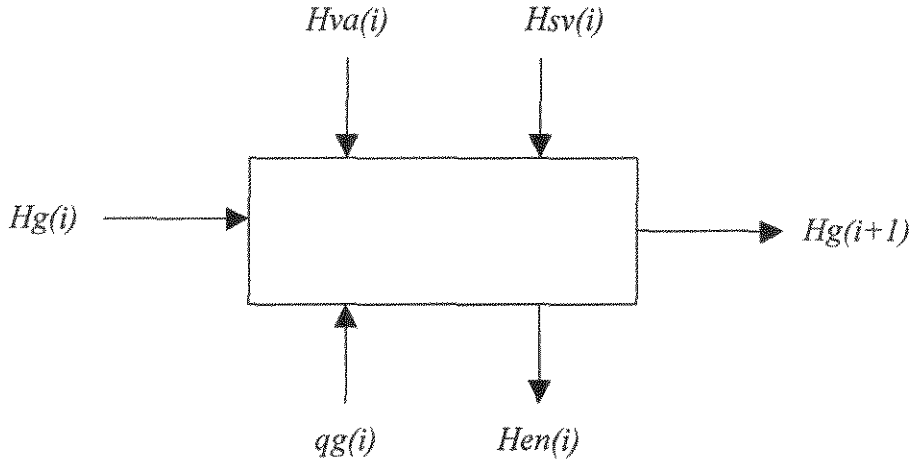


Figura 3.18: Representação esquemática do balanço de energia na região gasosa anular na zona i.

sendo:

- A entalpia do gás que entra na zona i, proveniente da zona anterior, é dada por:

$$Hg(i) = Mg(i).cpg.(Tg(i) - T_{ref}) \quad (3.199)$$

na qual, cpg representa a capacidade calorífica da corrente gasosa anular avaliada na temperatura do gás na zona i $Tg(i)$.

- A entalpia do vapor d'água que entra na zona i, proveniente do sólido, é dada por:

$$Hva(i) = \Delta Mag(i). \left(cpa(373 - T_{ref}) + \Delta Hva \right) \quad (3.200)$$

na qual ΔHva é a entalpia de vaporização da água.

- A entalpia dos produtos de volatilização dos resíduos sólidos que entram na zona i é dada por:

$$Hsv(i) = \Delta Mss(i).cpsv.(Ts(i) - T_{ref}) \quad (3.201)$$

na qual $cpsv$ é a capacidade calorífica dos voláteis provenientes do resíduo sólido.

- A entalpia do gás que sai da zona i é dada por:

$$Hg(i+1) = Mg(i+1).cpg.(Tg(i+1) - T_{ref}) \quad (3.202)$$

- A entalpia do gás que sai da região anular como ar secundário para alimentar a chama é dada por:

$$Hen(i) = \Delta Men(i) \cdot cpg \cdot (Tg(i) - T_{ref}) \quad (3.203)$$

- A entalpia de combustão dos voláteis é dada por:

$$\Delta Hr(i) = \Delta Msvc(i) \cdot PCrs \quad (3.204)$$

em que $\Delta msvc(i)$ é definido pela equação 3.196 e $PCrs$ é o poder calorífico do resíduo sólido.

- O calor total trocado pelo gás é dado por:

$$qg(i) = \frac{Ep(i) - Eg(i)}{Rcpg} + \frac{Es(i) - Eg(i)}{Rcsg} \quad (3.205)$$

Substituindo a equação 3.204 no balanço de energia (3.200), obtém-se:

$$Tg(i+1) = \frac{Hg(i) + Hva(i) + Hsv(i) + \Delta Hr(i) - Hen(i) + qg(i)}{Mg(i+1) \cdot cpg} + T_{ref} \quad (3.206)$$

3.9 Balanços de massa e energia para o gás na região de pós-chama na câmara primária

3.9.1 Introdução:

Para efeito dos balanços de massa e energia e cálculos das propriedades físicas, as duas regiões que aparecem na região da chama e do estabelecimento do jato, ou seja, o jato central e o gás anular, tornam-se uma região gasosa única nas zonas pós-chama, de acordo com o proposto originalmente no modelo.

O procedimento de cálculo para este caso é similar ao desenvolvido para o gás anular para a região da chama, bastando apenas fazer a exclusão dos termos relativos à transferência de massa e energia entre o gás anular e o jato, representadas pelos termos $\Delta Men(i)$ e $Hen(i)$, que deixam de existir matematicamente, devido à unificação das correntes. Evidentemente, haverá uma transição entre os dois procedimentos, que nada mais é do que a unificação das correntes gasosas em termos de massa e energia, como pode ser visto a seguir.

3.9.2 Zona de transição - Cálculo das propriedades da corrente gasosa unificada

- a) Unificação das correntes gasosas em termos de massa:

$$Mg^*(i) = Mg(i) + Mj(i) \quad (3.207)$$

- b) Unificação das correntes gasosas em termos de composição:

$$yg_j^*(i) = \frac{yg_j(i) \cdot Mg(i) + yj_j(i) \cdot Mj(i)}{Mg(i) + Mj(i)} \quad (3.208)$$

em que j representa os diversos componentes.

c) Unificação das correntes gasosas em termos de energia:

$$Hg^*(i) = Hg(i) + Hj(i) \quad (3.209)$$

Nestas equações o superscrito * identifica a propriedade da corrente unificada.

3.9.3 Balanço de massa global para o gás na região pós-chama:

O balanço de massa para a região gasosa na zona i , pode ser representado pela Figura 3.16, excluindo-se a corrente representada pelo termo $\Delta Men(i)$ e pode ser expressa por:

$$Mg^*(i+1) = Mg^*(i) + \Delta Mss(i) - \Delta Mag(i) \quad (3.210)$$

3.9.4 Balanço de massa por componente para o gás na região pós-chama:

O balanço de massa por componente na região gasosa pós-chama, pode ser representado pela figura 3.17, excluindo-se a corrente representada pelo termo $\Delta Men(i)$ e pode ser expresso como:

$$yg(i+1, j) \cdot Mg(i+1) = (Mg(i) - Msv(i)) \cdot yg(i, j) + FM(j) \cdot \Delta Msvc(i) \quad (3.211)$$

Para o componente água, a equação 3.214, deve ser modificada pela inclusão do termo da água que evapora do leito de sólido e se transfere para o gás anular, ou seja:

$$yg(i+1, j) \cdot Mg(i+1) = (Mg(i) - Msv(i)) \cdot yg(i, j) + FM(j) \cdot \Delta Msvc(i) + \Delta Mag(i) \quad (3.212)$$

Todas as considerações e equações relativas aos voláteis e produtos de decomposição térmica oriundos do sólido constantes no item 3.7.2, são integralmente válidas para esta região.

3.9.5 Balanço de energia para o gás na região pós-chama:

O balanço de energia para a corrente gasosa pós-chama, representado na Figura 3.18, excluindo-se o termo $Hen(i)$ pode ser expresso matematicamente por:

$$Hg^*(i+1) = Hg^*(i) + Hva(i) + Hsv(i) + \Delta Hr(i) + qg(i) \quad (3.213)$$

De forma análoga ao procedimento apresentado no item 3.7.3, a temperatura do gás na região gasosa pós-chama pode ser calculada por:

$$Tg(i+1) = \frac{Hg^*(i) + Hva(i) + Hsv(i) + \Delta Hr(i) + qg(i)}{Mg(i+1) \cdot cpg} + T_{ref} \quad (3.214)$$

3.10 Balanços de massa e energia para a câmara de combustão secundária

3.10.1 Introdução:

A modelagem matemática e os procedimentos de cálculos desenvolvidos para a câmara de combustão primária são, neste ítem, adaptados para aplicação à câmara de combustão secundária e à câmara de interligação.

A modificação mais imediata, é a exclusão de todas as equações e termos matemáticos referentes ao resíduo sólido. As outras modificações são devido às injeções das correntes de ar primário e secundários, de combustível auxiliar e do resíduo líquido.

Para que o modelo e o procedimento de cálculos desenvolvidos para a câmara primária possam ser aplicados à câmara secundária, as injeções de ar, combustível e resíduo nesta câmara terão seus efeitos considerados mediante a alteração dos balanços de massa e energia, na zona de injeção.

Neste ítem, i_{inj} identifica a zona de injeção de combustível, ar de combustão e de resíduo líquido.

3.10.2 Balanços de massa e energia para o jato central na zona de injeção

As equações que representam os balanços de massa global e por componentes e o balanço de energia para o jato, na câmara de combustão secundária, são idênticas àquelas desenvolvidas para a câmara de combustão primária, exceto na zona de injeção, onde ocorrem as entradas de combustível auxiliar e de ar de combustão. Ou seja, nas zonas anteriores à zona de injeção e na câmara de interligação, são aplicadas as equações desenvolvidas para a corrente gasosa unificada da câmara primária (ítem 3.8). Estas zonas são como um prolongamento da câmara primária, com alterações apenas nas dimensões das câmaras e nas características do isolamento térmico, cujas influências são adequadamente consideradas sobre as áreas de trocas térmicas, fatores de forma e resistências à transferência de calor, entre outras.

Na zona de injeção propriamente, há, como mencionado anteriormente, a entrada de combustível líquido auxiliar, de ar primário e ar secundário e de resíduo sólido no estado líquido. O resíduo líquido sofre evaporação instantânea na zona de injeção e consequente combustão das substâncias voláteis na região gasosa anular.

Devido à injeção de combustível, há a reformação da chama e o consequente reaparecimento de duas regiões distintas na corrente gasosa: o jato e o gás anular. Estas duas regiões coexistem até que todo combustível auxiliar da câmara secundária seja consumido, a exemplo do que ocorre na câmara primária. Nestas zonas com chama na câmara secundária, as equações de balanço de massa desenvolvidas para as zonas equivalentes da câmara primária são igualmente válidas.

a) Balanço de massa global para a zona de injeção:

A seguir, desenvolve-se o balanço de massa global para o jato na zona de injeção, onde há a reformação do jato, cuja representação esquemática pode ser compreendida pela observação da figura 3.19.

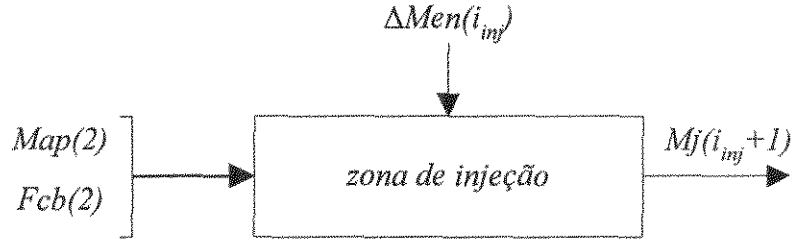


Figura 3.19: Representação esquemática do balanço de massa global para o jato na zona de injeção da câmara secundária.

Em termos matemáticos, a re formação do jato pode ser expresso por:

$$Mj(i_{inj} + 1) = Map(2) + Fcb(2) + \Delta Men(i_{inj}) \quad (3.215)$$

em que:

$Map(2)$ = vazão mássica de alimentação de ar primário na câmara secundária;

$Fcb(2)$ = vazão mássica de alimentação de combustível na câmara secundária;

b) Balanço de massa por componentes para a zona de injeção:

Para a zona de injeção, são aplicáveis as mesmas equações desenvolvidas no item 3.6.3 referentes à câmara de combustão primária, fazendo-se apenas as alterações das vazões mássicas na zona de injeção, provocadas pela entrada de ar primário e de combustível.

Assim sendo, as vazões mássicas dos componentes combustível, oxigênio e nitrogênio, no jato, devem ser corrigidas pelas injeções de ar primário e combustível, da seguinte forma:

- oxigênio ($j=10$):

$$Mjc(i_{inj} + 1, 10) = y_{O_2, ap} \cdot Map(2) + yg(i_{inj}, 10) \cdot \Delta Men(i_{inj}) + FM(10) \cdot \Delta Mcb(i_{inj}) \quad (3.216)$$

- nitrogênio ($j=4$):

$$Mjc(i_{inj} + 1, 4) = y_{N_2, ap} \cdot Map(2) + yg(i_{inj}, 4) \cdot \Delta Men(i_{inj}) + FM(4) \cdot \Delta Mcb(i_{inj}) \quad (3.217)$$

- combustível ($j=11$):

$$Mjc(i_{inj} + 1, 11) = Mcb(i_{inj} + 1) = Fcb(2) - \Delta Mcb(i_{inj}) \quad (3.218)$$

- demais componentes

$$Mjc(i_{inj} + 1, j) = yg(i_{inj}, j) \cdot \Delta Men(i_{inj}) + FM(j) \cdot \Delta Mcb(i_{inj}) \quad (3.219)$$

sendo que, nestas equações, os símbolos $y_{N_2, ap}$ e $y_{O_2, ap}$ representam as frações mássicas de nitrogênio e de oxigênio no ar primário injetado na câmara primária, respectivamente.

c) Balanço de energia:

O balanço de energia global para o jato na zona de injeção pode ser representado esquematicamente pela figura 3.20.

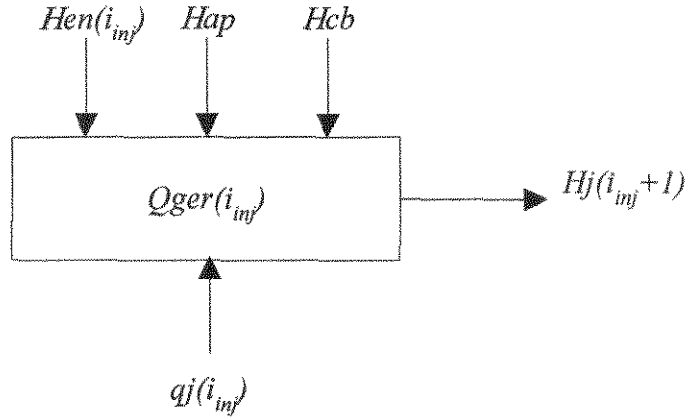


Figura 3.20: Representação esquemática do balanço de energia global para o jato na zona de injeção na câmara secundária.

Esse balanço de energia pode ser expresso matematicamente por:

$$Hen(i_{inj}) + Qger(i_{inj}) + Hap + Hcb = -qj(i_{inj}) + Hj(i_{inj} + 1) \quad (3.220)$$

em que:

- A entalpia da corrente de ar primário que entra na zona de injeção é dada por:

$$Hap = Map(2).Cp_{ap} \cdot (T_{ap} - T_{ref}) \quad (3.221)$$

- A entalpia da corrente de combustível que entra na zona de injeção é dada por:

$$Hcb = Fcb(2).Cp_{cb} \cdot (T_{cb} - T_{ref}) \quad (3.222)$$

Nestas equações, os símbolos Cp_{ap} , Cp_{cb} , T_{ap} e T_{cb} representam as capacidades caloríficas e temperaturas de injeções de ar primário e de combustível respectivamente.

Os termos $Hj(i_{inj} + 1)$, $Hen(i_{inj})$ e $Qger(i_{inj})$ são calculados pelas equações 3.178, 3.179 e 3.180 respectivamente, e $qj(i_{inj})$ é calculado a partir das equações 3.143 e 3.144.

Substituindo a equação 3.178 no balanço de energia (3.222) e isolando $Tj(i+1)$, obtém-se:

$$Tj(i_{inj} + 1) = \frac{Hj(i_{inj}) + Hen(i_{inj}) + Qger(i_{inj}) + qj(i_{inj}) + Hap + Hcb}{Mj(i_{inj} + 1).cpj} + T_{ref} \quad (3.223)$$

d) Cálculo da taxa de consumo de combustível (Δmcb) :

A quantidade de combustível queimado na zona i é limitada à quantidade de oxigênio disponível na chama, considerando-se combustão completa do combustível. Portanto:

$$\Delta M_{cb}(i_{inj}) = \frac{y_g(i_{inj}, 10) \cdot \Delta M_{en}(i) + y_{O_2, ap} \cdot M_{ap}(2)}{OC} \quad (3.224)$$

3.10.3. Balanço de massa e energia no gás anular na zona de injeção da câmara secundária:

a) Balanço de massa global na zona de injeção na câmara de combustão secundária:

O balanço de massa para o gás anular na zona de injeção pode ser representado esquematicamente pela figura 3.21:

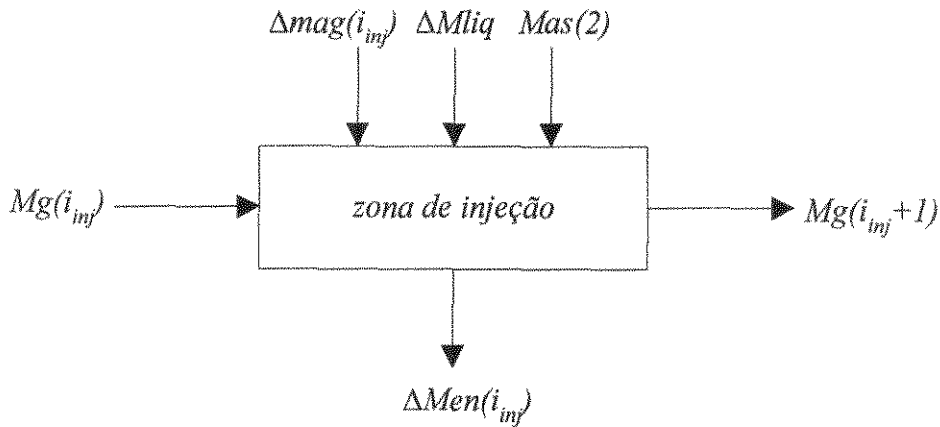


Figura 3.21: Representação esquemática do balanço de massa global na região gasosa anular na zona de injeção da câmara secundária.

Este balanço de massa pode ser expresso matematicamente por:

$$Mg(i_{inj} + 1) = Mg(i_{inj}) + \Delta M_{liq} - \Delta M_{en}(i_{inj}) + \Delta M_{ag}(i_{inj}) + Mas(2) \quad (3.225)$$

na qual ΔM_{liq} é a vazão mássica de voláteis que entra na zona i, proveniente do resíduo líquido;

b) Balanço de massa por componente no gás anular:

O balanço de massa por componente está representado na figura 3.22 , e pode ser expresso como:

- para o oxigênio:

$$y_g(i_{inj} + 1, 10) \cdot Mg_c(i_{inj} + 1) = \left(Mg(i_{inj}) - M_{sv}(i_{inj}) - \Delta M_{en}(i_{inj}) \right) \cdot y_g(i_{inj}, 10) + FM(10) \cdot \Delta M_{svc}(i_{inj}) + Y_{O_2, as} \cdot Mas(2) \quad (3.226)$$

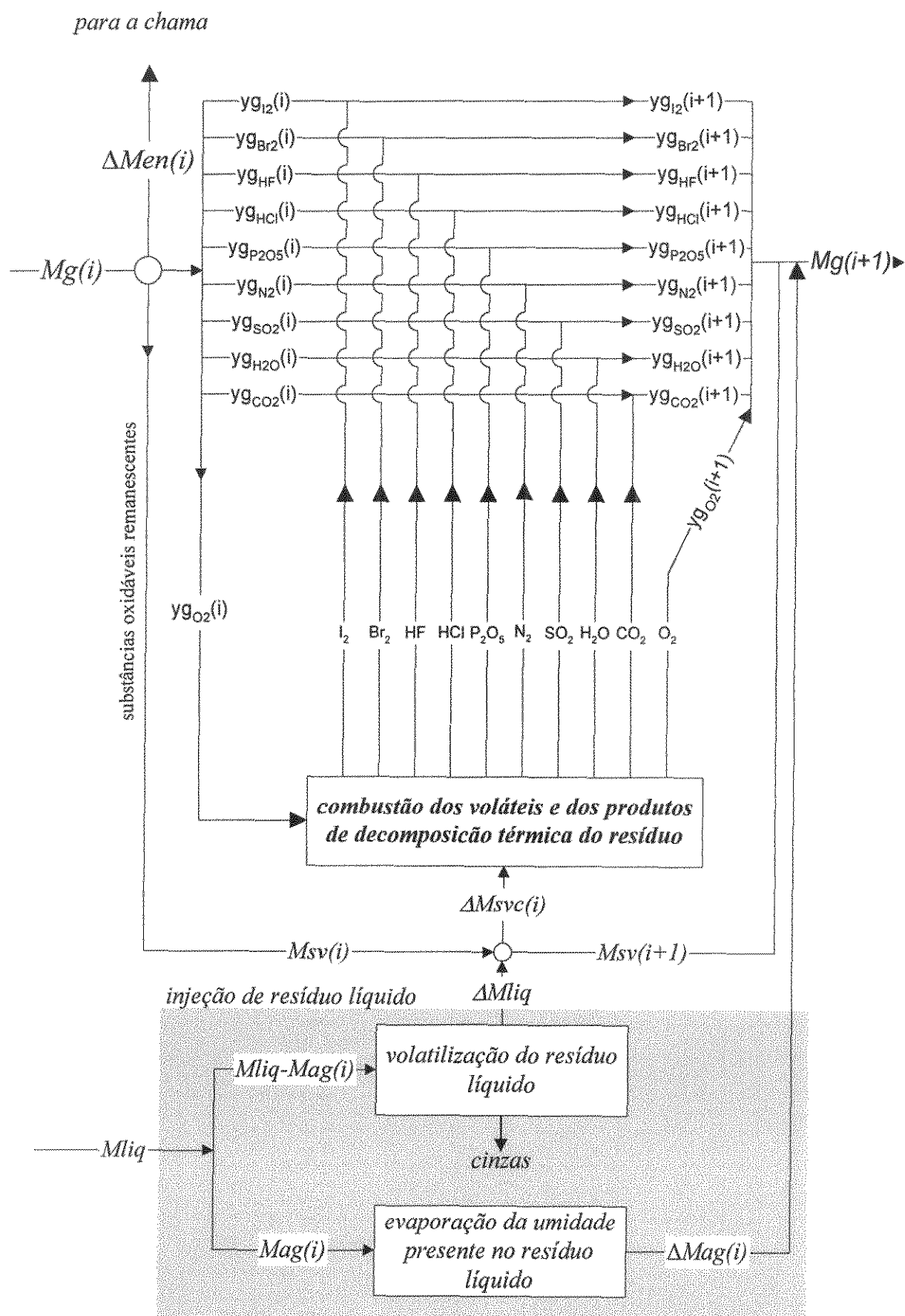


Figura 3.22: Balanço de massa por componente na região gasosa anular, na câmara de combustão secundária, na zona de injeção.

- para o nitrogênio:

$$yg(i_{inj} + 1, 4) \cdot Mg_c(i_{inj} + 1) = \left(Mg(i_{inj}) - Msv(i_{inj}) - \Delta Men(i_{inj}) \right) \cdot yg(i_{inj}, 4) + FM(4) \cdot \Delta Msvc(i_{inj}) + Y_{N_2, as} \cdot Mas(2) \quad (3.227)$$

- Para a água deve ser incluído o termo de evaporação da mesma, ou seja, transferência do resíduo líquido para o gás anular:

$$yg(i_{inj} + 1, j) \cdot Mg(i_{inj} + 1) = \left(Mg(i_{inj}) - Msv(i_{inj}) - \Delta Men(i_{inj}) \right) \cdot yg(i_{inj}, j) + FM(j) \cdot \Delta Msvc(i_{inj}) + \Delta Mag(i_{inj}) \quad (3.228)$$

Na qual $\Delta Msvc(i_{inj})$ é a massa de voláteis e produtos de decomposição térmica, oriundos do resíduo líquido, ou reamantes da câmara primária, por unidade de tempo, que efetivamente sofrem combustão em condições estequiométricas de acordo com o oxigênio disponível, calculado através da equação 3.196, desenvolvida para a câmara primária.

- para os demais componentes:

$$yg(i_{inj} + 1, j) \cdot Mg(i_{inj} + 1) = \left(Mg(i_{inj}) - Msv(i_{inj}) - \Delta Men(i_{inj}) \right) \cdot yg(i_{inj}, j) + FM(j) \cdot \Delta Msvc(i_{inj}) \quad (3.229)$$

O balanço de massa para os voláteis e produtos de decomposição térmica oriundos do resíduo líquido, pode ser escrito como:

$$Msv(i_{inj} + 1) = Msv(i_{inj}) + \Delta Mliq - \Delta Msvc(i_{inj}) \quad (3.230)$$

Se numa determinada zona, houver oxigênio disponível para oxidar todos os voláteis e produtos de decomposição térmica que entra na zona de injeção, então:

$$\Delta Msvc(i_{inj}) = Msv(i_{inj}) + \Delta Mliq \quad (3.231)$$

E portanto:

$$Msv(i_{inj} + 1) = 0 \quad (3.232)$$

Em condições normais de operação, ou seja, naquelas onde há excesso de oxigênio, não há substâncias orgânicas voláteis não oxidadas em quantidades significativas (ou seja, $Msv(i) = 0$).

c) Balanço de energia na região gasosa anular:

O balanço de energia para a região gasosa anular na zona de injeção, pode ser representado esquematicamente pela figura 3.23.

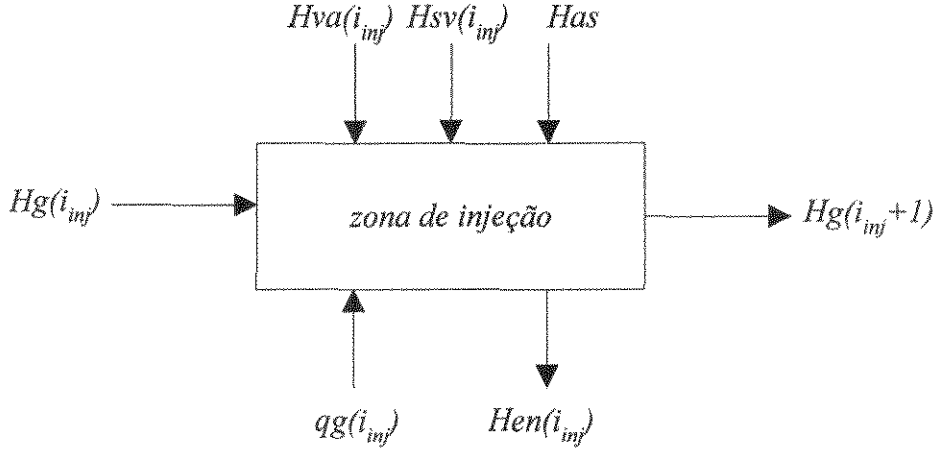


Figura 3.23 : Representação esquemática do balanço de energia na região gasosa anular na zona de injeção na câmara secundária.

Este balanço de energia pode ser expresso matematicamente por:

$$Hg(i_{inj} + 1) = Hg(i_{inj}) + Hva(i_{inj}) + Hsv(i_{inj}) + \Delta Hr(i_{inj}) - Hen(i_{inj}) + qg(i_{inj}) + Has \quad (3.233)$$

sendo

- A entalpia do vapor d'água que entra na zona de injeção, juntamente com o resíduo líquido, dada por:

$$Hva(i) = \Delta Mag(i) \cdot (cpa(Ta - Tref) - cpa(373 - Ta) + \Delta Hva) \quad (3.234)$$

na qual ΔHva é a entalpia de vaporização da água.

Este termo de energia aparece como débito, uma vez que o resíduo líquido é alimentado no estado líquido e a água é evaporada instantaneamente, mediante transferência de energia a partir do gás anular.

- A entalpia do resíduo líquido que entra na zona de injeção dada por:

$$Hsv(i) = \Delta Mliq \cdot Cp_{rl} \cdot (Ta - T_{ref}) \quad (3.235)$$

na qual Cp_{rl} é a capacidade calorífica do resíduo líquido.

- A entalpia do ar secundário que entra na zona de injeção escrita como:

$$Has = Mas(2) \cdot Cp_{as} \cdot (Tas - T_{ref}) \quad (3.236)$$

- A entalpia de combustão dos voláteis é dada por:

$$\Delta Hr(i) = \Delta Mliq(i) \cdot PCrI \quad (3.237)$$

em que $PCrl$ é o poder calorífico do resíduo líquido.

Os termos $Hg(i_{mj} + 1)$, $Hg(i_{mj})$, $Hen(i_{mj})$ e $qg(i_{mj})$ são calculados pelas equações 3.202, 3.199, 3.203 e 3.145 respectivamente, desenvolvidas para a câmara de combustão primária.

Substituindo a equação 3.223 no balanço de energia (3.219), obtem-se:

$$Tg(i_{mj} + 1) = \frac{Hg(i_{mj}) + Hva(i_{mj}) + Hsv(i_{mj}) + \Delta Hr(i_{mj}) - Hen(i_{mj}) + qg(i_{mj}) + Has}{Mg(i_{mj} + 1).cpg} + T_{ref} \quad (3.238)$$

CAPÍTULO 4: ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Capítulo 4: Estudo de sensibilidade paramétrica

4.1. Introdução:

O estudo de sensibilidade paramétrica constitui-se uma importante ferramenta na avaliação da adequação de parte das hipóteses formuladas do modelo, assim como, na identificação dos parâmetros mais importantes, para que estes possam ser quantificados, calculados ou estimados com o maior rigor.

Para o estudo de sensibilidade paramétrica desenvolvido neste capítulo, emprega-se uma condição operacional como referência para um incinerador de forno rotativo associado a uma câmara de pós-combustão, com características típicas industriais. São realizadas variações positiva e negativas de 10% para os parâmetros selecionados e analisados os efeitos sobre os perfis axiais de temperaturas dos gases, do sólido e das superfícies interna e externa da parede da câmara. Para os parâmetros que apresentam graus de incertezas mais significativos, são realizadas, adicionalmente, variações superiores a 10%.

Neste capítulo são estudadas ainda, as influências da geometria da chama, das distribuições ao longo das zonas das taxas de entrada de gás na chama e de redução de massa do sólido, sobre os perfis axiais de temperaturas.

4.2. Simulação de referência:

Os dados completos sobre a simulação de referência, em relação à qual faz-se o estudo comparativo de sensibilidade paramétrica, são apresentados a seguir, divididos em dois grupos, a saber, parâmetros e condições operacionais (item 4.2.1) e resultados da simulação de referência (item 4.2.2).

4.2.1. Parâmetros e condições operacionais:

Os parâmetros e as condições operacionais do processo de incineração térmica utilizados neste capítulo para realizar a simulação de referência, estão listados abaixo.

- Propriedades de transferência de calor:

Condutividade térmica da parede do queimador	(W/m/K)	20,0
Condutividade térmica do sólido	(W/m/K)	0,61
Condutividade térmica do refratário		
distância adimensional		
0,0 a 0,1	(W/m/K)	1,2
0,1 a 0,2	(W/m/K)	1,67
0,2 a 0,3	(W/m/K)	1,95
0,3 a 0,4	(W/m/K)	2,55
0,4 a 1,0	(W/m/K)	2,85
Difusividade Térmica	(m ² /s)	2,7x10 ⁶
Emissividade do sólido :		0,80
Emissividade da parede externa :		0,80
Emissividade da parede interna:		0,75
Emissividade da chama:		0,80
Emissividade do gás		0,60
Transmissividade do gás :		0,90

- Propriedades do resíduo sólido:

Calor específico do sólido seco	(j/kg/K)	840,0
Poder calorífico inferior do resíduo	(j/kg)	$5,0 \times 10^6$
Massa específica do sólido seco	(kg/m ³)	1490,0
Composição do resíduo sólido (base seca)		
carbono	(kg/kg)	0,36
hidrogênio	(kg/kg)	0,12
enxofre	(kg/kg)	0,03
nitrogênio	(kg/kg)	0,03
fósforo	(kg/kg)	0,006
cloro	(kg/kg)	0,006
flúor	(kg/kg)	0,006
bromo	(kg/kg)	0,006
iodo	(kg/kg)	0,006
oxigênio	(kg/kg)	0,03
cinzas	(kg/kg)	0,40
total	(kg/kg)	1,000
teor de umidade no resíduo sólido (kg de umidade/kg de resíduo seco)		0,2
tempo de residência do sólido	(s)	1800,0
- Propriedades do resíduo líquido:

Composição do resíduo líquido (base seca)		
carbono	(kg/kg)	0,5940
hidrogênio	(kg/kg)	0,1980
enxofre	(kg/kg)	0,0495
nitrogênio	(kg/kg)	0,0495
fósforo	(kg/kg)	0,0099
cloro	(kg/kg)	0,0099
flúor	(kg/kg)	0,0099
bromo	(kg/kg)	0,0099
iodo	(kg/kg)	0,0099
oxigênio	(kg/kg)	0,0495
cinzas	(kg/kg)	0,0100
total	(kg/kg)	1,0000
teor de umidade (umidade/resíduo úmido):	(kg/kg)	0,5
Capacidade calorífica do resíduo líquido	(j/kg/K)	2100,0
Capacidade calorífica das substâncias volatilizadas do resíduo	(j/kg/K)	3000,0
- Propriedades da água

Capacidade calorífica da água	(j/kg/K)	4190,0
Entalpia de vaporização da água	(j/kg)	$2,26 \times 10^6$
- Dimensões e características da câmara de combustão primária:

Raio externo	(m)	1,40
Raio interno	(m)	1,25
Ângulo de inclinação	(graus)	2,0
Comprimento	(m)	12,0

Espessura da parede do queimador	(m)	0,15
Velocidade rotacional	(revol./s)	0,033
• Dimensões da câmara de combustão secundária:		
Raio externo	(m)	1,2
Raio interno	(m)	1,05
Comprimento	(m)	8,0
• Dimensões da câmara de interligação:		
Raio externo equivalente ao cilindro com a mesma área	(m)	1,3
Raio interno equivalente ao cilindro com a mesma área	(m)	1,15
Comprimento da câmara de interligação	(m):	1,5
• Vazões mássicas das correntes de entrada na câmara de combustão primária:		
Vazão mássica de sólido seco na entrada	(kg/s)	0,20
Vazão mássica de combustível	(kg/s)	0,10
Vazão mássica de ar primário	(kg/s)	0,85
Vazão mássica de gás na primeira zona	(kg/s)	2,65
• Vazões mássicas das correntes de entrada na câmara de combustão secundária:		
Vazão mássica de combustível	(kg/s)	0,032
Vazão mássica de ar primário	(kg/s)	0,300
Vazão mássica de ar secundário	(kg/s)	5,300
Vazão mássica de alimentação do resíduo líquido	(kg/s)	0,40
• Temperaturas das correntes de entrada nas câmaras primária e secundária, e outras:		
Temperatura ambiente	(K)	303,0
Temperatura de referência	(K)	298,0
Temperatura do sólido na entrada do forno	(K)	303,0
Temperatura do ar primário	(K)	333,0
Temperatura do ar secundário	(K)	333,0
Temperatura do combustível	(K)	393,0
Temperatura do resíduo líquido	(K)	303,0
• Propriedades do combustível auxiliar:		
Poder calorífico	(j/kg)	4,18E+7
Massa específica	(kg/m ³)	1030,0
Composição elementar do combustível:		
carbono	(kg/kg)	0,872
hidrogênio	(kg/kg)	0,095
enxofre	(kg/kg)	0,028
nitrogênio	(kg/kg)	0,005
total	(kg/kg)	1,000
Porcentagem de perda de hidrogênio	(%)	5,2
Capacidade calorífica	(j/kg/K)	3000,0

- Raio da chama (câmaras de combustão primária e secundária):
distância adimensional (fração do raio interno)
0,0 a 0,1 0,60
0,1 a 0,2 0,80
0,2 a 0,3 0,90
0,3 a 1,0 0,95
- Taxa de entrada de gás na chama:
distância adimensional (fração da alimentação de ar secundário)
0 a 0,1 0,85
0,1 a 0,2 0,10
0,2 a 0,3 0,05
0,3 a 1,0 0,00
- Taxa de redução de massa do resíduo sólido:
10% do vazão mássica de resíduo sólido alimentado no forno, a cada zona

4.2.2. Resultados da simulação de referência:

Os resultados obtidos na simulação de referência estão tabelados e apresentados na forma gráfica, conforme observa-se a seguir nas tabelas 4.1 e 4.2 e figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1: Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão primária.

distância adimens ional	Temperatura (° C)				
	sólid o	gás anular	jato (chama)	pare de interna	pare de externa
0,0	30,0	60,0	75,2	289,4	108,6
0,1	99,0	82,4	105,3	289,4	108,6
0,2	100,0	289,3	1066,1	486,5	164,8
0,3	490,5	521,6	918,9	856,8	308,3
0,4	789,2	873,6	873,6	839,6	338,2
0,5	775,0	862,2	862,2	811,2	343,0
0,6	757,2	850,4	850,4	796,9	339,0
0,7	742,8	839,1	839,1	784,6	335,6
0,8	728,3	828,4	828,4	772,8	332,4
0,9	714,0	818,2	818,2	761,7	329,2
1,0	700,4	808,3	808,3	752,4	325,7

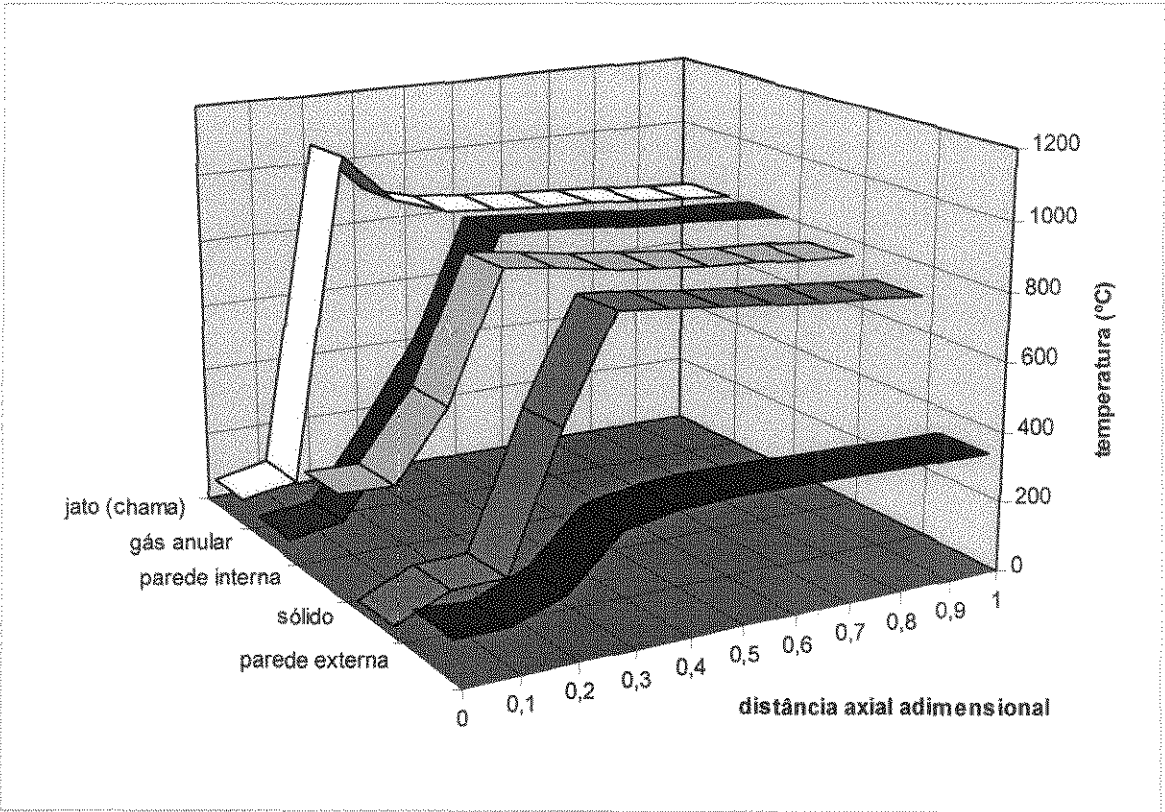


Figura 4.1: Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão primária para a simulação de referência.

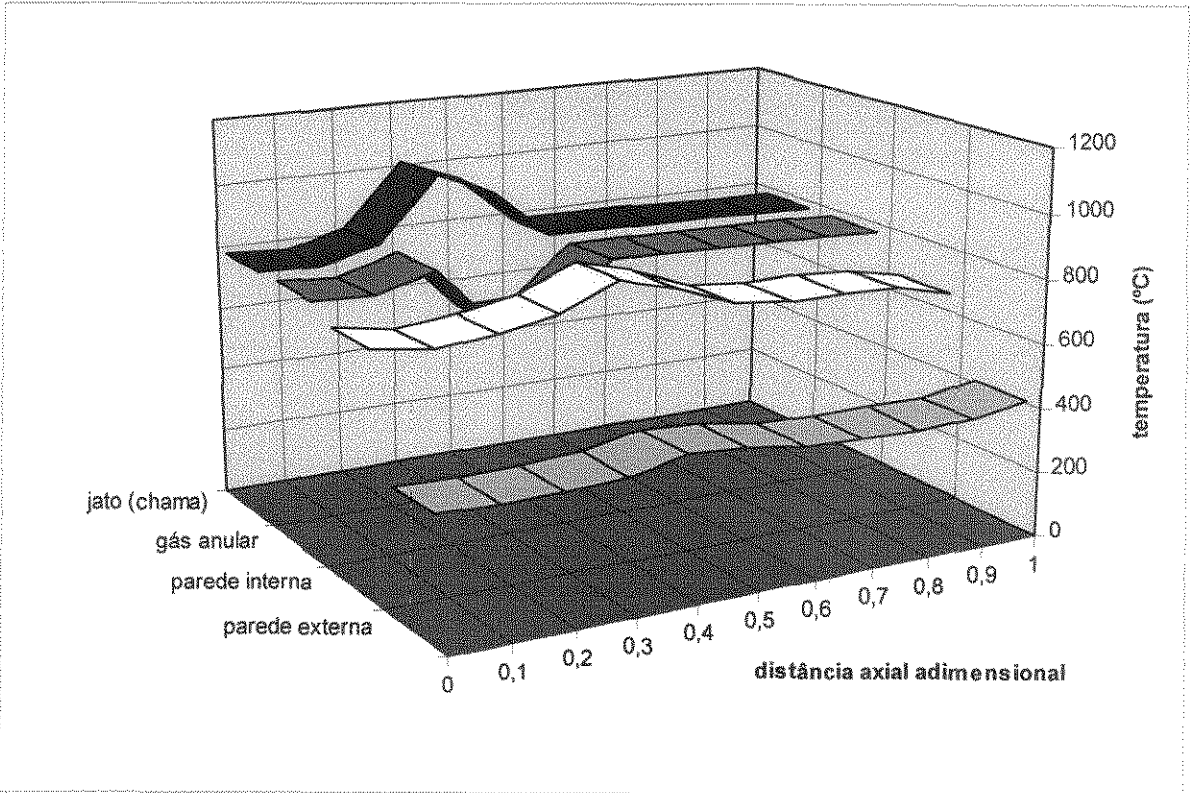


Figura 4.2: Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão secundária para a simulação de referência.

Tabela 4.2: Distribuição das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão secundária.

distância adimensi onal	Temperatura (° C)			
	gás anular	jato (chama)	pare de interna	pare de externa
0,0	792,6	792,6	741,4	380,7
0,1	783,5	783,5	712,7	374,6
0,2	832,8	832,8	734,5	380,5
0,3	643,9	1027,9	769,0	386,1
0,4	645,9	955,4	845,2	427,0
0,5	796,9	796,9	793,6	413,3
0,6	793,6	793,6	724,7	383,5
0,7	789,2	789,2	708,4	376,4
0,8	784,8	784,8	703,9	374,8
0,9	780,3	780,3	698,7	376,3
1,0	774,6	774,6	656,9	406,4

4.3. Resultados para variações de 10% nos parâmetros selecionados

Os resultados apresentados neste item constituem o estudo comparativo de sensibilidade paramétrica, para variações positivas e negativas de 10% nos parâmetros selecionados, cujos efeitos são avaliados em termos de desvio percentual em relação aos resultados obtidos com a simulação de referência.

4.3.1 Seleção de parâmetros:

Abaixo estão relacionados os parâmetros selecionados para o estudo de sensibilidade paramétrica em questão:

- capacidade calorífica do gás anular
- capacidade calorífica do jato
- capacidade calorífica do sólido seco
- capacidade calorífica do resíduo líquido
- capacidade calorífica das substâncias volatilizadas do resíduo
- capacidade calorífica do combustível
- condutividade térmica do sólido
- condutividade térmica do refratário
- emissividade do sólido
- emissividade da parede externa
- emissividade da parede interna
- emissividade da chama
- emissividade do gás
- transmissividade do gás
- coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede interna e o sólido
- coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede interna e o gás
- coeficiente de transferência de calor convectivo entre o gás e o sólido
- coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede externa e o ambiente
- tempo de residência do sólido
- viscosidade dos gases

Os parâmetros relacionados com o resíduo sólido dizem respeito somente à câmara de combustão primária.

4.3.2. Análise comparativa dos resultados:

Devido ao grande número de dados, os resultados das simulações para as variações positivas e negativas dos parâmetros selecionados são apresentados neste item nas formas gráfica para a maioria dos parâmetros e de tabela simplificada para alguns menos importantes. Observa-se a seguir, dois grupos de gráficos. No primeiro grupo, figuras 4.3 a 4.10, os efeitos, em termos de variações percentuais das temperaturas, das variações positivas e negativas dos parâmetros, podem ser analisados de forma comparativa para duas seções transversais de cada câmara de combustão. São elas, a seção posterior da primeira zona onde ocorre a chama, que para a simulação de referência em questão corresponde à distância adimensional igual a 0,3 para a câmara primária e 0,4 para a secundária; e a última seção transversal de cada câmara. As escolhas dessas seções justificam-se pelo fato de que na região da chama ocorrem as maiores temperaturas e as maiores variações percentuais quando impõe-se variações nos parâmetros; e a última seção por ser de interesse operacional e onde normalmente faz-se as medições das temperatura para efeito de controle e monitoramento.

No segundo grupo, figuras 4.11 a 4.64, pode-se observar as distribuições das temperaturas nas seções transversais das câmaras de combustão, ao longo do seu eixo longitudinal, que permitem análises mais minuciosas dos efeitos das variações dos parâmetros.

a) Primeiro grupo de gráficos : análise comparativa:

Analisando-se o primeiro grupo de gráficos, observa-se claramente, que os efeitos dos parâmetros podem ser divididos em três categorias por ordem de importância:

categoria I: parâmetros cujas variações provocam efeitos muito significativos sobre as distribuições das temperaturas ao longo da câmara, superiores a 1% e atingindo várias unidades percentuais;

- ◊ capacidade calorífica do gás anular
- ◊ capacidade calorífica do jato
- ◊ condutividade térmica da parede

categoria II: parâmetros cujas variações provocam efeitos moderadamente significativos sobre as distribuições das temperaturas ao longo da câmara, em torno de 1% ou menores;

- ◊ emissividade do sólido
- ◊ emissividade da parede externa
- ◊ emissividade da parede interna
- ◊ emissividade da chama
- ◊ emissividade do gás

categoria III: parâmetros cujas variações provocam efeitos pouco significativos sobre as distribuições das temperaturas ao longo da câmara, em torno de 0,1% ou menores;

- ◊ capacidade calorífica do sólido seco
- ◊ capacidade calorífica do resíduo líquido

- ◇ capacidade calorífica das substâncias volatilizadas do resíduo
- ◇ capacidade calorífica do combustível
- ◇ Condutividade térmica do sólido
- ◇ transmissividade do gás
- ◇ coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede interna e o sólido
- ◇ coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede interna e o gás
- ◇ coeficiente de transferência de calor convectivo entre o gás e o sólido
- ◇ coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede externa e o ambiente
- ◇ tempo de residência do sólido
- ◇ viscosidade dos gases

Estas constatações estão coerentes com o esperado para este tipo de processo. A importância evidente das capacidades caloríficas da jato e do gás anular, pode ser compreendida pelo fato de que as correntes do jato e do gás anular correspondem às maiores vazões mássicas do processo em questão, associado ao fato de que esta propriedade termodinâmica tem sempre grande influência nos processos em que ocorrem grandes taxas de transferência de calor com fluxos de massa, como é o presente caso.

As capacidades caloríficas das outras correntes, ou seja, do sólido seco, das substâncias voláteis, do resíduo líquido, e do combustível, apresentam efeitos pouco significativos sobre as distribuições de temperaturas (categoria III). Embora haja a destacada importância desta propriedade termodinâmica, neste caso, ela torna-se pouco significativa pois diz respeito à correntes que correspondem à uma fração pequena ou relativamente pequena da vazão mássica global, e ainda, que existem apenas em alguns trechos das câmaras, pois são consumidas e incorporadas às correntes de jato e gás anular.

A condutividade térmica da parede da câmara, ou seja, basicamente o refratário, é também um parâmetro importante (categoria I), embora provoque efeitos menores que aqueles provocados pelas capacidades caloríficas. Isto é justificado pelo fato de que trata-se de um processo com elevadas temperatura e de grandes áreas de trocas térmicas com o ambiente.

A importância mais significativa das emissividades do que dos coeficientes de película, justifica-se pelo fato de que trata-se de um processo onde ocorrem altas temperaturas e o principal processo de transferência de calor é a radiação térmica e não a convecção.

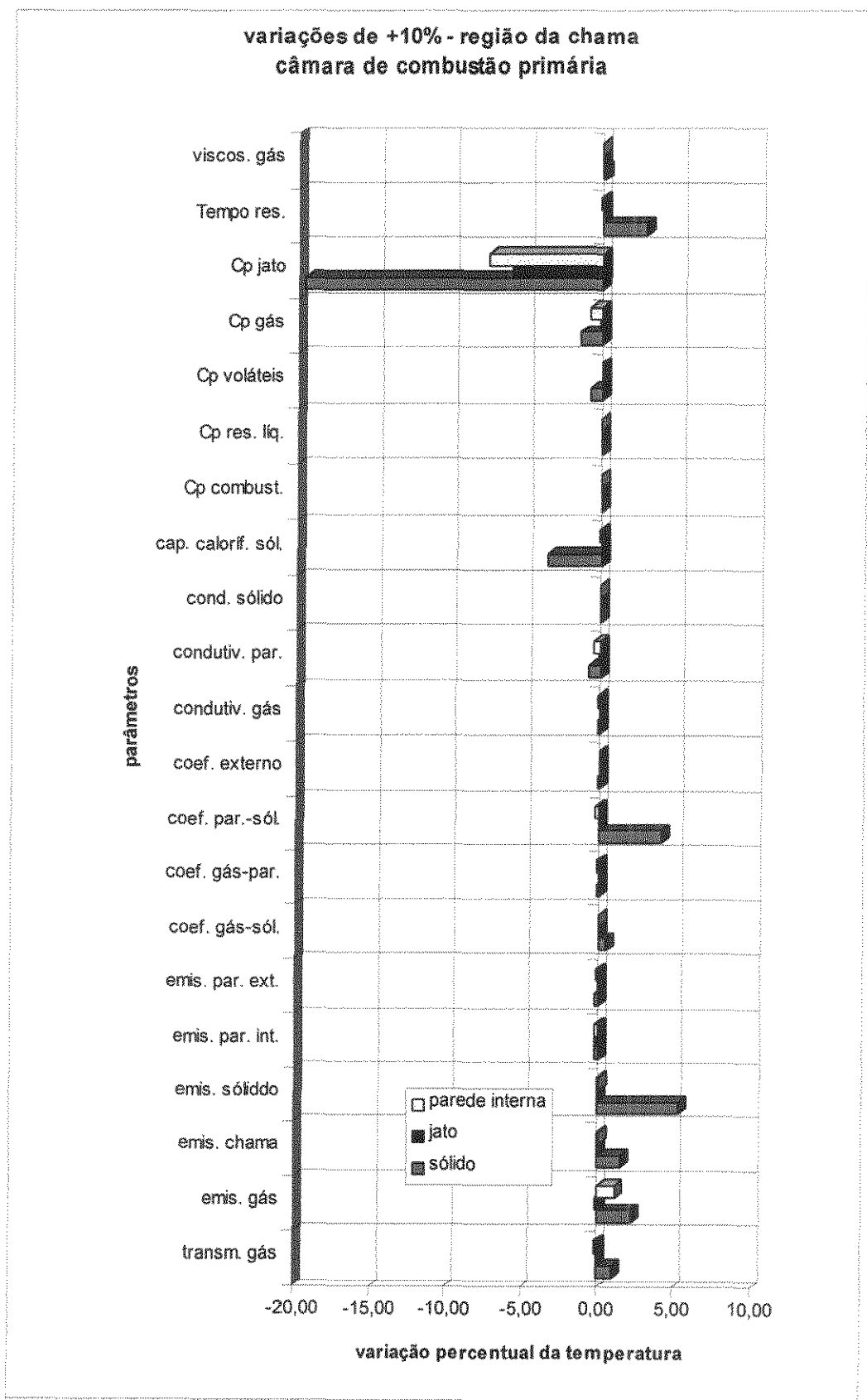


Figura 4.3: Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros seleccionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão primária.

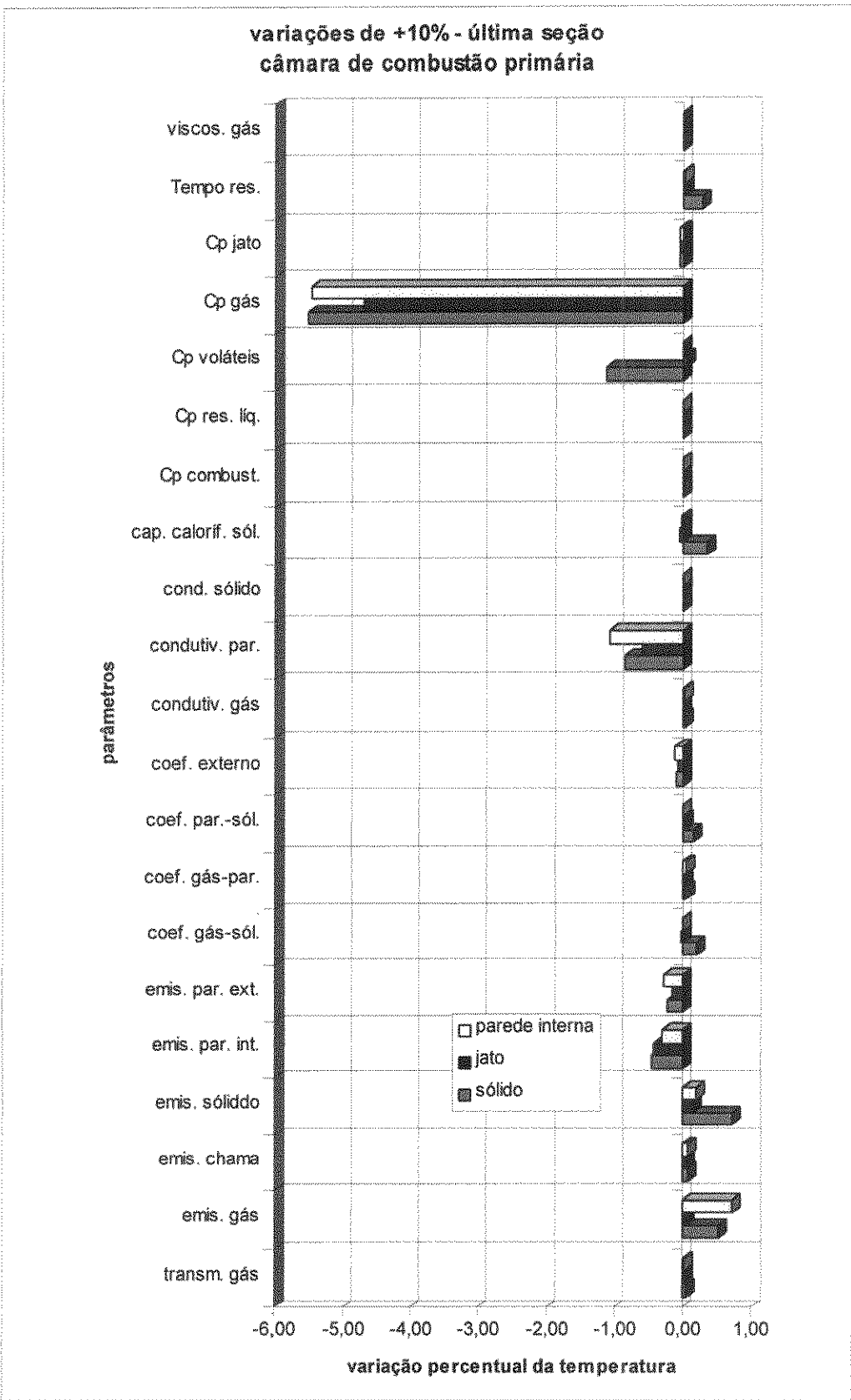


Figura 4.4: Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão primária.

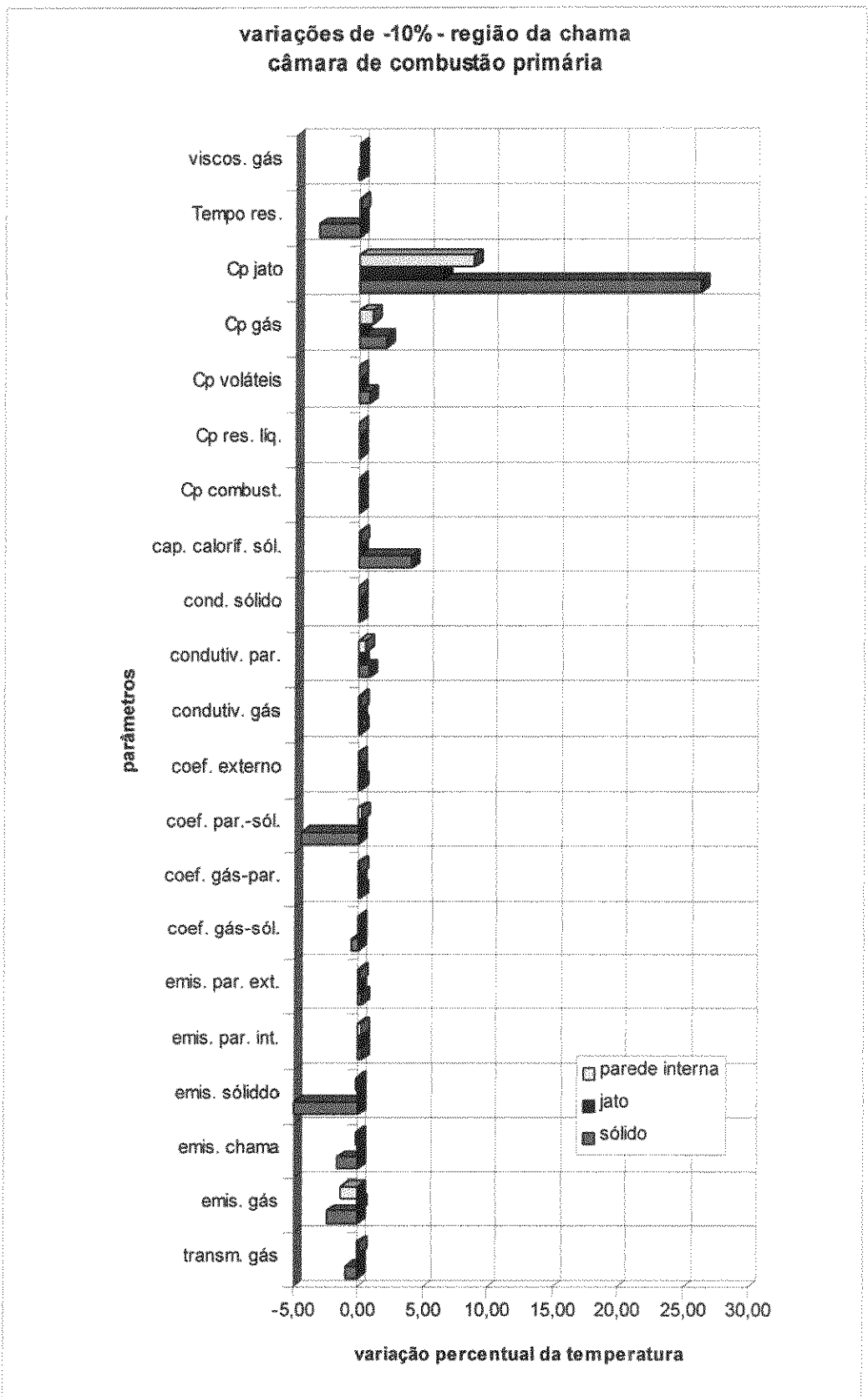


Figura 4.5: Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão primária.

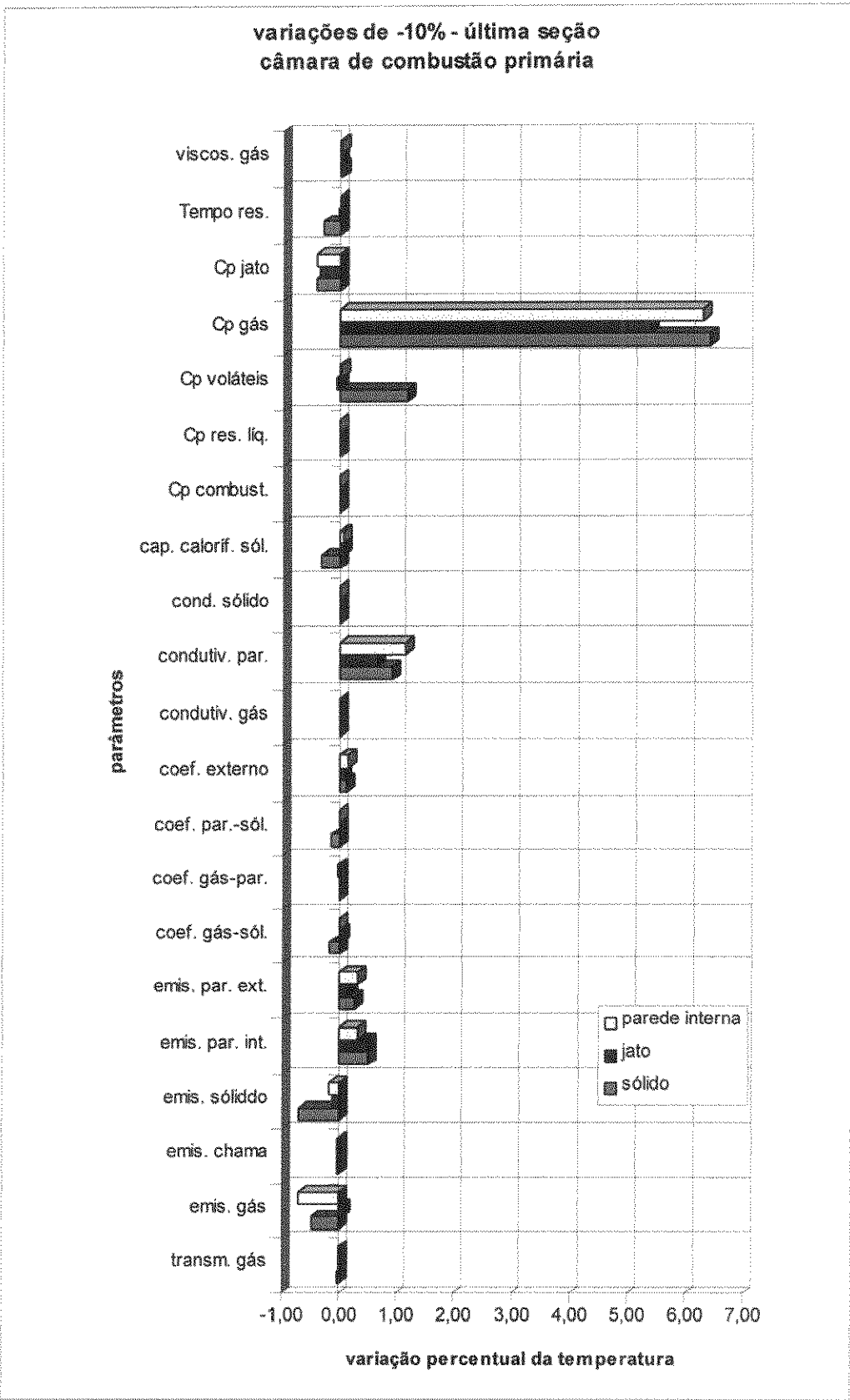


Figura 4.6: Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros seleccionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão primária.

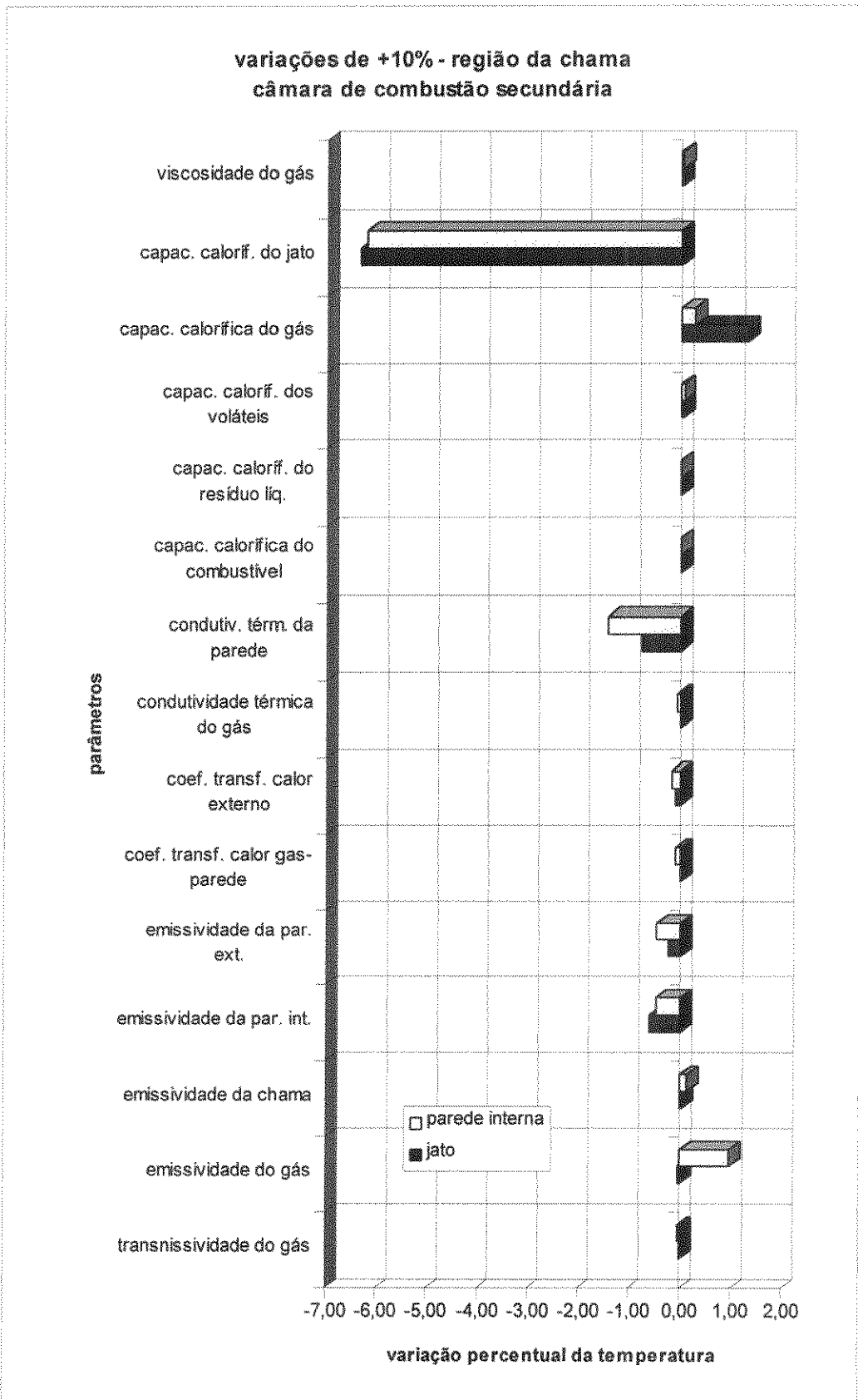


Figura 4.7: Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros seleccionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão secundária.

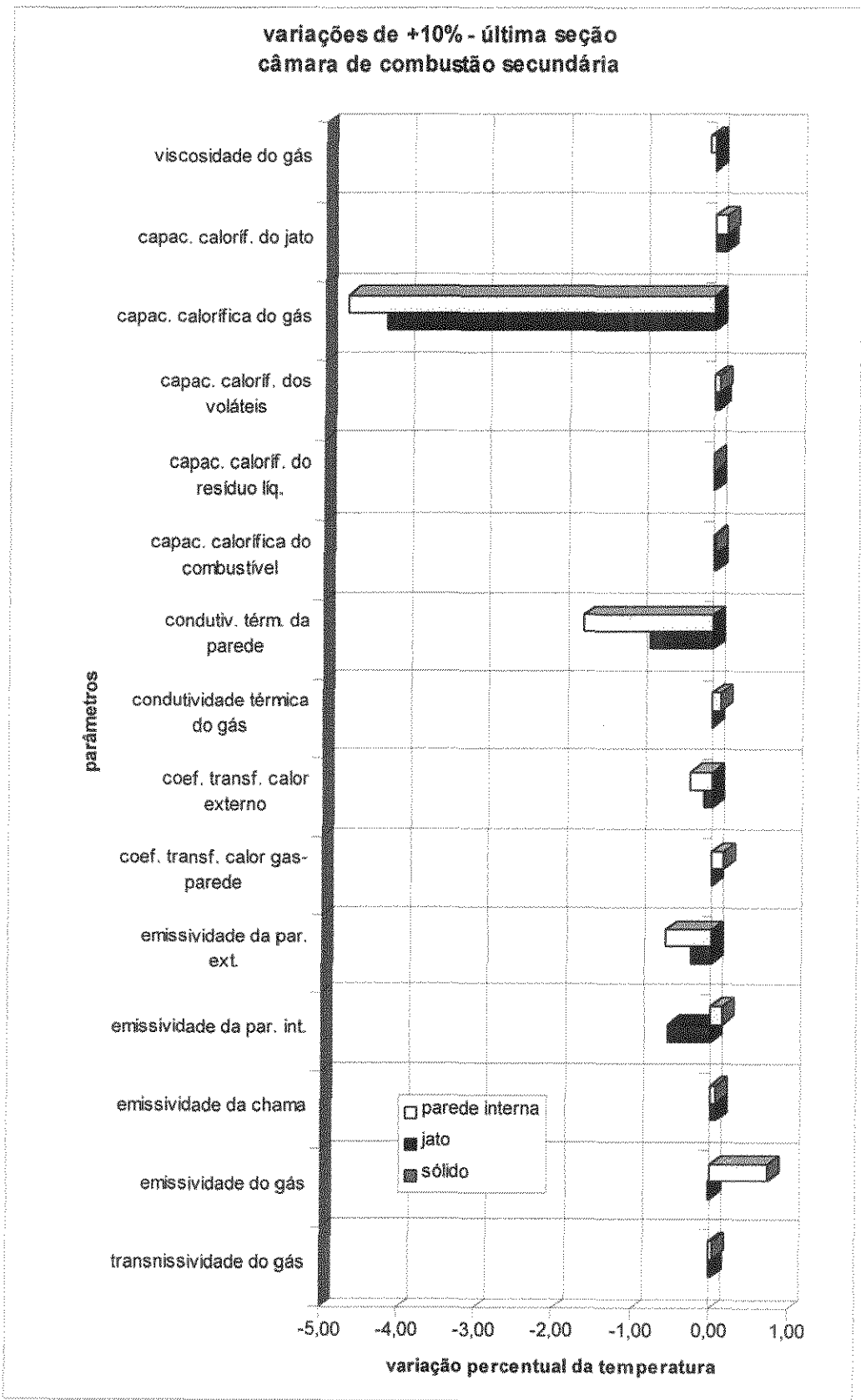


Figura 4.8: Efeitos das variações individuais de +10% nos parâmetros seleccionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão secundária.

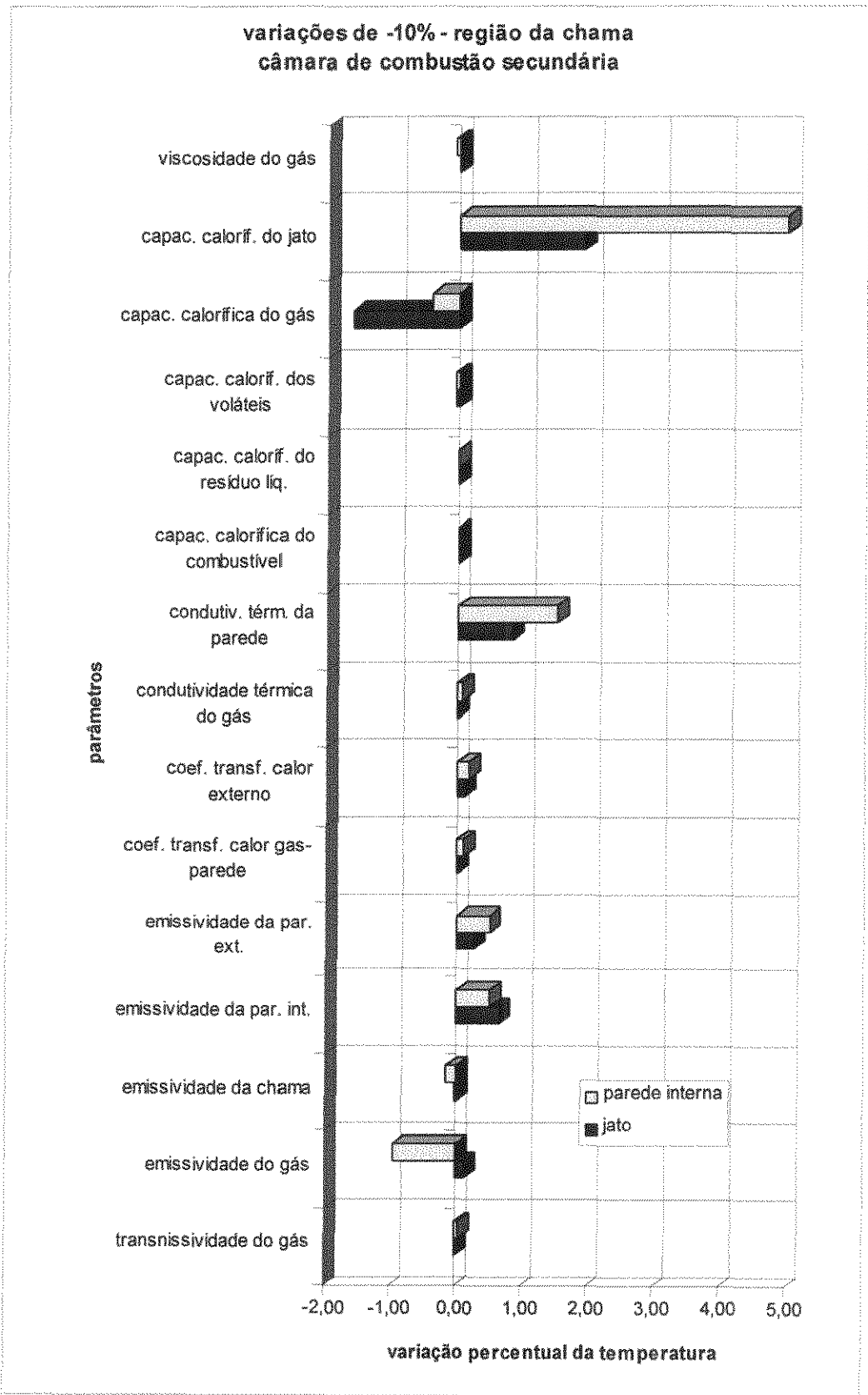


Figura 4.9: Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros selecionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na região da chama da câmara de combustão secundária.

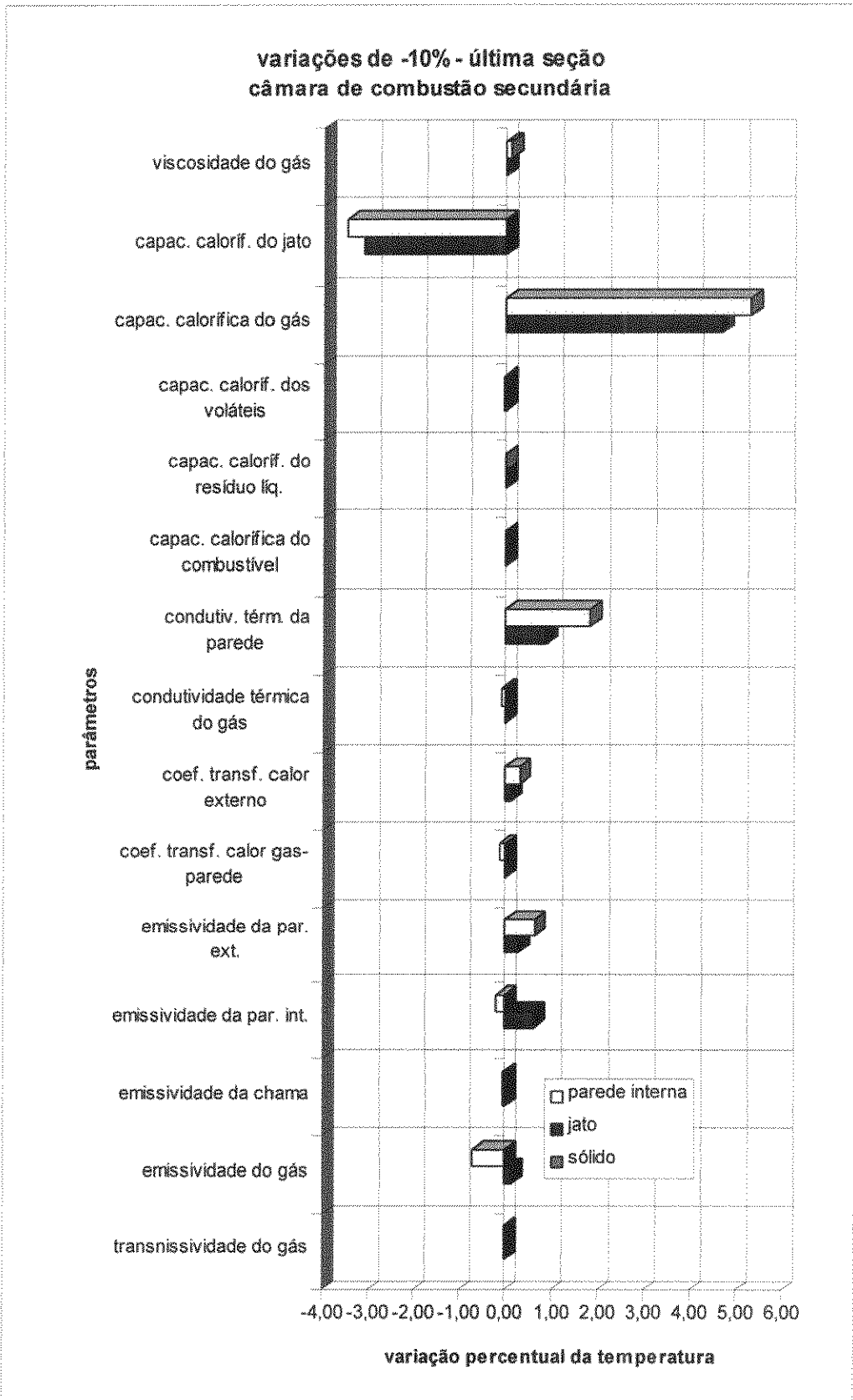


Figura 4.10: Efeitos das variações individuais de -10% nos parâmetros seleccionados sobre as temperaturas do sólido, do jato e da parede interna, na última seção transversal da câmara de combustão secundária.

b) Segundo grupo de gráficos : análises individuais

As figuras 4.11 a 4.64, contemplam os efeitos em termos de variações percentuais das temperaturas para variações de 15 parâmetros analisados individualmente. Os outros seis parâmetros que apresentam efeitos poucos significativos são apresentados na forma de uma tabela simplificada com os efeitos expressos em termos de média aritmética (tabela 4.3).

Observando-se os gráficos em questão, constata-se que, com as exceções da condutividade térmica da parede da câmara, das emissividades das paredes externa e interna, e do coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede externa e o ambiente, os gráficos apresentam o mesmo comportamento com picos das variações percentuais das temperaturas na região da chama, e redução gradual à medida que se aproxima o final da câmara de combustão. As variáveis relacionadas anteriormente como exceções, apresentam comportamentos de crescimento das variações percentuais das temperaturas à medida que se aproxima o final da câmara, onde constata-se os maiores valores das mesmas.

Os efeitos das variações positivas e negativas da capacidade calorífica do gás anular podem ser observados nas figuras 4.11 a 4.15 para a câmara primária e figuras 4.16 a 4.19 para a câmara secundária. Constata-se claramente que os efeitos sobre as temperaturas são significativos principalmente após o início da chama na câmara.

As mesmas observações são aplicáveis aos efeitos provocados pelas variações na condutividade térmica da parede da câmara (refratário).

Nota-se, pela observação das figuras 4.20 a 4.25, que as variações da capacidade calorífica do jato produz efeitos mais significativos na câmara secundária, em que persistem variações em torno de 4% em relação à referência.

Portanto, os parâmetros capacidades caloríficas do jato e do gás anular e condutividade térmica da parede são os mais importantes, cujos valores devem ser determinados de forma tão rigorosa quanto possível. Vale a pena ressaltar, que no presente trabalho, as capacidades caloríficas do jato e do gás anular são calculados por uma única sistemática levando-se em conta a influência da composição e da temperatura da mistura gasosa. A condutividade térmica da parede depende de informações precisas do fornecedor material refratário.

a) Efeitos das variações de 10% na capacidade calorífica do gás.

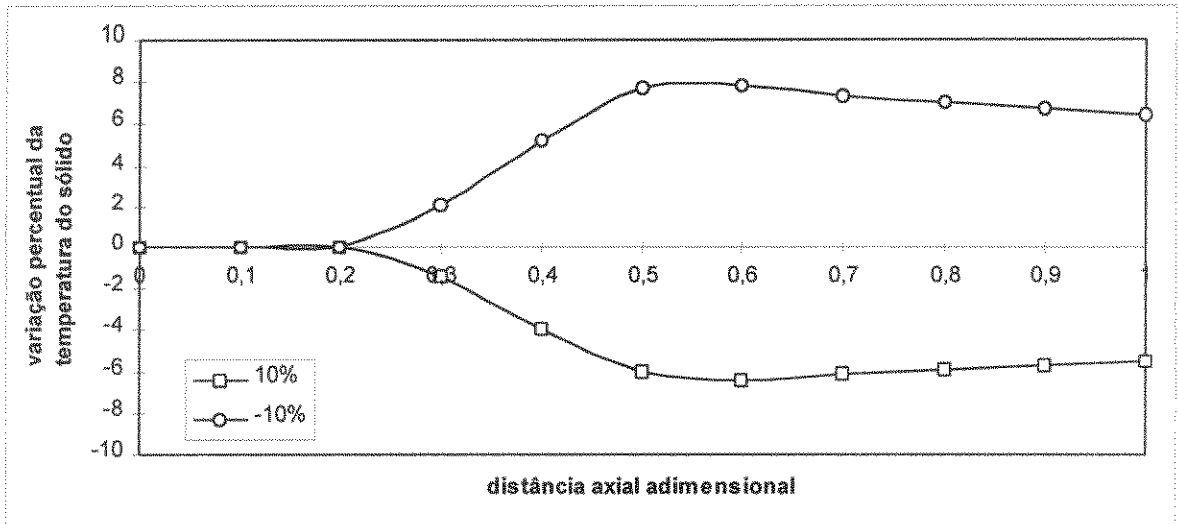


Figura 4.11: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

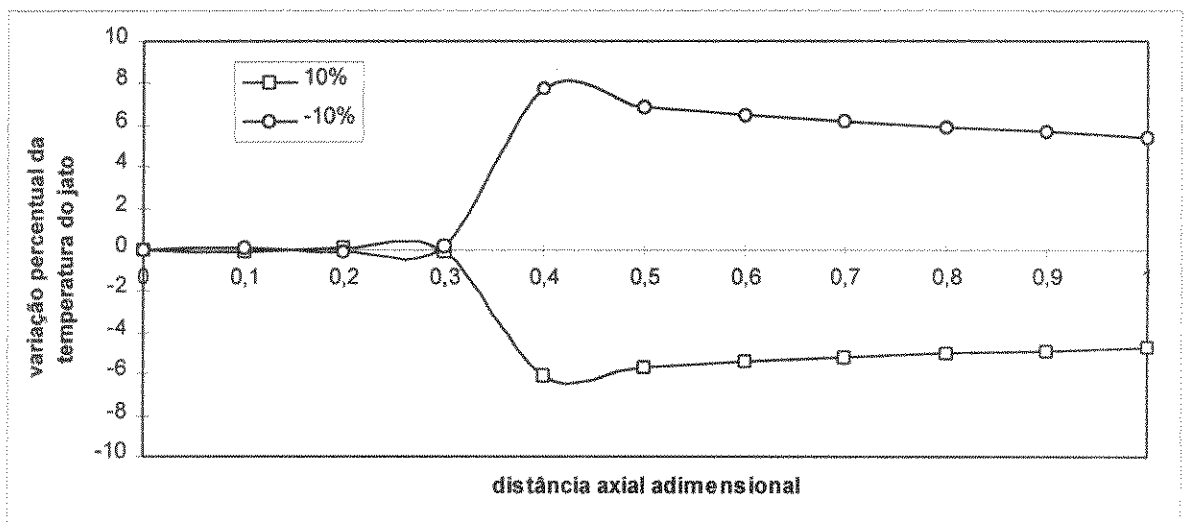


Figura 4.12: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do jato (chama) na câmara de combustão primária.

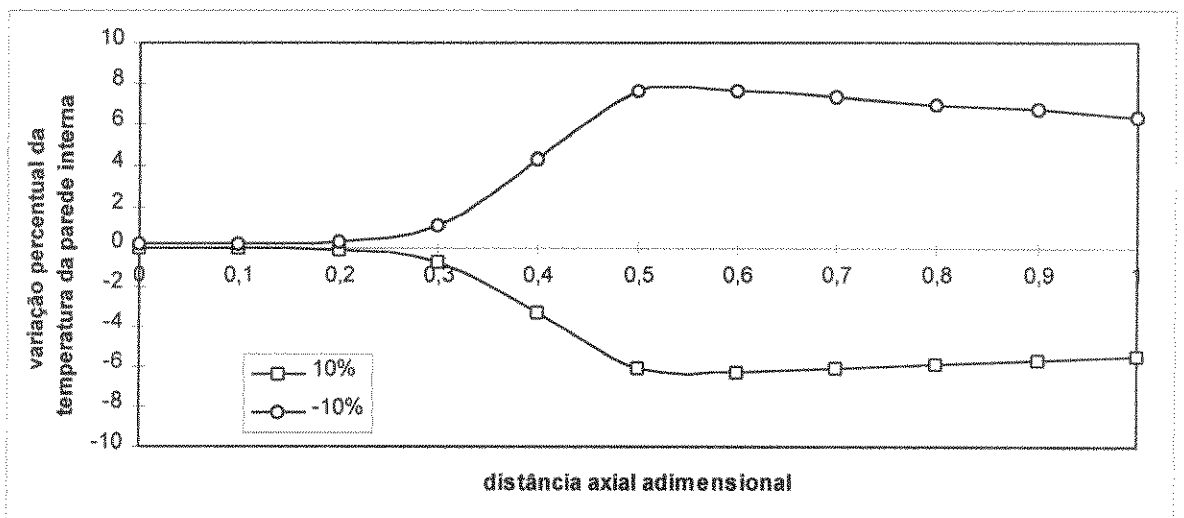


Figura 4.13: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

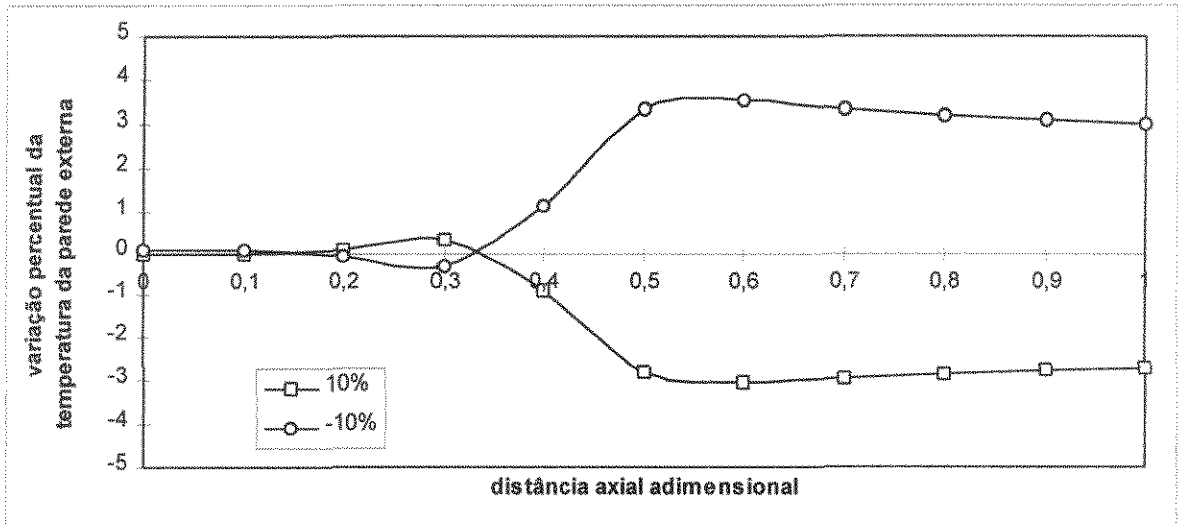


Figura 4.14: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede externa da câmara de combustão primária.

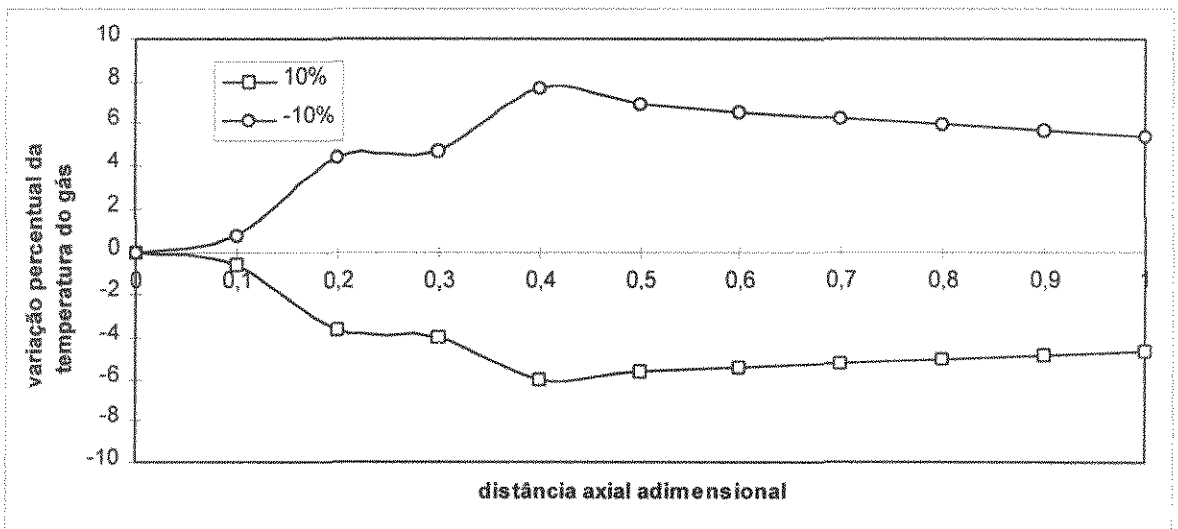


Figura 4.15: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

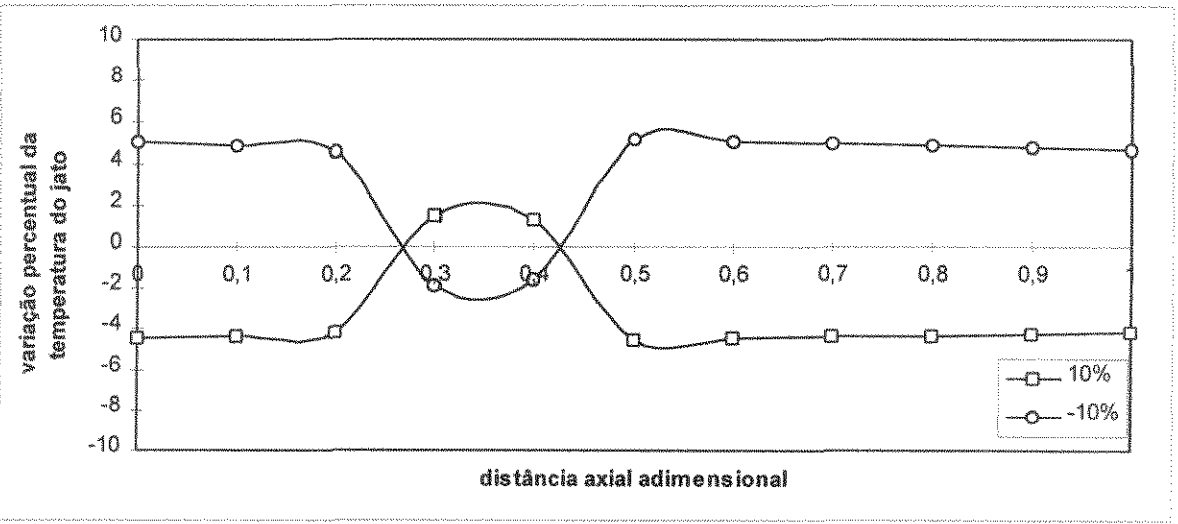


Figura 4.16: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do jato (chama) na câmara de combustão secundária.

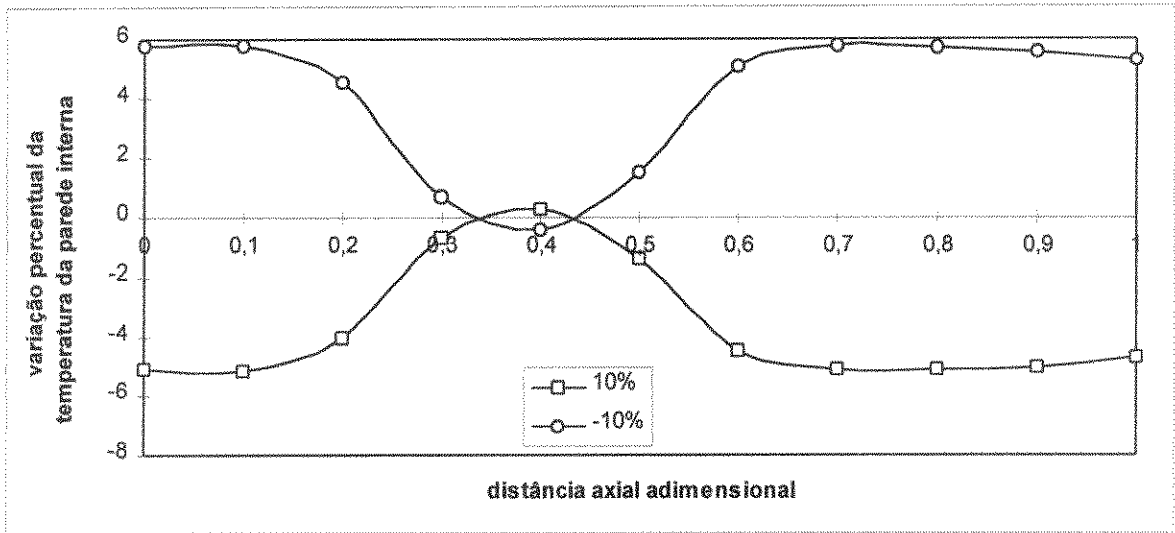


Figura 4.17: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão secundária.

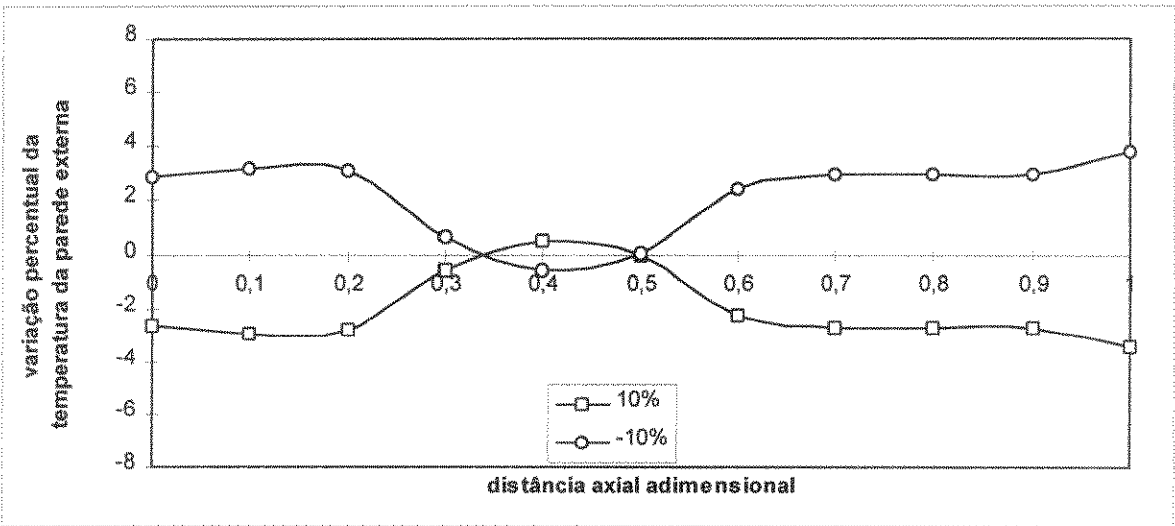


Figura 4.18: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura da parede externa da câmara de combustão secundária.

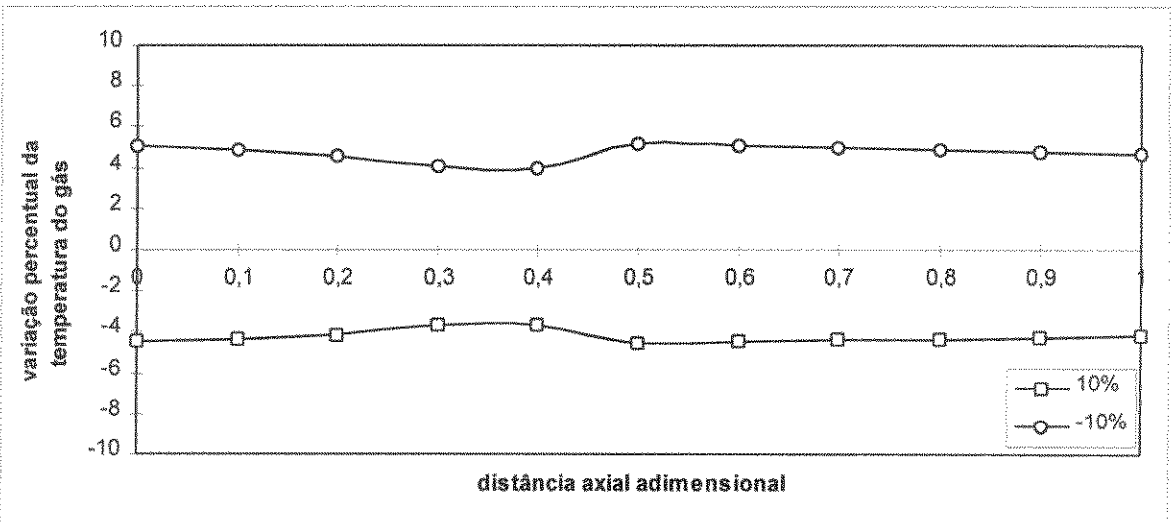


Figura 4.19: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão secundária.

b) Efeitos das variações de 10% na capacidade calorífica do jato:

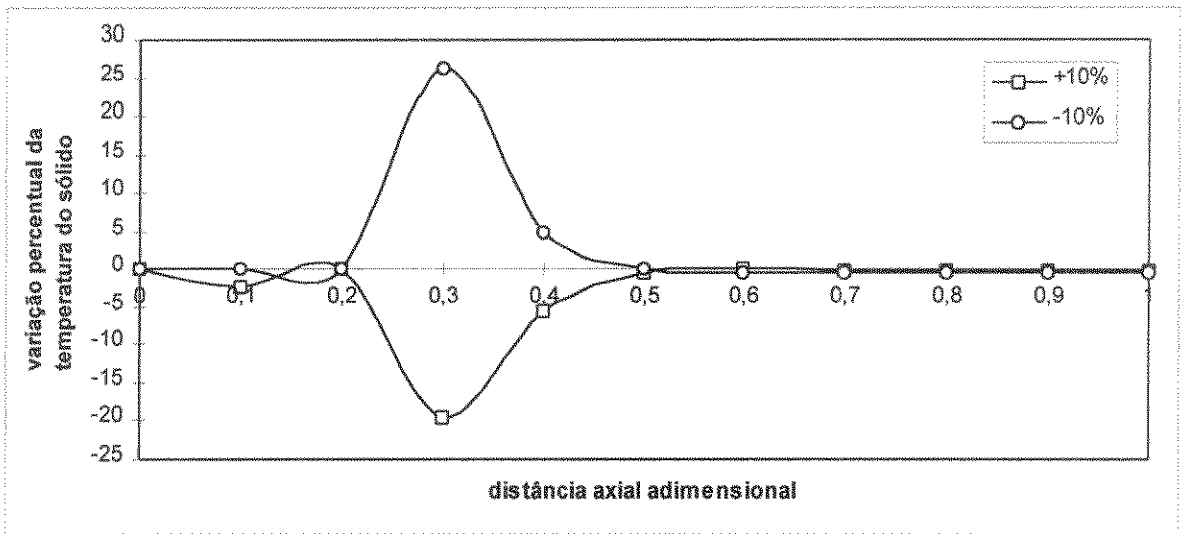


Figura 4.20: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

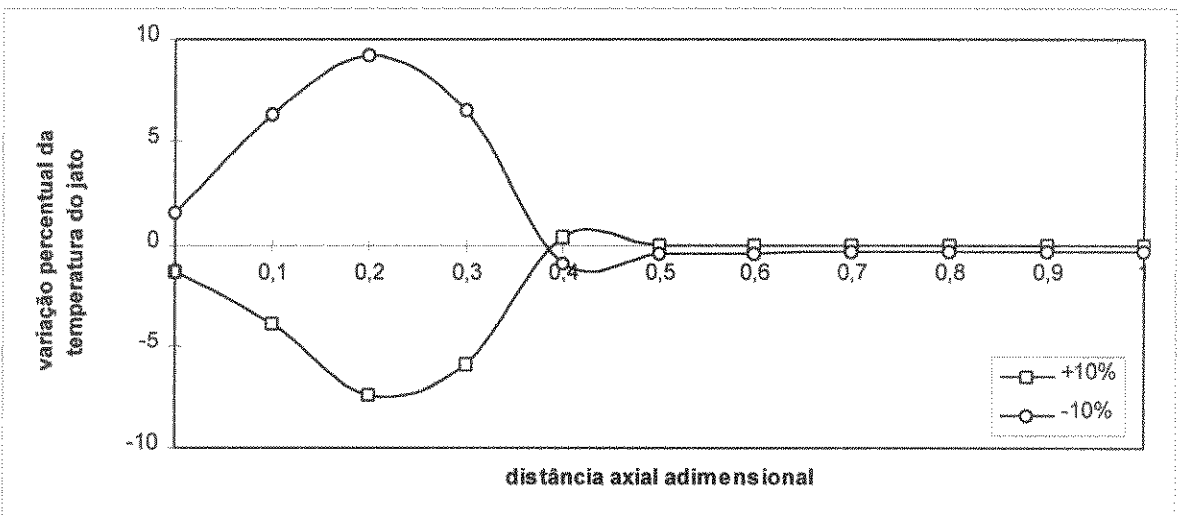


Figura 4.21: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão primária.

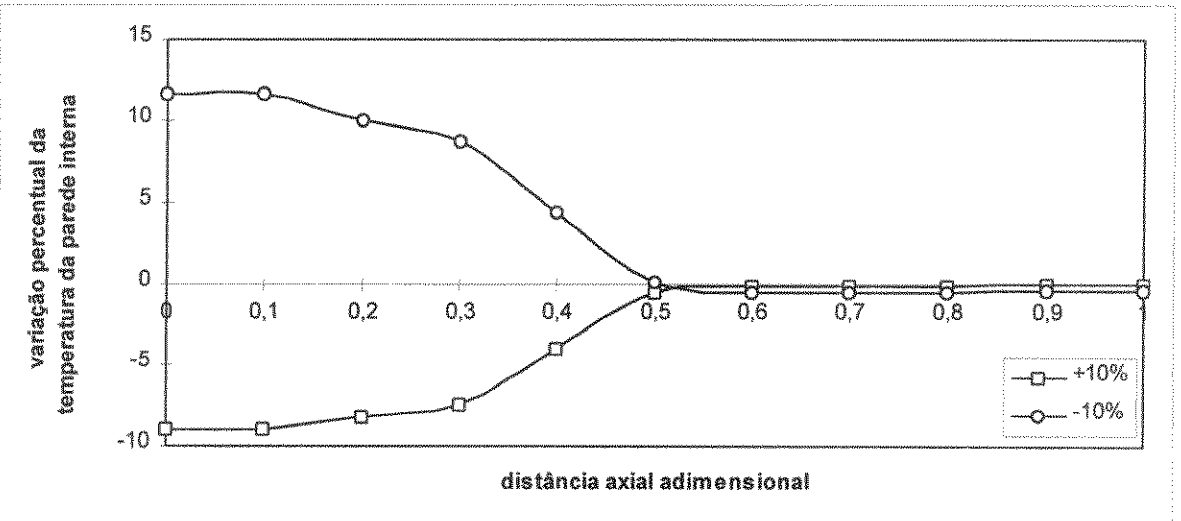


Figura 4.22: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

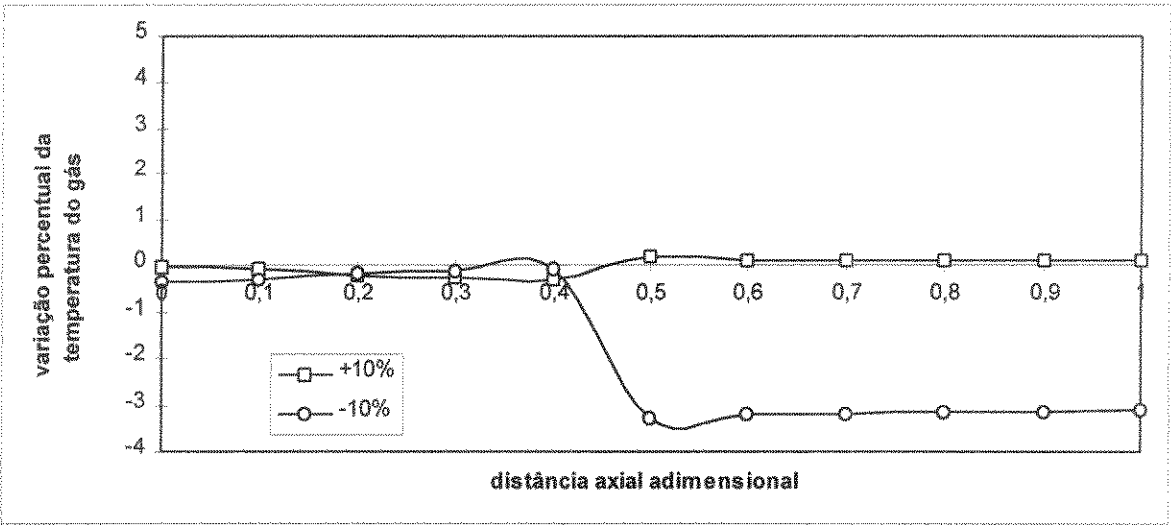


Figura 4.23: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão secundária.

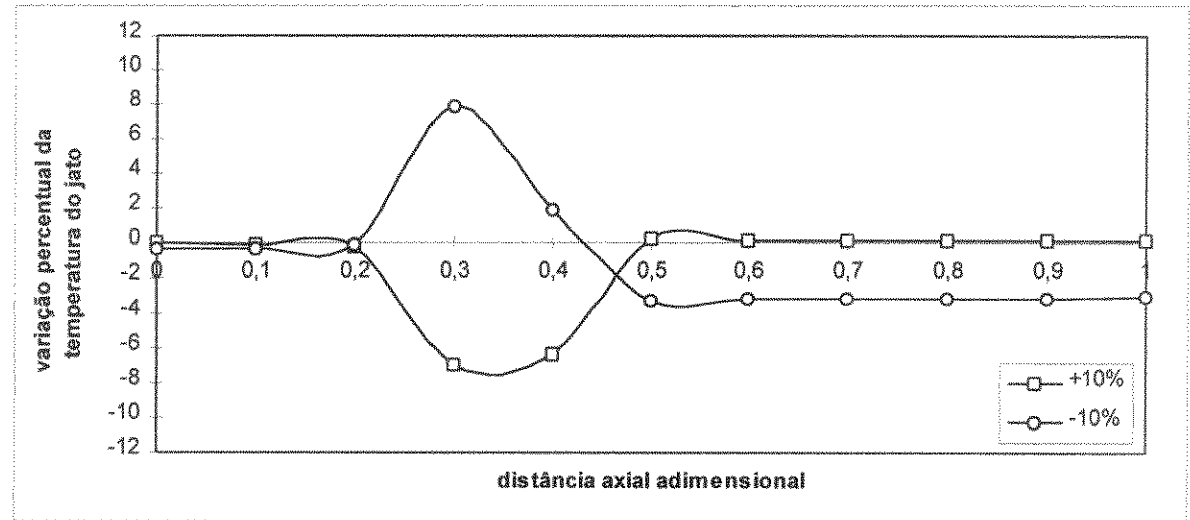


Figura 4.24: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão secundária.

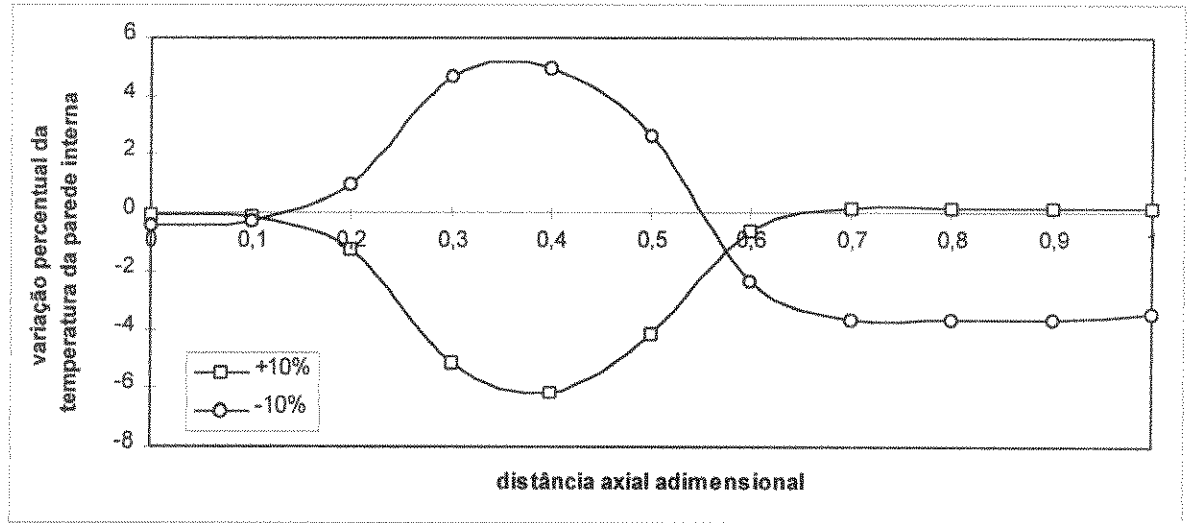


Figura 4.25: Efeito das variações de 10% na capacidade calorífica do jato sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão secundária.

c) Efeitos das variações de 10% na Condutividade termica do refratário

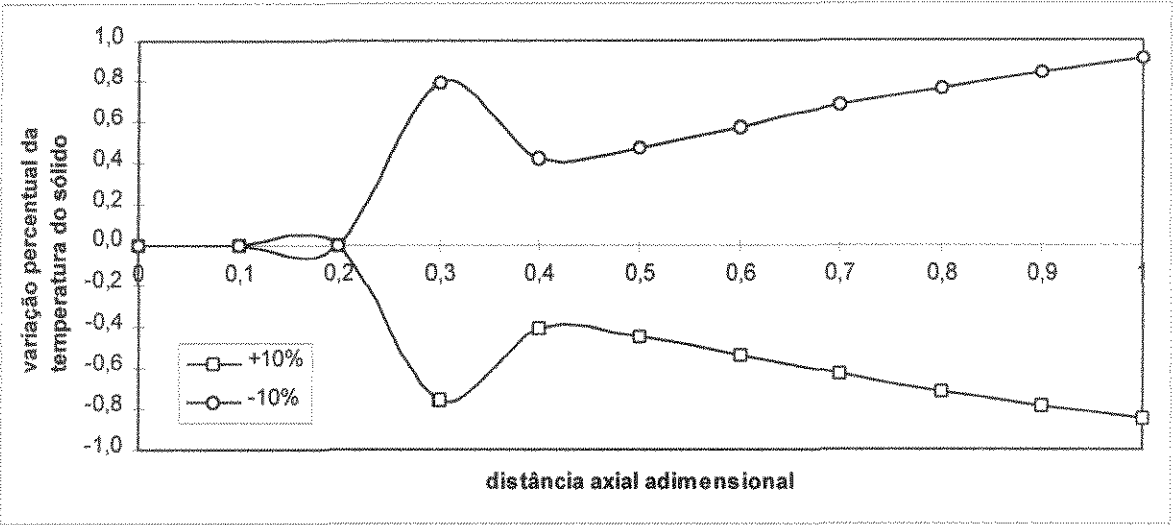


Figura 4.26: Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

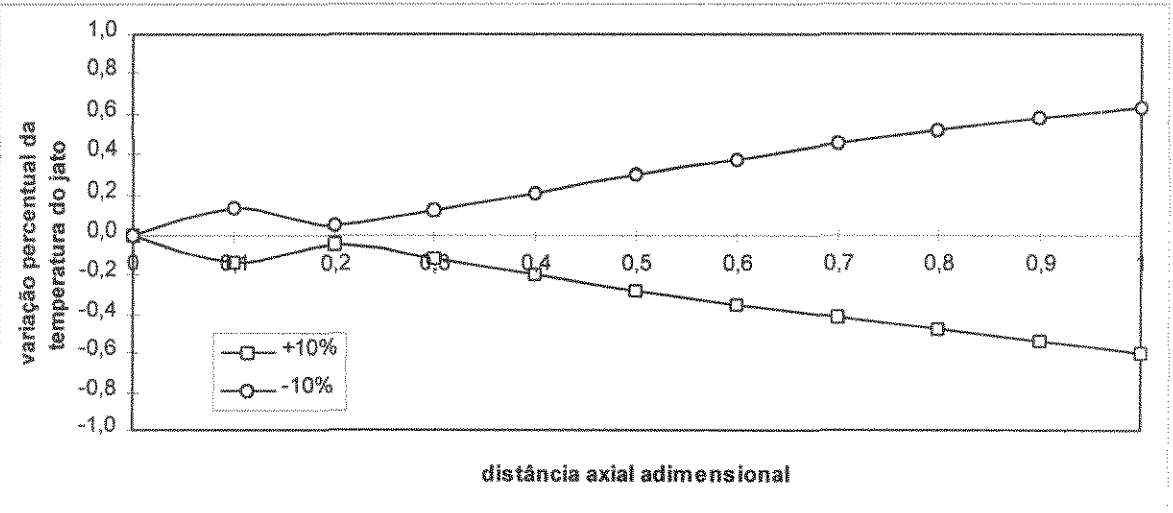


Figura 4.27: Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

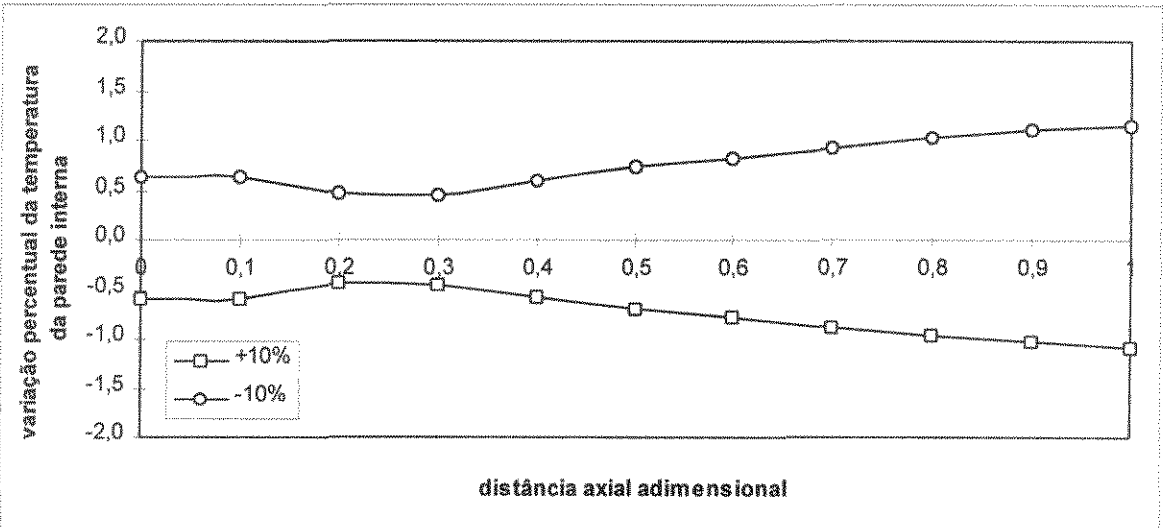


Figura 4.28: Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura da mesma da câmara de combustão primária.

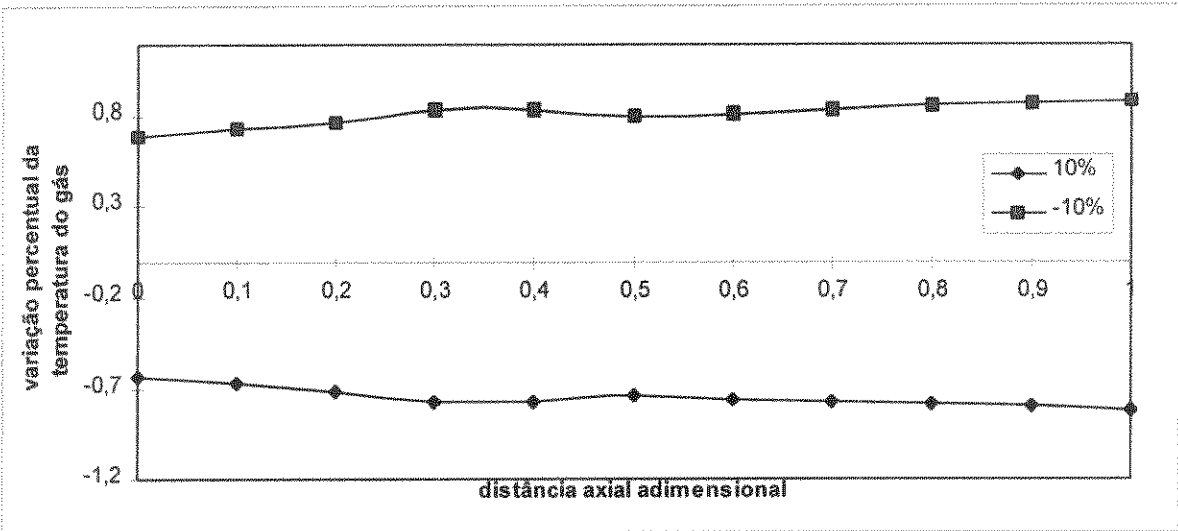


Figura 4.29: Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do gás câmara de combustão secundária.

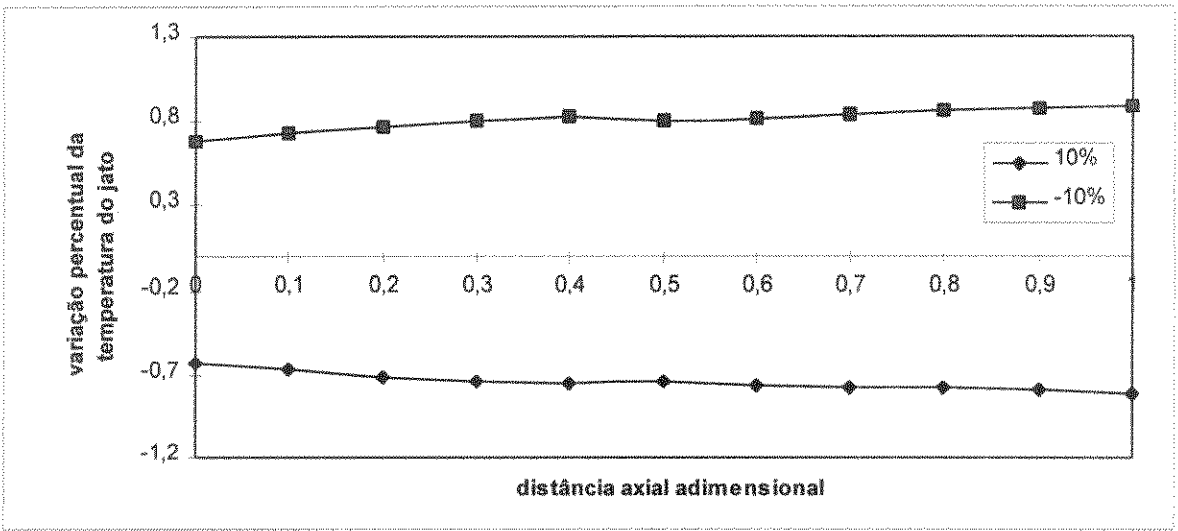


Figura 4.30: Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura do jato na câmara de combustão secundária.

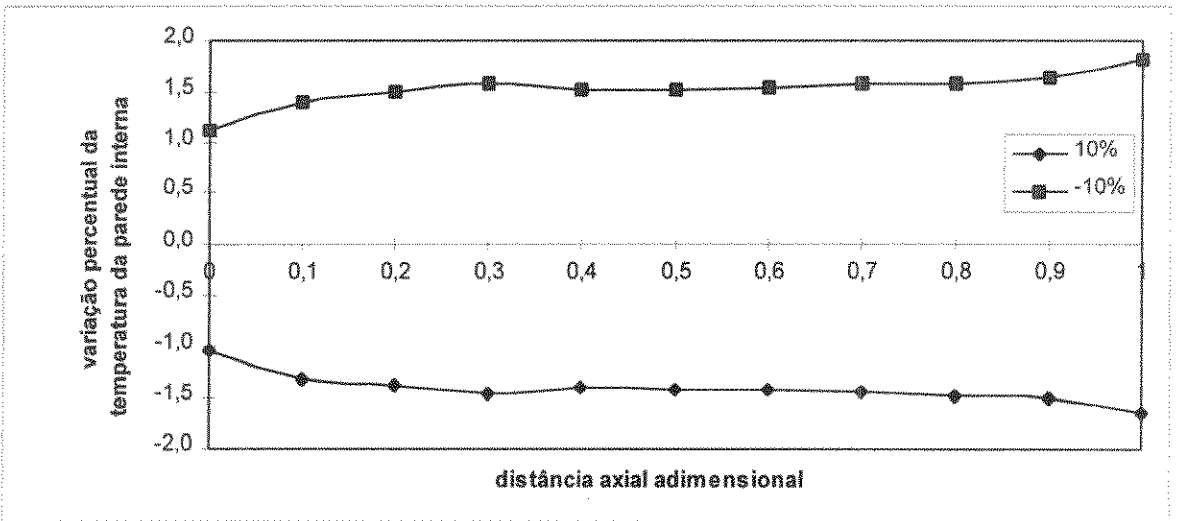


Figura 4.31: Efeito das variações de 10% na condutividade térmica da parede sobre a temperatura da mesma da câmara de combustão secundária.

d) Efeitos das variações de 10% na emissividade do sólido

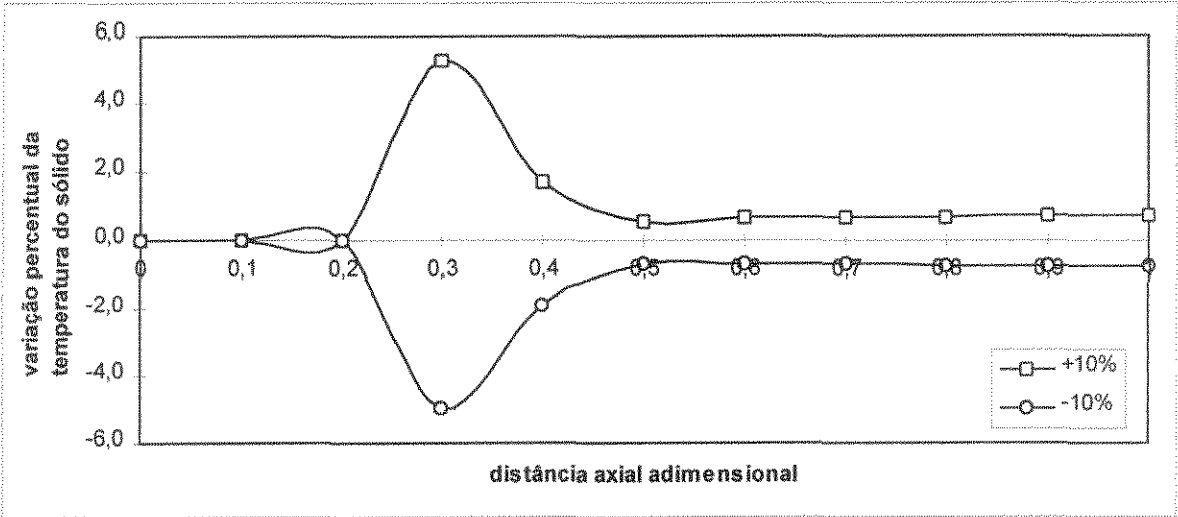


Figura 4.32: Efeito das variações de 10% na emissividade do sólido sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão primária.

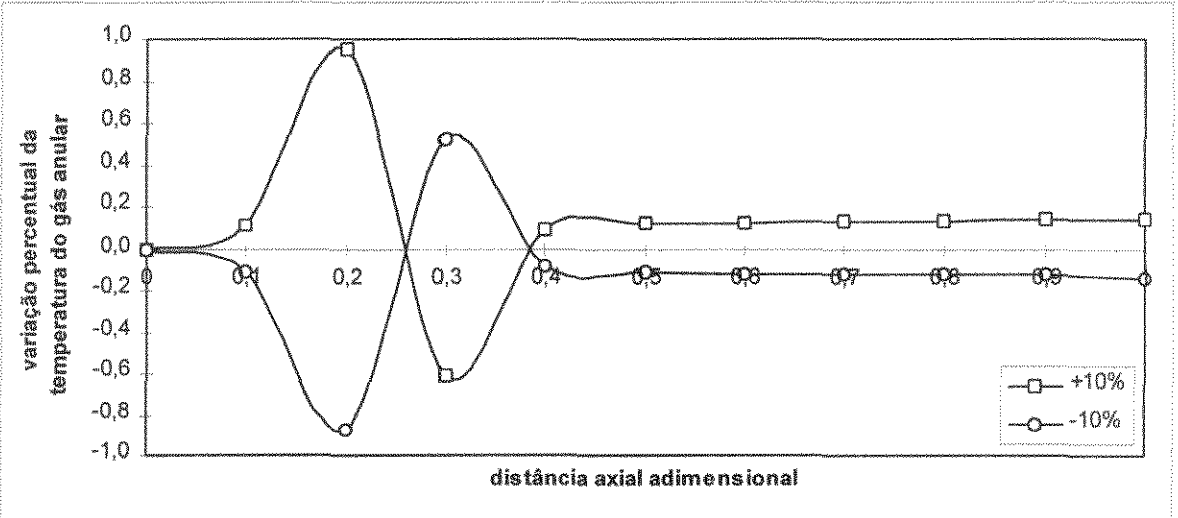


Figura 4.33: Efeito das variações de 10% na emissividade do sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

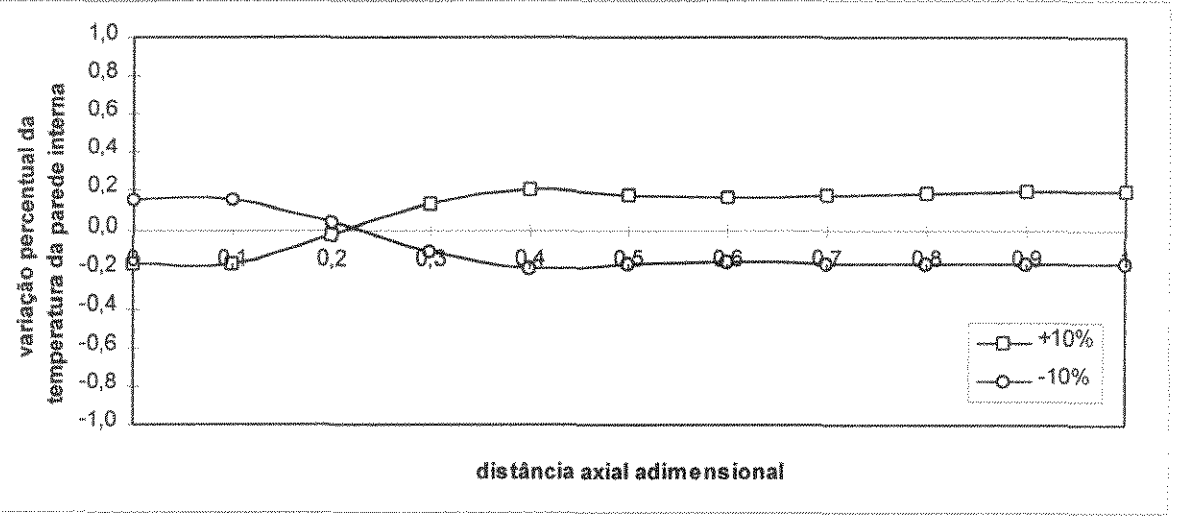


Figura 4.34: Efeito das variações de 10% na emissividade do sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

e) Efeitos das variações de 10% na emissividade da parede externa:

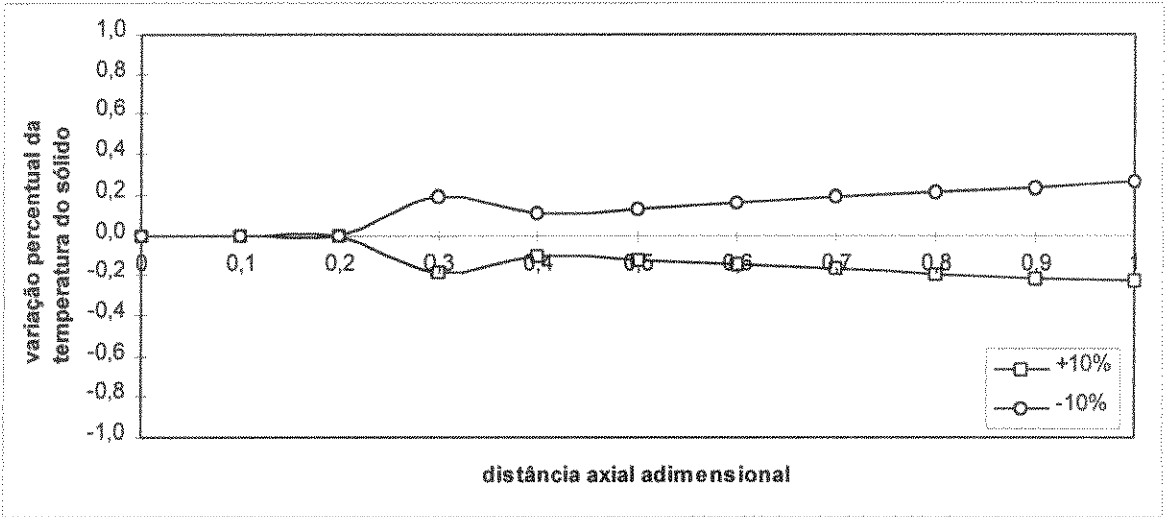


Figura 4.35: Efeito das variações de 10% na emissividade da parede externa sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

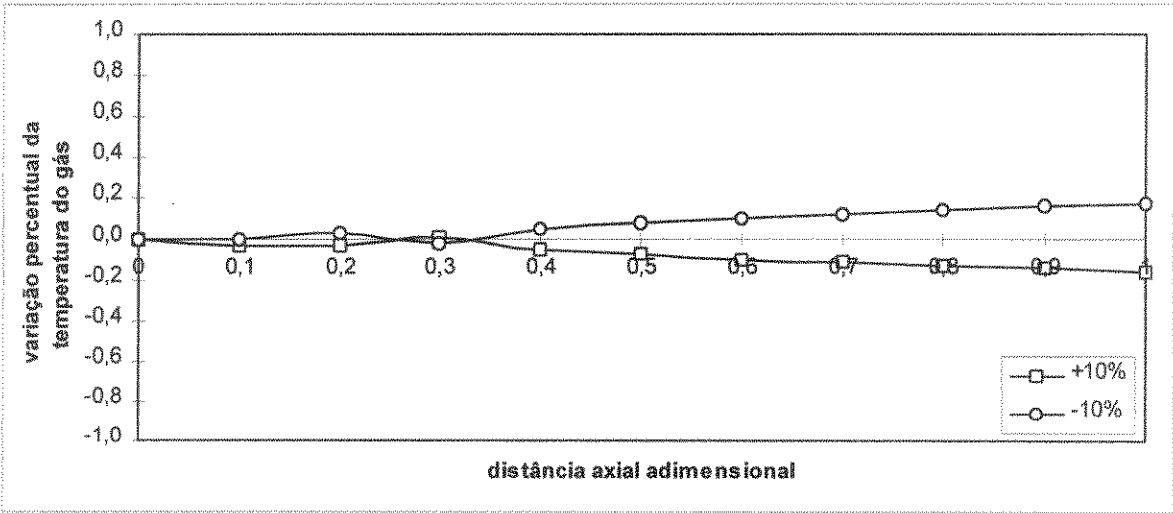


Figura 4.36: Efeito das variações de 10% na emissividade da parede externa sobre a temperatura do gás na câmara de combustão primária.

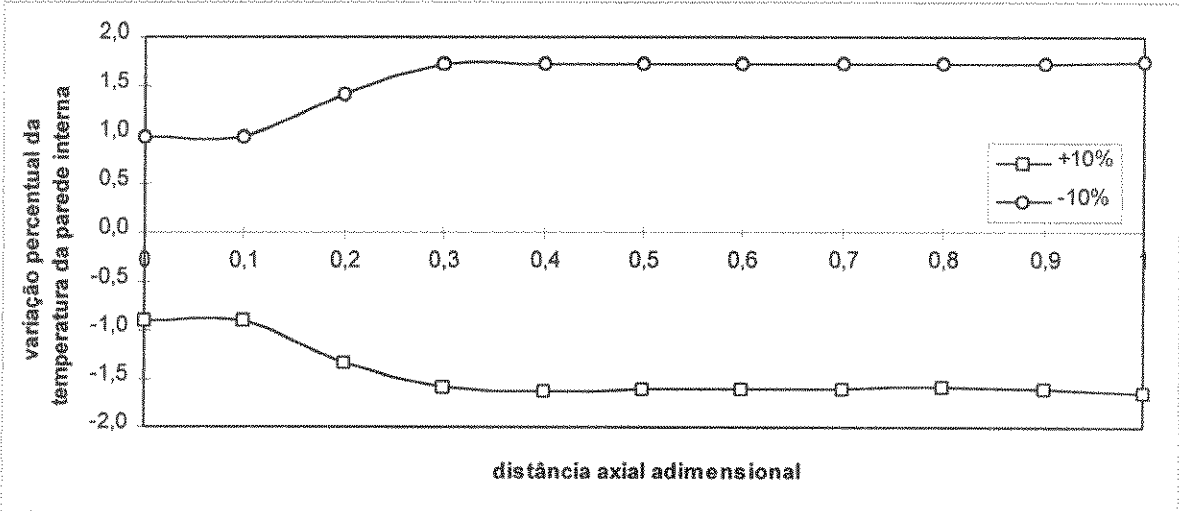


Figura 4.37: Efeito das variações de 10% na emissividade da parede externa sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

f) Efeitos das variações de 10% na emissividade da parede interna

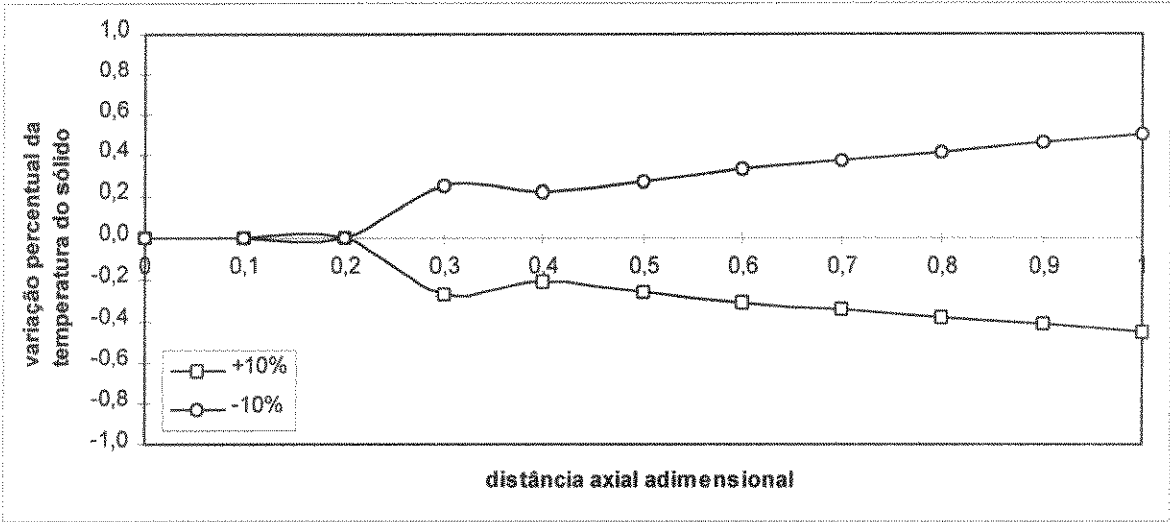


Figura 4.38: Efeito das variações de 10% na emissividade da parede interna sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

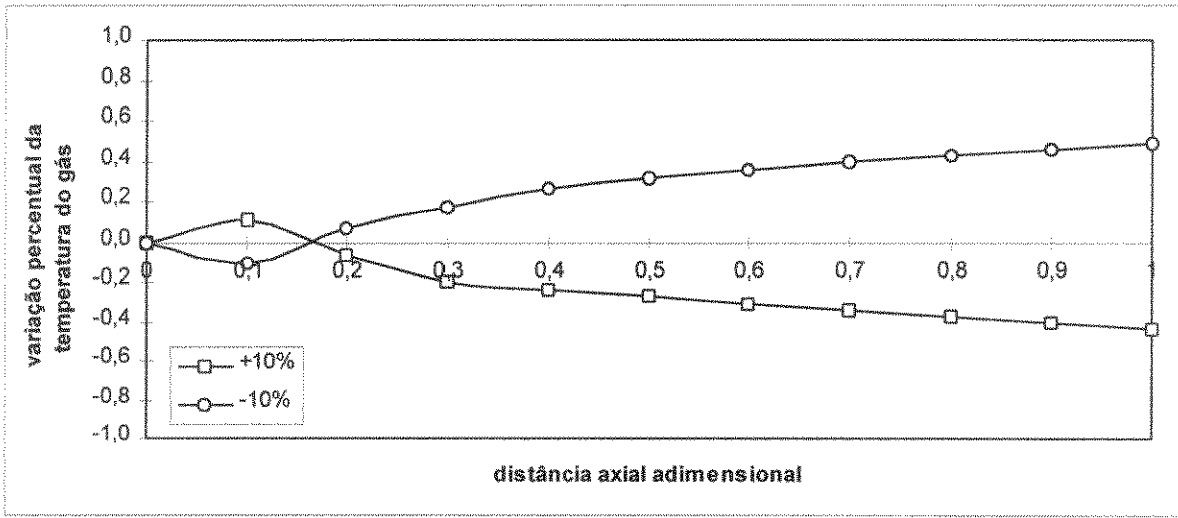


Figura 4.39: Efeito das variações de 10% na emissividade da parede interna sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

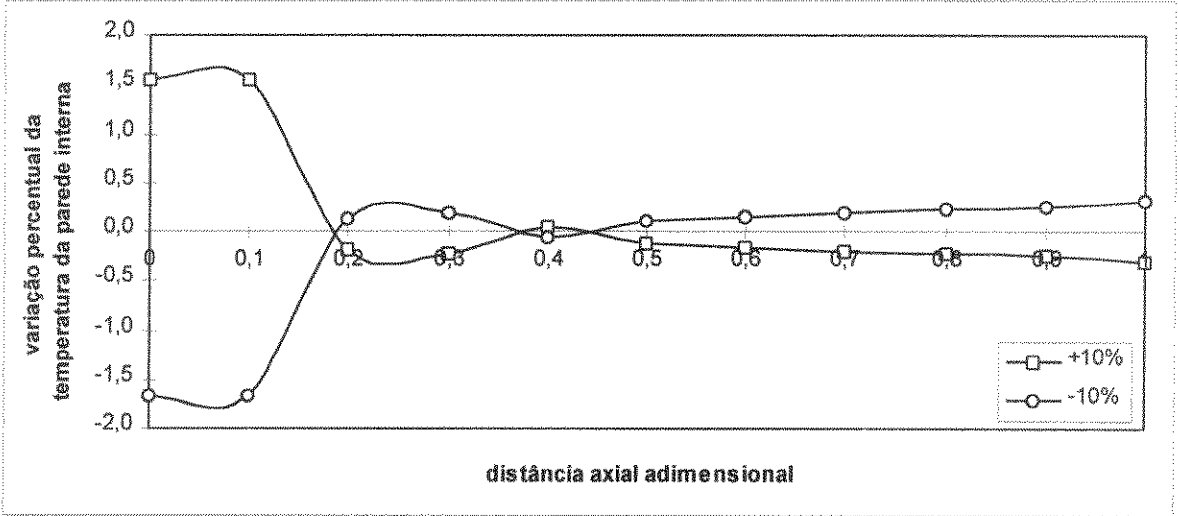


Figura 4.40: Efeito das variações de 10% na emissividade da parede interna sobre a temperatura da mesma da câmara de combustão primária.

g) Efeitos das variações de 10% na emissividade da chama

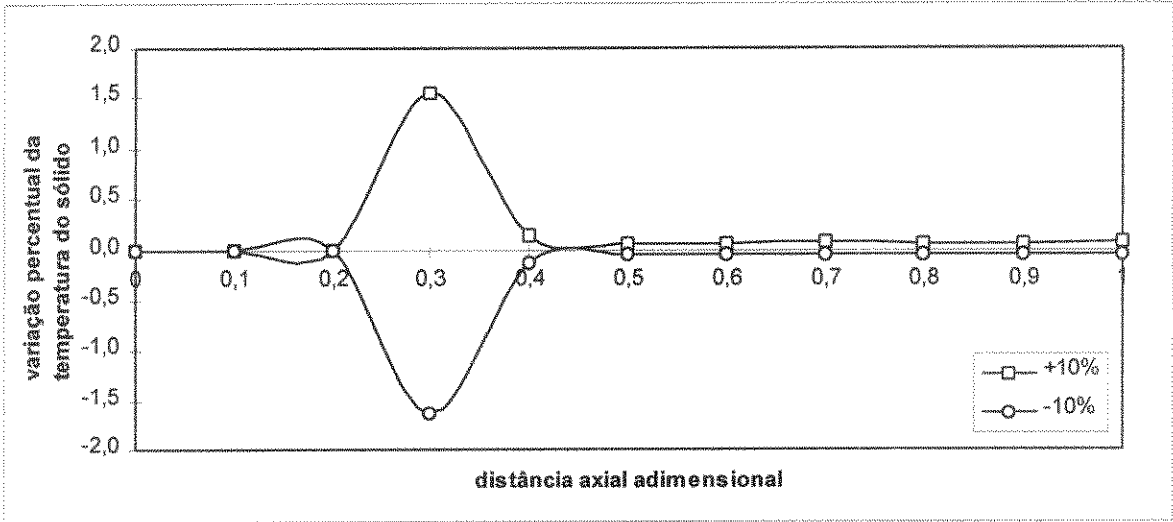


Figura 4.41: Efeito das variações de 10% na emissividade da chama sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

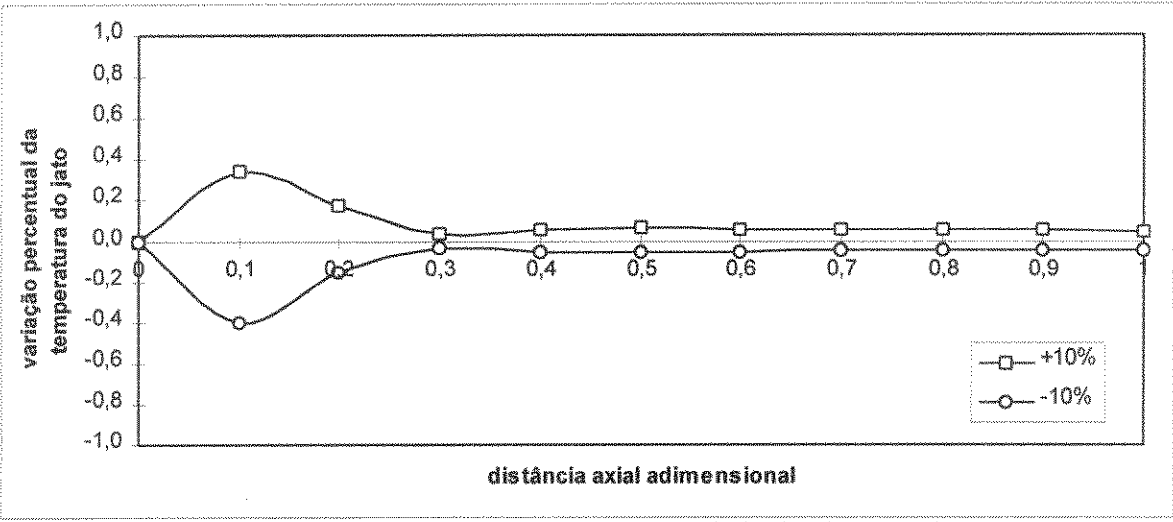


Figura 4.42: Efeito das variações de 10% na emissividade da chama sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

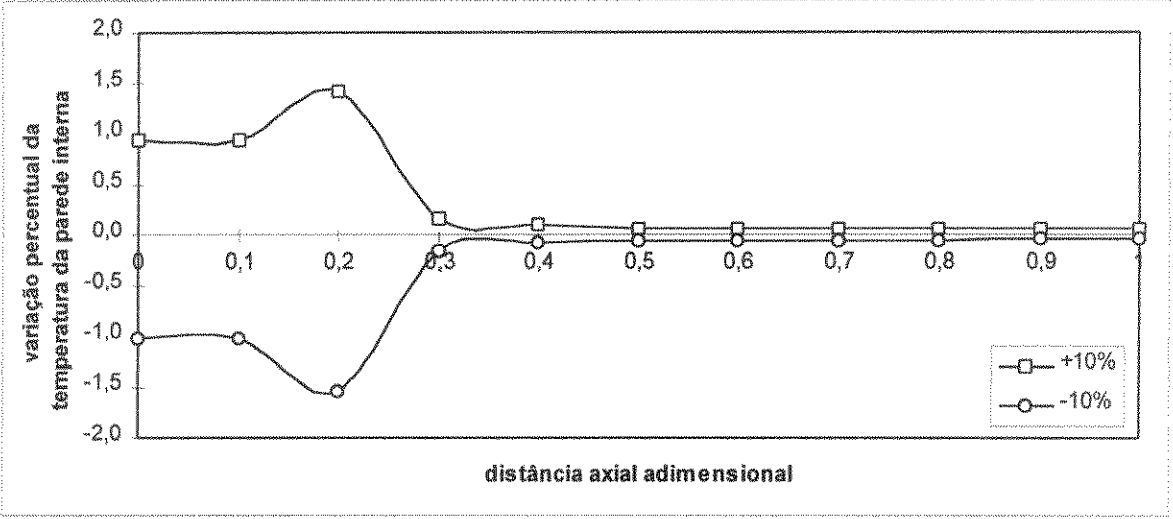


Figura 4.43: Efeito das variações de 10% na emissividade da chama sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

h) Efeitos das variações de 10% na emissividade do gás

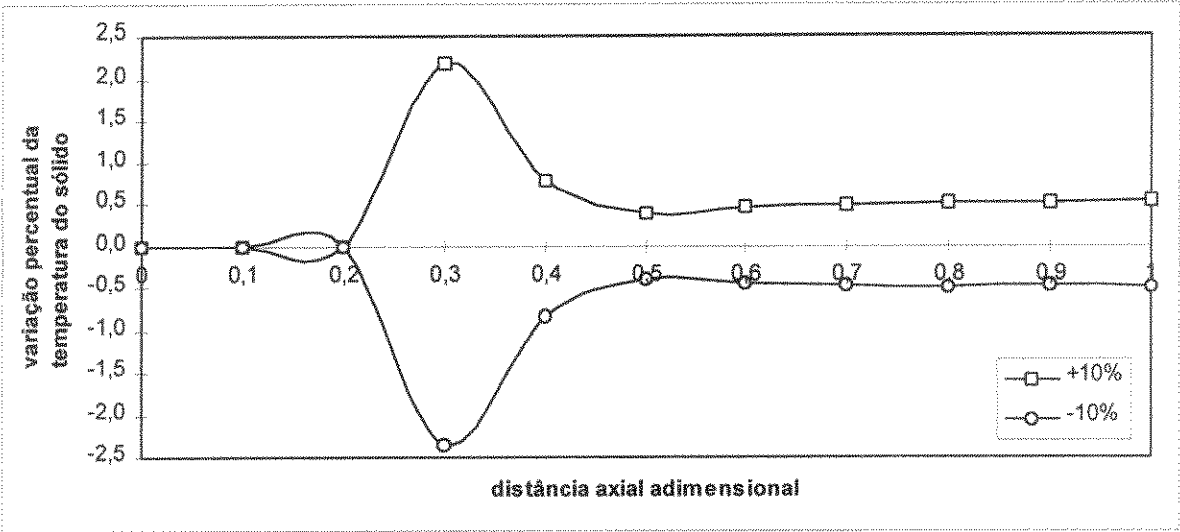


Figura 4.44: Efeito das variações de 10% na emissividade do gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

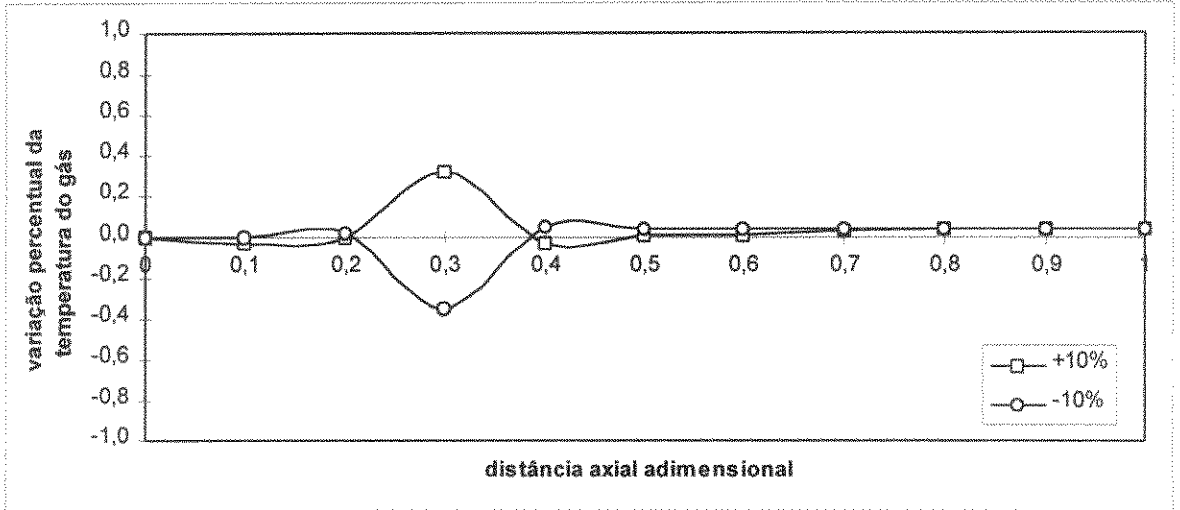


Figura 4.45: Efeito das variações de 10% na emissividade gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

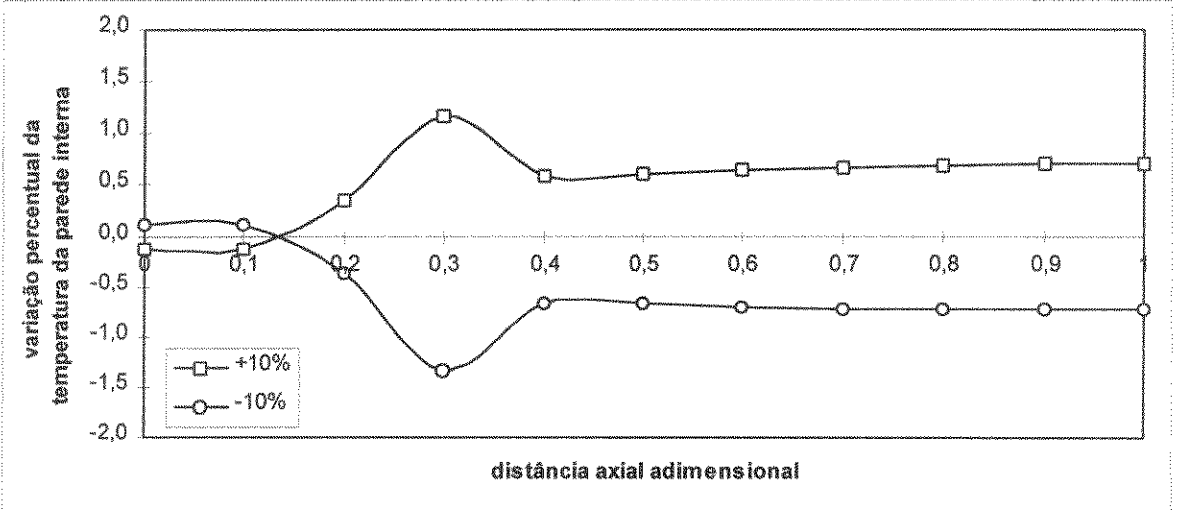


Figura 4.46: Efeito das variações de 10% na emissividade gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

i) Efeitos das variações de 10% na transmissividade do gás

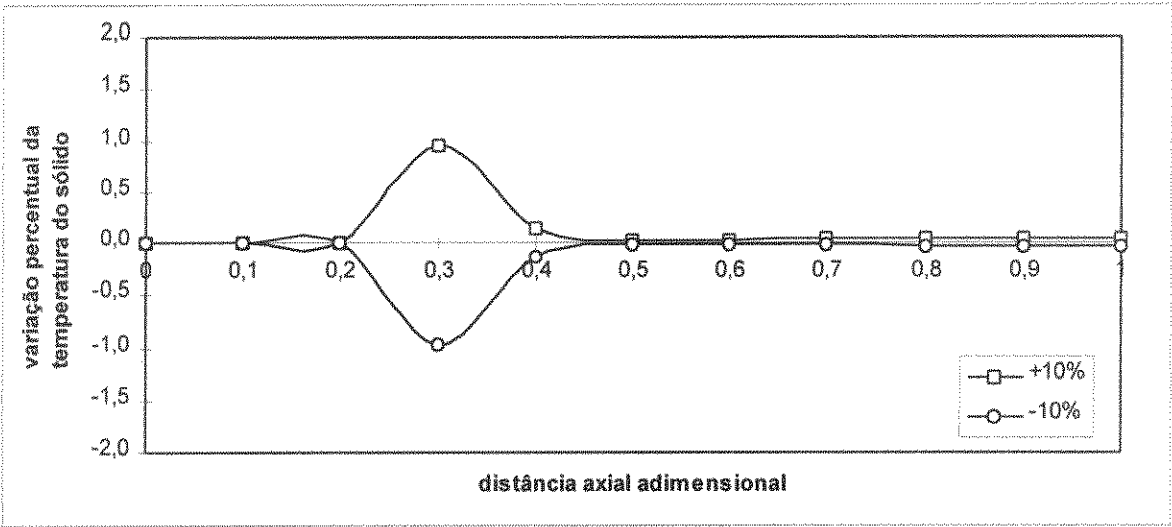


Figura 4.47: Efeito das variações de 10% na transmissividade do gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

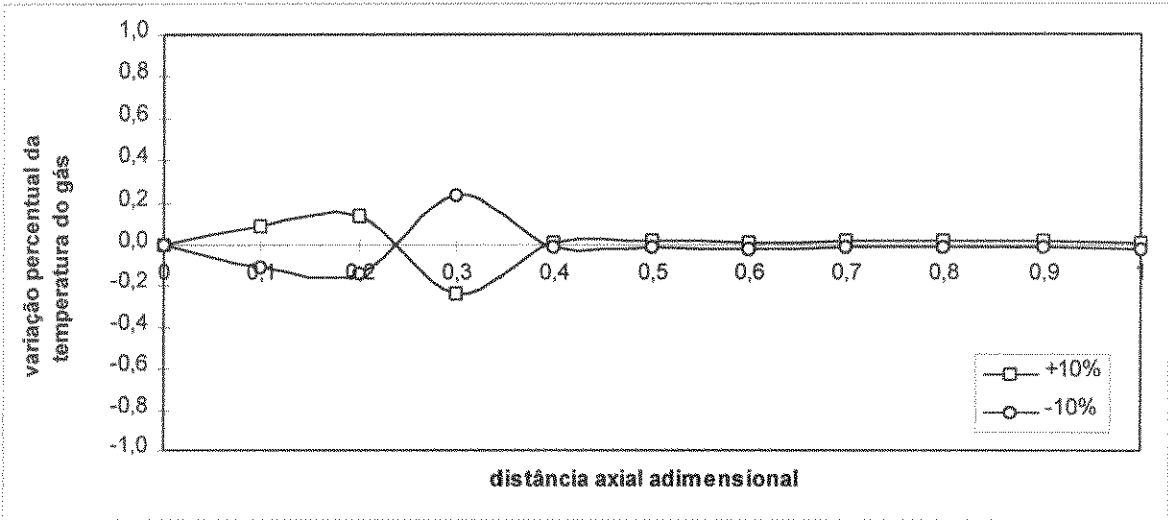


Figura 4.48: Efeito das variações de 10% na transmissividade do gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

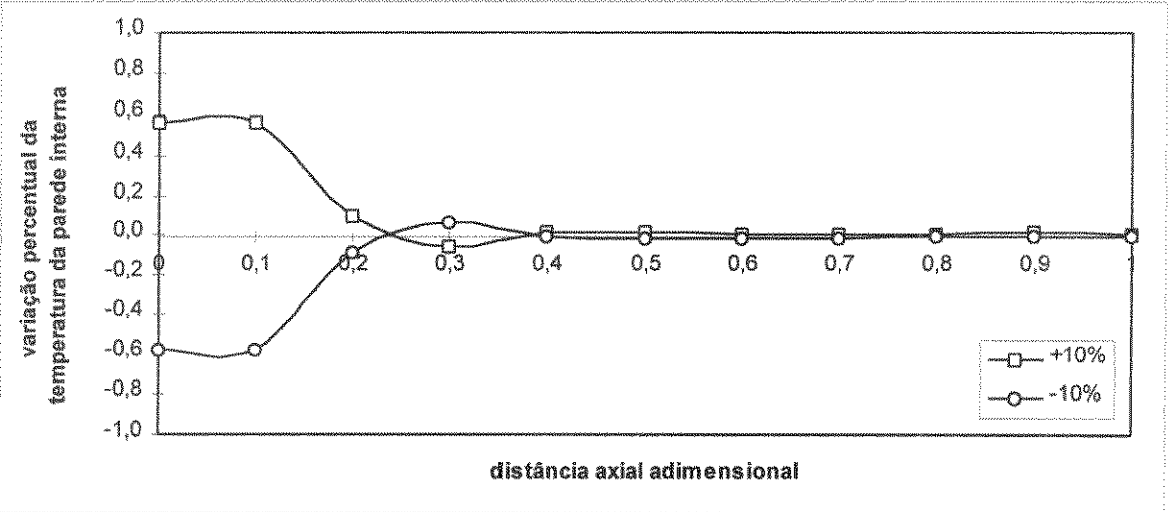


Figura 4.49: Efeito das variações de 10% na transmissividade do gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

j) Efeitos das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede interna e o sólido

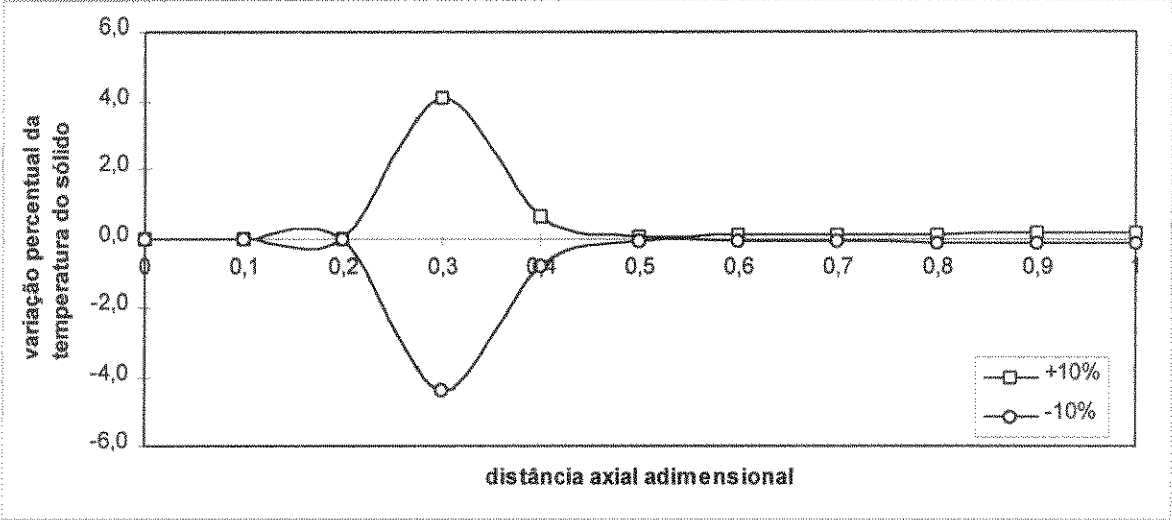


Figura 4.50: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-sólido sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

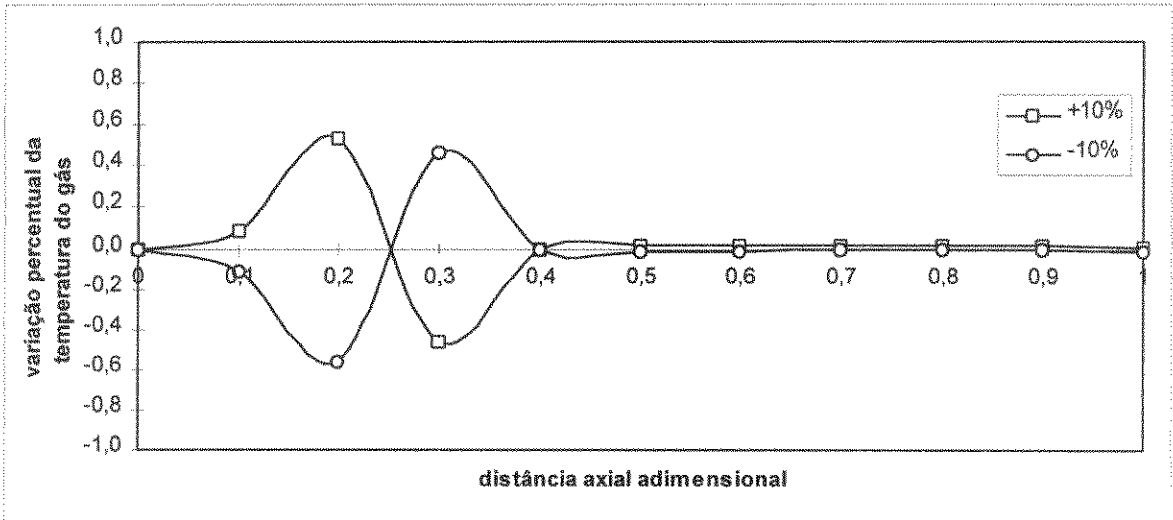


Figura 4.51: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

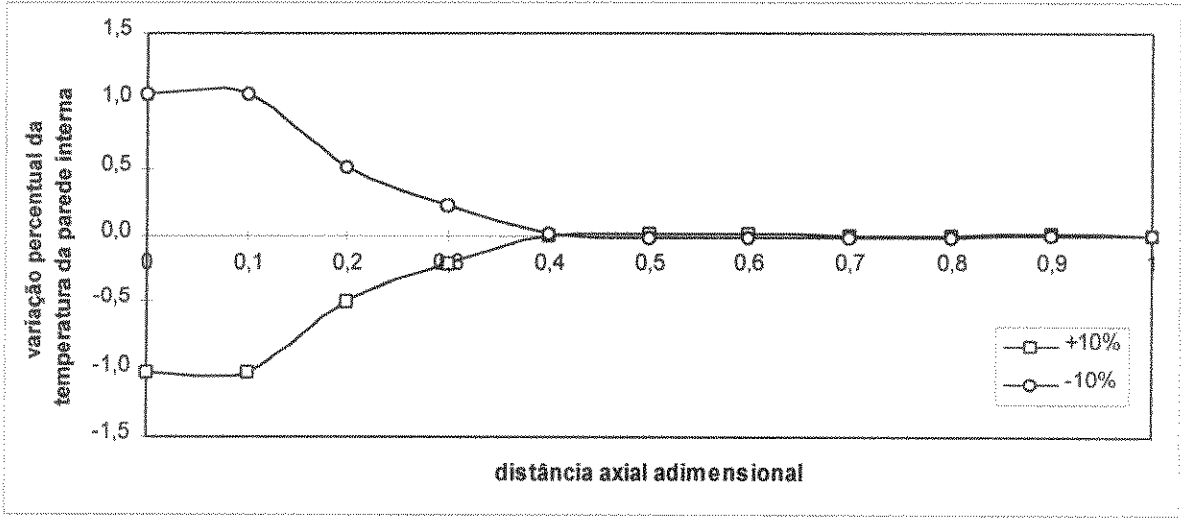


Figura 4.52: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

k) Efeitos das variações de 10% na coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede interna e o gás

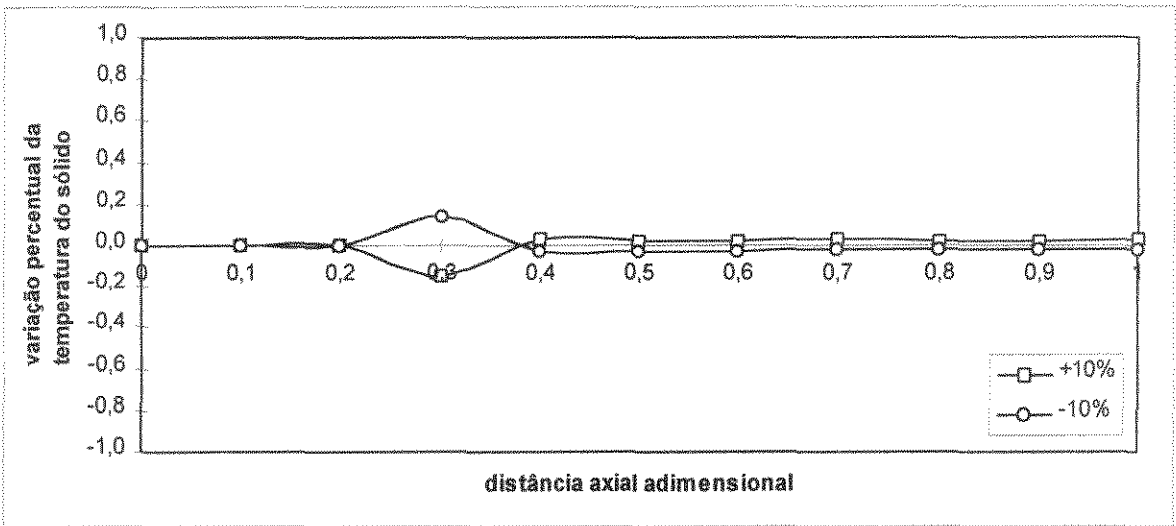


Figura 4.53: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-gás sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

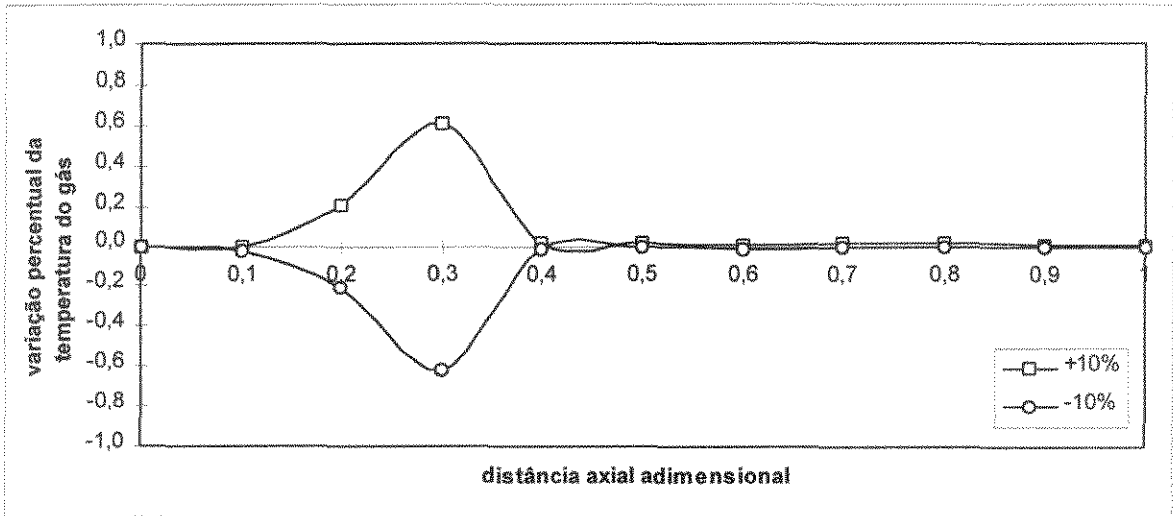


Figura 4.54: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-gás sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

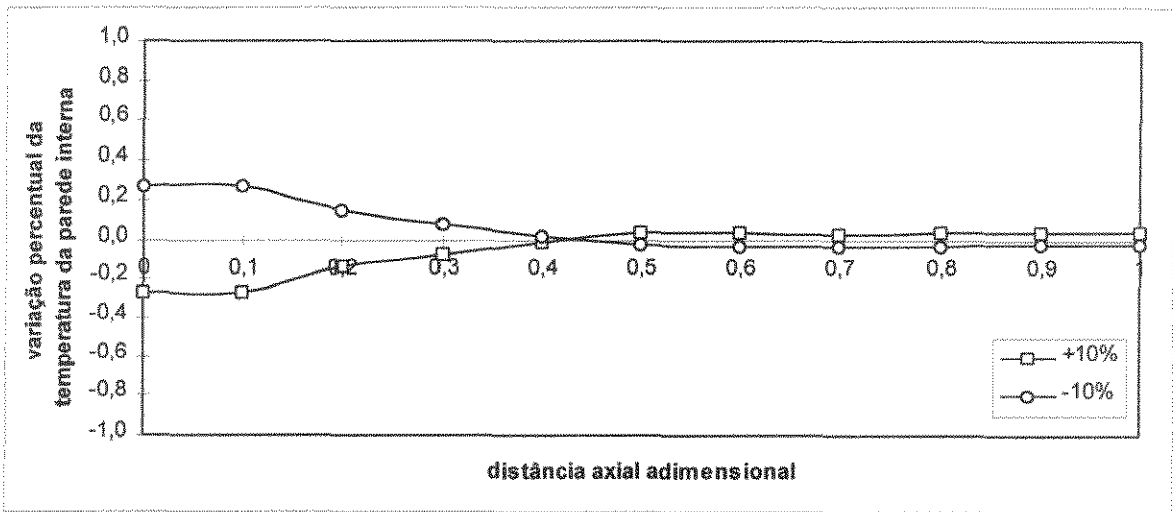


Figura 4.55: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede interna-gás sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

l) Efeitos das variações de 10% na coeficiente de transferência de calor convectivo entre o gás e o sólido

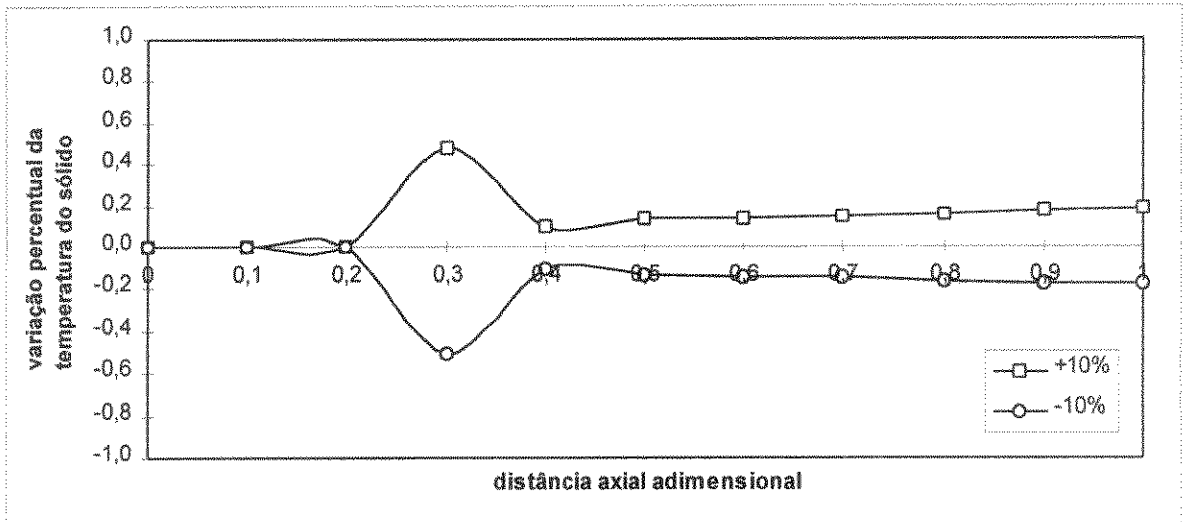


Figura 4.56: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo gás-sólido sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

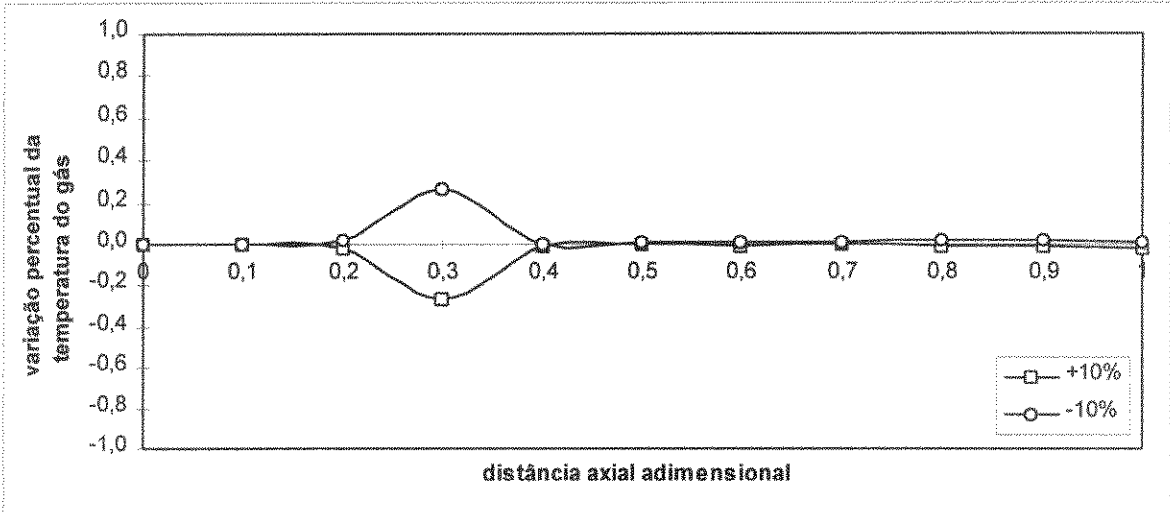


Figura 4.57: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo gás-sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

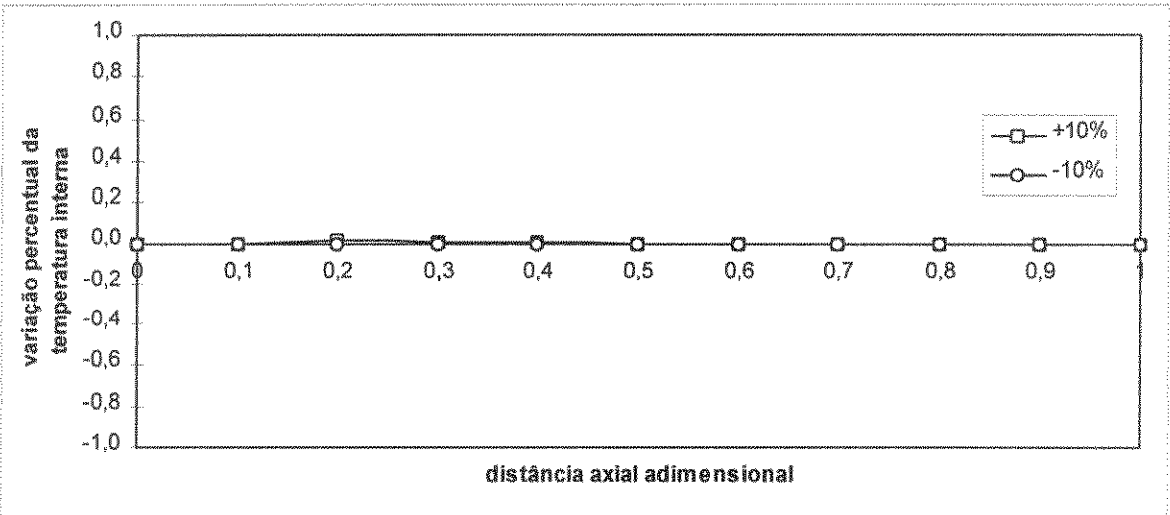


Figura 4.58: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo gás-sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

m) Efeitos das variações de 10% na coeficiente de transferência de calor convectivo entre a parede externa e o ambiente

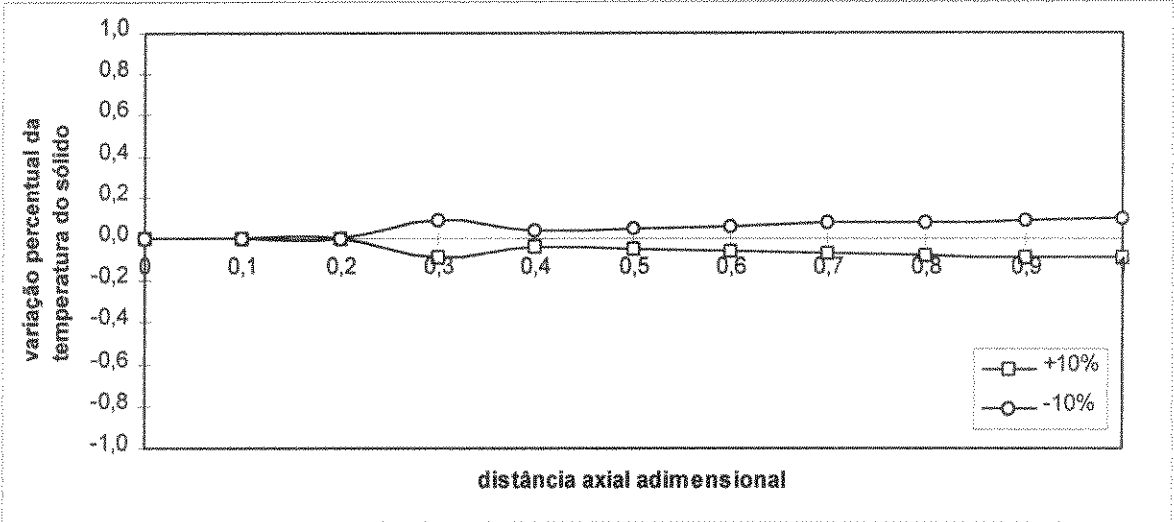


Figura 4.59: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede externa-ambiente sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

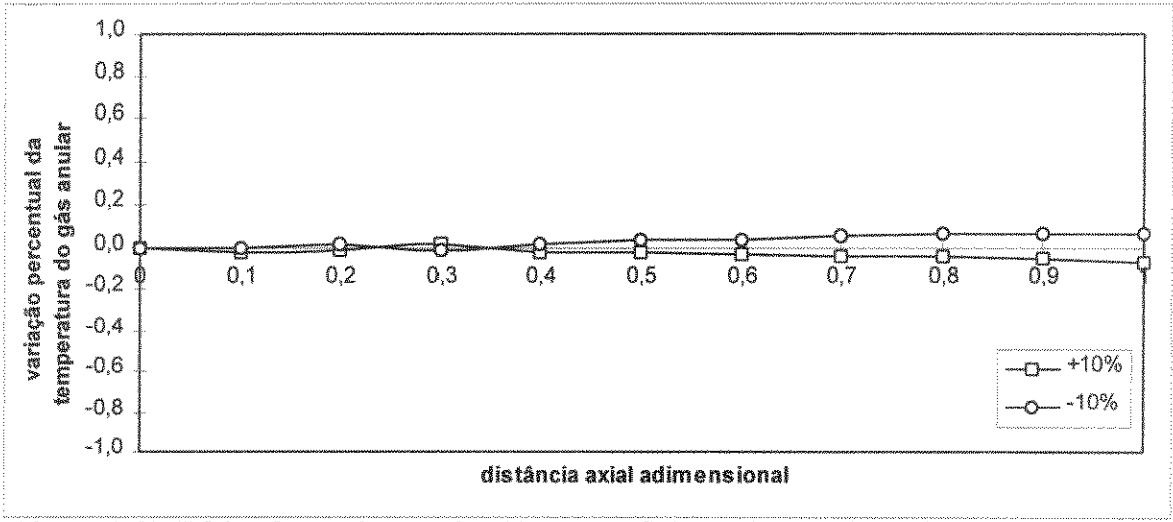


Figura 4.60: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede externa-ambiente sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

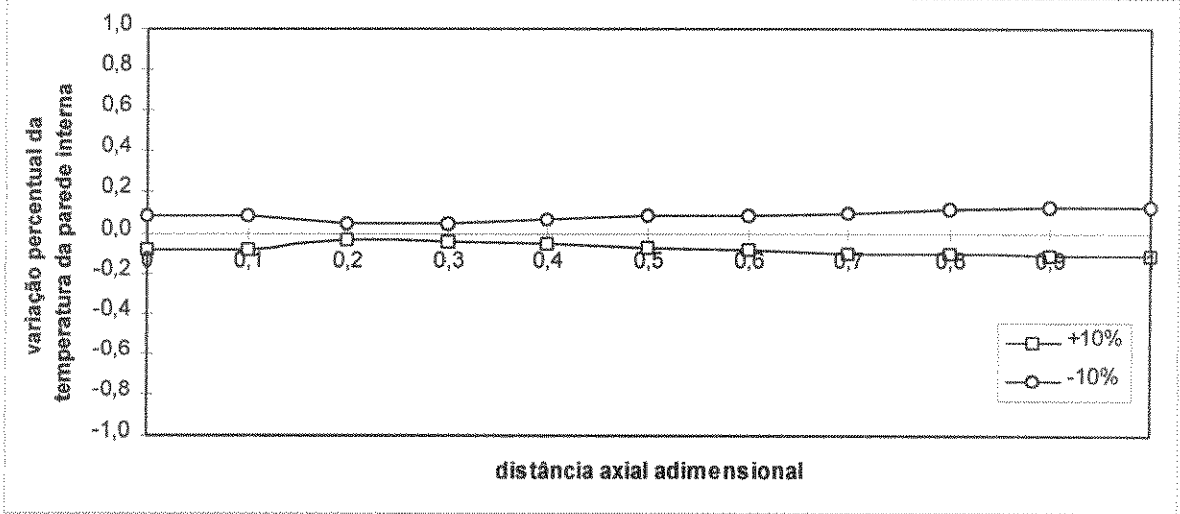


Figura 4.61: Efeito das variações de 10% no coeficiente de transferência de calor convectivo parede externa-ambiente sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

n) Efeitos das variações de 10% na tempo de residência do sólido

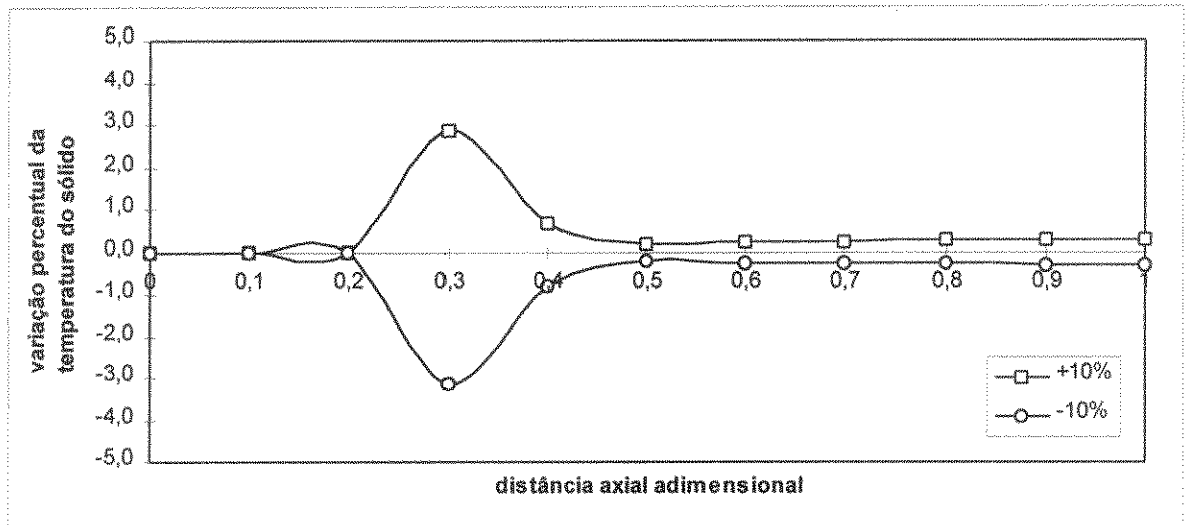


Figura 4.62: Efeito das variações de 10% no tempo de residência do sólido sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

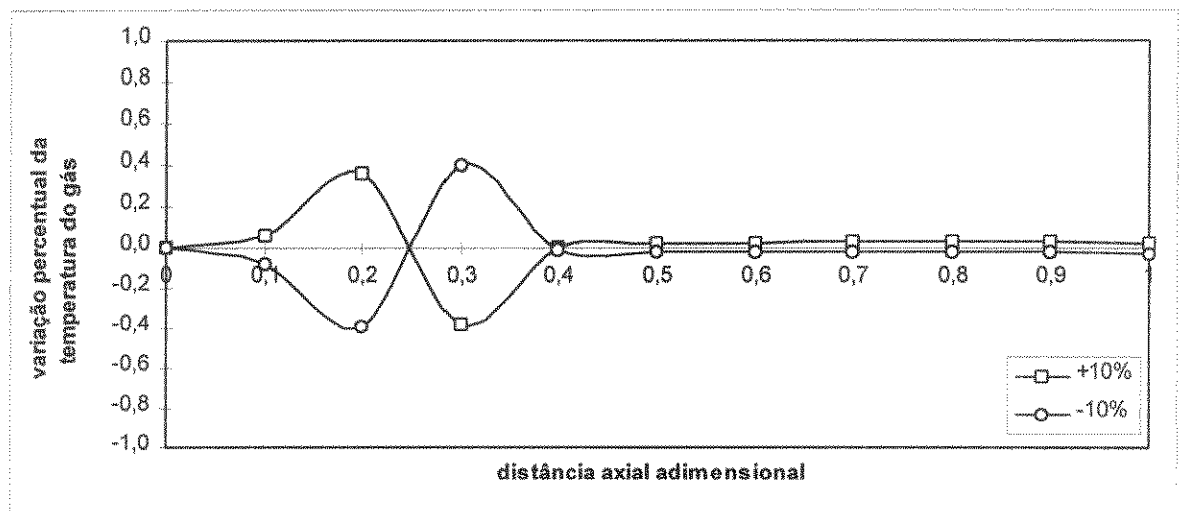


Figura 4.63: Efeito das variações de 10% no tempo de residência do sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

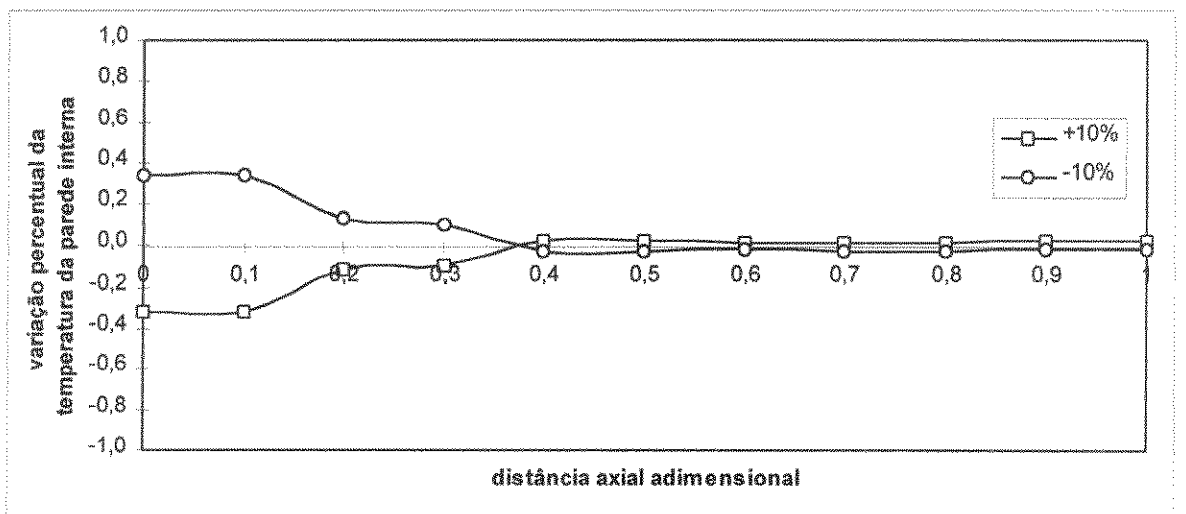


Figura 4.64: Efeito das variações de 10% no tempo de residência do sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

o) Efeitos das variações de 10% para os demais parâmetros

Os efeitos provocados pelos demais parâmetros, ou seja, viscosidade dos gases, condutividade térmica do sólido, capacidades caloríficas do sólido seco, do resíduo líquido, das substâncias volatilizadas do resíduo e do combustível, são pouco significativos, como visto na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Variações médias percentuais das temperaturas para variações negativas e positivas de 10% dos parâmetros que apresentam efeitos pouco significativos.

parâmetros	variações médias percentuais das temperaturas									
	sólido		gás anular		jato		parede int.		parede ext.	
	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%	+10%	-10%
variações de +10% e -10%										
capac. caloríf. do combustível	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,04	-0,05	0,01	-0,02	0,01	-0,01
capac. caloríf. dos voláteis	-0,72	0,73	0,03	-0,04	0,02	-0,02	-0,02	0,03	-0,01	0,01
capac. caloríf. resíduo líquido	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
capac. caloríf. sólido seco	-0,30	0,32	-0,06	0,06	-0,06	0,06	-0,08	0,08	-0,03	0,03
condutividade térmica sólido	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
viscosidade dos gases	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	-0,02	0,03	-0,02	0,02

4.4. Resultados para variações de 50% nos parâmetros selecionados

As tabelas 4.4. à 4.7. contêm os dados das variações percentuais das temperaturas para a última seção transversal e para a seção na região da chama da câmara primária, que representam os efeitos das variações positivas e negativas de 50% nos coeficientes de transferência de calor convectivo gás-sólido, parede-sólido, gás-parede e parede externa-ambiente e capacidades caloríficas dos voláteis, do combustível e do resíduo líquido. Estes parâmetros apresentam-se com graus de incertezas significativos nas suas determinações, seja pela indisponibilidade na literatura de correlações matemática para predição nas condições exigidas, como no caso dos coeficientes convectivos, ou pela variabilidade, heterogeneidade, ou mesmo desconhecimento das propriedades, como nos casos das capacidades caloríficas dos voláteis e do resíduo líquido.

Analisando-se estes dados, pode-se verificar que as temperaturas dos gases na última seção da câmara primária, para variações positivas e negativas de 50% nos parâmetros não foram superiores a 0,35%. Significa dizer que, apesar dos graus de incertezas consideráveis dos parâmetros estudados neste item, estes influenciam pouco nos resultados finais da simulação, principalmente em relação às variáveis mais importantes.

Tabela 4.4: Efeitos das variações positivas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.

variações percentuais das temperaturas na última seção da câmara primária					
variações positivas de 50% nos parâmetros					
parâmetros	sólido	gás	jato	parede interna	parede externa
coef. transf. calor convec. gás-sólido	0,83	-0,05	-0,05	0,00	0,00
coef. transf. calor convec. parede-sólido	0,66	0,05	0,05	0,01	-0,02
coef. transf. calor convec. gás-parede	0,11	0,04	0,04	0,18	0,08
coef. transf. calor convec. externo	-0,45	-0,32	-0,32	-0,58	-2,95
capacidade calorífica dos voláteis	-5,46	0,24	0,24	-0,08	-0,12
capacidade calorífica do combustível	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02
capacidade calorífica do resíduo líquido	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabela 4.5: Efeitos das variações negativas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.

variações percentuais das temperaturas na última seção da câmara primária					
variações negativas de 50% nos parâmetros					
parâmetros	sólido	gás	jato	parede interna	parede externa
coef. transf. calor convec. gás-sólido	-0,98	0,05	0,05	0,01	-0,02
coef. transf. calor convec. parede-sólido	-0,99	-0,12	-0,12	-0,04	0,00
coef. transf. calor convec. gás-parede	-0,10	-0,05	-0,05	-0,19	-0,08
coef. transf. calor convec. externo	0,51	0,35	0,35	0,65	3,30
capacidade calorífica dos voláteis	6,03	-0,29	-0,29	0,08	0,12
capacidade calorífica do combustível	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,02
capacidade calorífica do resíduo líquido	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00

Tabela 4.6: Efeitos das variações positivas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas na região da chama na câmara de combustão primária.

variações percentuais das temperaturas na região da chama na câmara primária					
variações positivas de 50% dos parâmetros					
parâmetros	sólido	gás	jato	parede interna	parede externa
coef. transf. calor convec. gás-sólido	2,30	-1,28	0,00	0,04	0,03
coef. transf. calor convec. parede-sólido	18,30	-2,22	-0,16	-0,89	-0,59
coef. transf. calor convec. gás-parede	-0,71	2,93	-0,04	-0,40	-0,24
coef. transf. calor convec. externo	-0,42	0,04	-0,06	-0,20	-3,08
capacidade calorífica dos voláteis	-3,72	0,81	-0,02	-0,11	-0,02
capacidade calorífica do combustível	0,23	-0,04	0,03	0,05	0,03
capacidade calorífica do resíduo líquido	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00

Tabela 4.7: Efeitos das variações negativas de 50% nos parâmetros sobre as temperaturas na região da chama na câmara de combustão primária.

variações percentuais das temperaturas na região da chama na câmara primária					
variações negativas de 50% nos parâmetros					
parâmetros	sólido	gás	jato	parede interna	parede externa
coef. transf. calor convec. gás-sólido	-2,67	1,47	-0,01	-0,05	-0,02
coef. transf. calor convec. parede-sólido	-24,85	1,95	0,21	1,30	0,80
coef. transf. calor convec. gás-parede	0,74	-3,24	0,04	0,44	0,26
coef. transf. calor convec. externo	0,48	-0,06	0,07	0,22	3,49
capacidade calorífica dos voláteis	4,00	-0,79	0,02	0,12	0,03
capacidade calorífica do combustível	-0,31	0,04	-0,05	-0,06	-0,02
capacidade calorífica do resíduo líquido	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00

4.5. Influências do raio da chama e das taxas de entrada de gás na chama e de redução de massa do sólido sobre as distribuições de temperaturas.

Além do estudo da influência dos parâmetros selecionados no item anterior, estuda-se também as influências de várias formas de aproximações para a geometria da chama e para as curvas de taxas de entrada de gás na chama e de redução de massa de sólido. Para cada uma dessas variáveis, propõe-se o estudo e análise dos resultados para sete conjuntos de dados, sendo que um deles é tomado como referência. Estes conjuntos de dados foram selecionados de forma que ficassem uniformemente distribuídos dentro do universo de possibilidades.

Estes conjuntos de dados são apresentados na forma de tabelas (tabelas 4.8, 4.9 e 4.10) e de gráficos (figuras 4.65, 4.66 e 4.67). Os dados são adimensionais e relacionam-se com a variável propriamente dita da seguinte maneira:

variável :	variável adimensional :
raio da chama	fração do raio interno da câmara
taxa de entrada de gás na chama	fração da vazão de ar secundário alimentado na câmara
taxa de redução de massa de sólido	fração da vazão de sólido alimentado na câmara

A simulação de referência, apresentada no item 4.2, emprega os conjuntos de dados identificados nas tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 e nas figuras 4.65, 4.66 e 4.67 pelo índice “1”. Os conjuntos de dados identificados pelos índices de 2 a 7 representam as variações para as quais analisa-se os efeitos sobre as distribuições de temperaturas.

Tabela 4.8: Conjuntos de dados que representam aproximações das várias geometrias possíveis da chama.

distância axial intervalo	raio da chama (fração do raio interno)						
	conjunto de dados						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0 a 0,1	0,600	0,400	0,200	0,400	0,500	0,600	0,700
0,1 a 0,2	0,800	0,600	0,500	0,400	0,500	0,600	0,700
0,2 a 0,3	0,900	0,800	0,750	0,400	0,500	0,600	0,700
0,3 a 1,0	0,950	0,950	0,950	0,400	0,500	0,600	0,700

Tabela 4.9: Conjuntos de dados de taxas de redução de massa de resíduo sólido.

distância axial intervalo	Taxa de redução de resíduos sólidos						
	conjunto de dados						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0 a 0,1	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1 a 0,2	0,100	0,000	0,000	0,000	0,167	0,167	0,040
0,2 a 0,3	0,100	0,000	0,300	0,000	0,167	0,167	0,080
0,3 a 0,4	0,100	0,240	0,270	0,143	0,167	0,167	0,150
0,4 a 0,5	0,100	0,230	0,210	0,143	0,167	0,167	0,170
0,5 a 0,6	0,100	0,210	0,150	0,143	0,112	0,167	0,190
0,6 a 0,7	0,100	0,160	0,070	0,143	0,100	0,167	0,170
0,7 a 0,8	0,100	0,090	0,000	0,143	0,080	0,000	0,110
0,8 a 0,9	0,100	0,040	0,000	0,143	0,040	0,000	0,060
0,9 a 1,0	0,100	0,030	0,000	0,142	0,000	0,000	0,030

Tabela 4.10: Conjuntos de dados de taxas de entrada de gás anular na chama.

distância axial intervalo	Taxa de entrada de gás na chama						
	conjunto de dados						
	1	2	3	4	5	6	7
0,0 a 0,1	0,85	0,75	0,65	0,65	0,60	0,55	0,40
0,1 a 0,2	0,10	0,20	0,30	0,20	0,35	0,30	0,30
0,2 a 0,3	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,10	0,20
0,3 a 0,4	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,10
0,4 a 1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

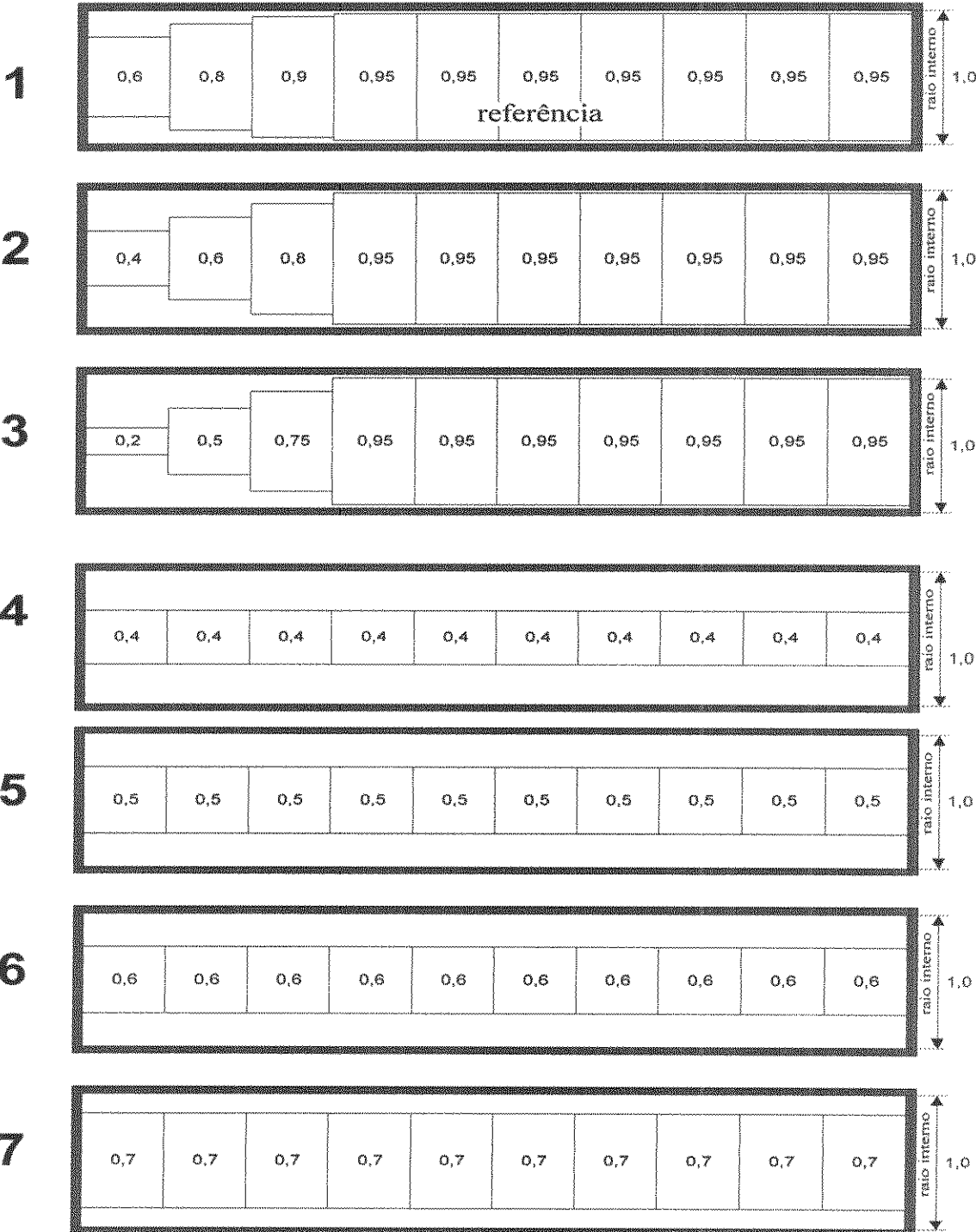


Figura 4.65: Conjuntos de dados que representam aproximações das várias geometrias possíveis da chama.

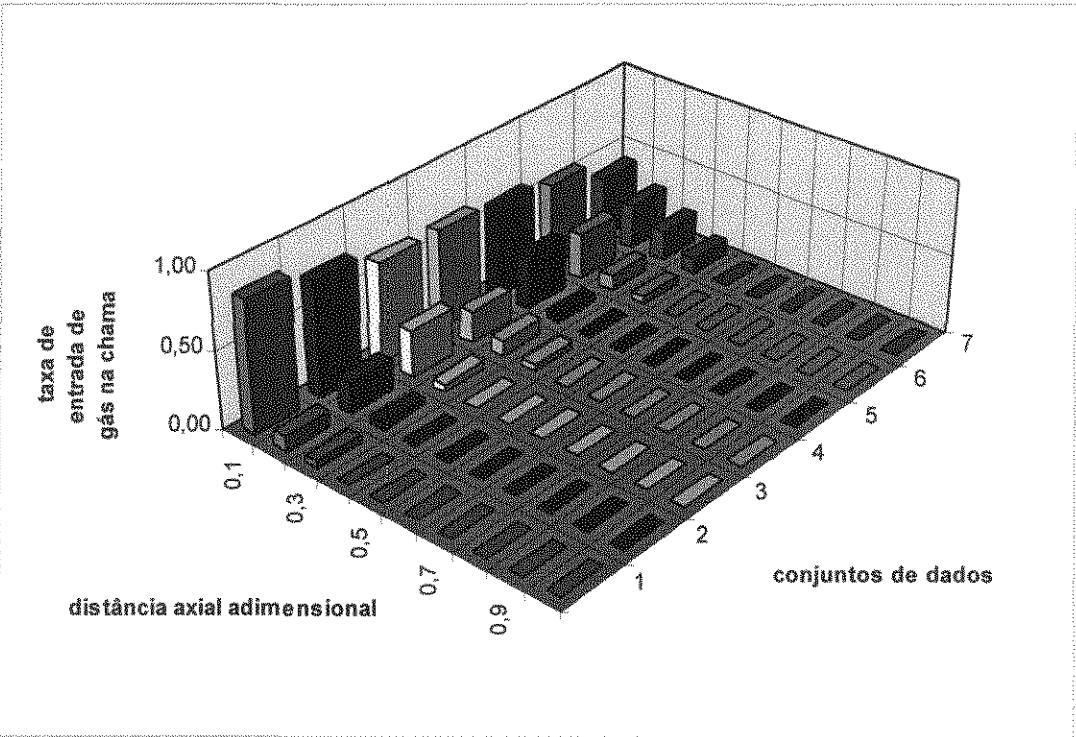


Figura 4.66: Representação gráfica dos conjuntos de dados de taxas de entrada de gás na chama ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão.

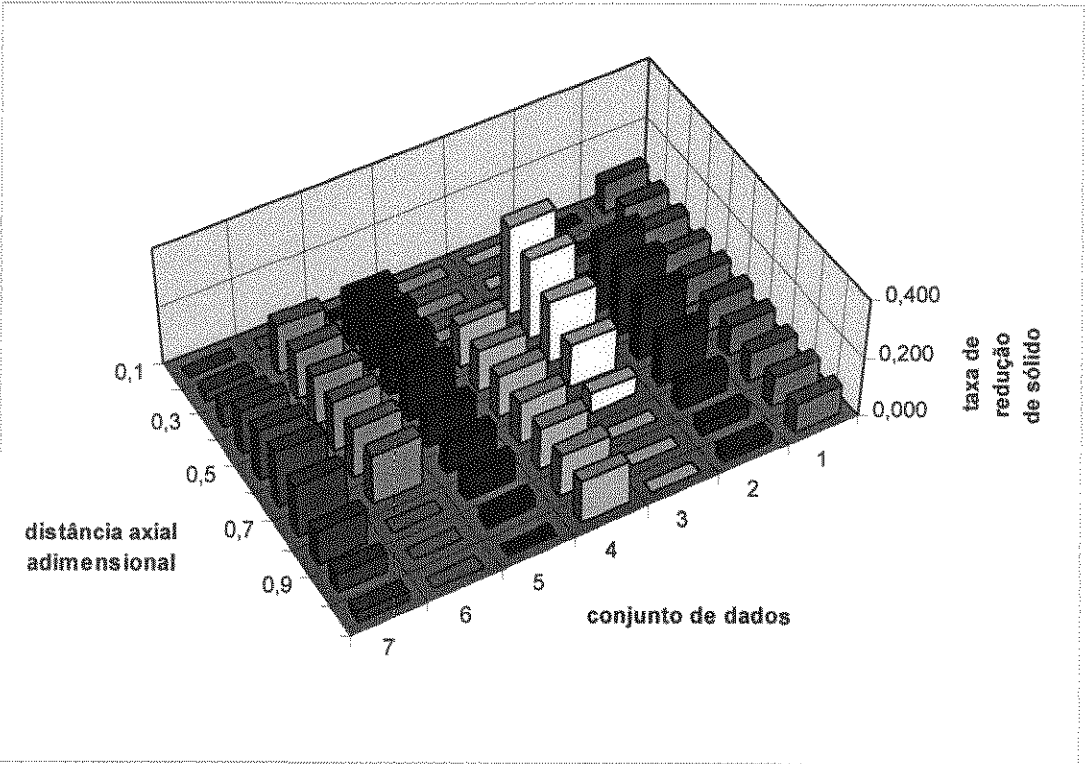


Figura 4.67: Representação gráfica dos conjuntos de dados de taxas de redução de sólidos ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão.

4.5.1. Efeitos da forma de variação axial do raio da chama sobre as distribuições de temperaturas

Os resultados das simulações, expressas em termos das variações percentuais das temperaturas em relação à referência, para as várias aproximações da geometria da chama, são agrupados em cinco gráficos (4.68 a 4.72), sendo cada um deles correspondente à temperatura de um elemento da câmara de combustão, ou seja, o sólido, o gás anular, o jato e as paredes interna e externa. Observa-se nos gráficos 4.68 a 4.72 duas regiões de comportamentos distintos em cada um deles. Isto é, na região da chama nota-se a presença de picos de desvios percentuais das temperaturas e na região pós-chama, o comportamento torna-se monotônico crescente ou decrescente.

Do ponto de vista operacional das plantas de incineração, as temperaturas da última seção tem grande importância, pois são usadas para controle e monitorização. Por isso, inclui-se neste item, a tabela 4.11 e a figura 4.73, onde constam as temperaturas da última seção transversal da câmara primária. A análise comparativa permite a conclusão de que a geometria da chama tem importância moderadamente significativa, uma vez que, dependendo da escolha da geometria da chama, a temperatura dos gases de combustão na última seção pode ter variações entre 1 e 2%, e as temperaturas do sólido e da parede, várias unidades percentuais.

São compilados e analisados apenas os dados referentes à câmara de combustão primária, cujas conclusões são extensíveis à câmara de combustão secundária.

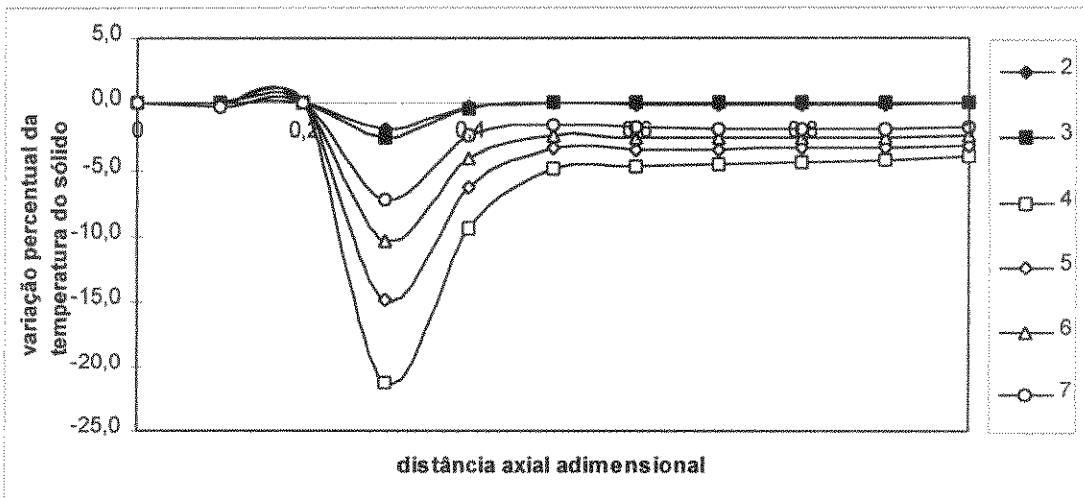


Figura 4.68: Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

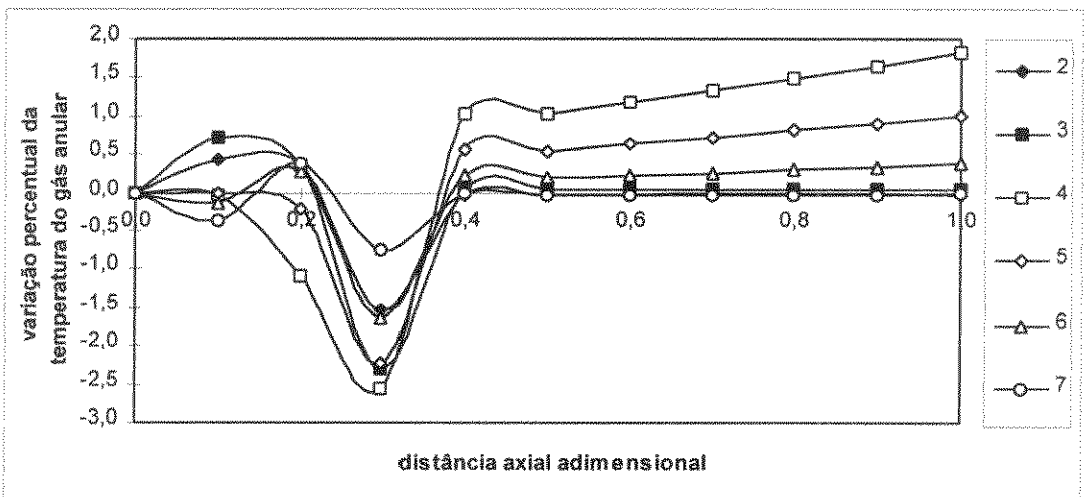


Figura 4.69: Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

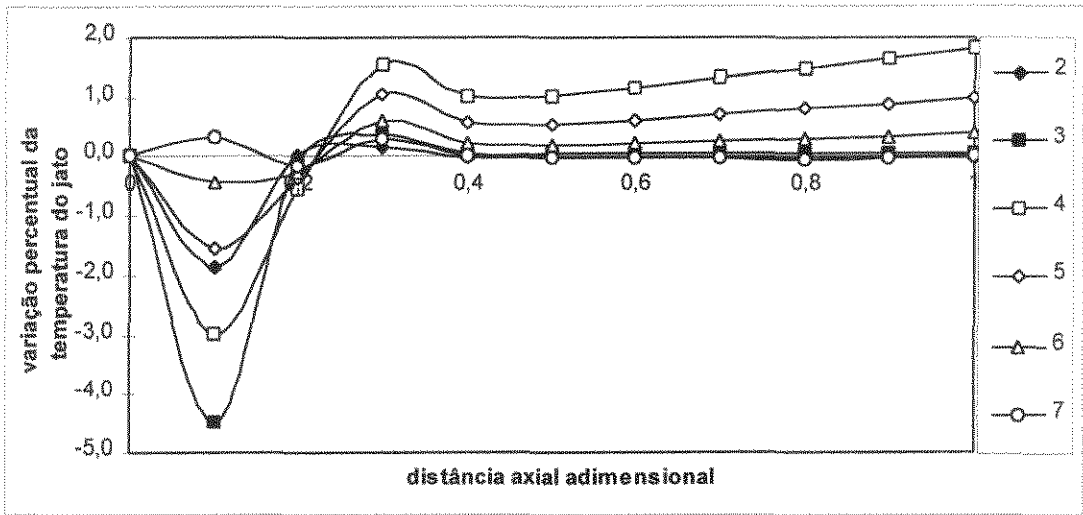


Figura 4.70: Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

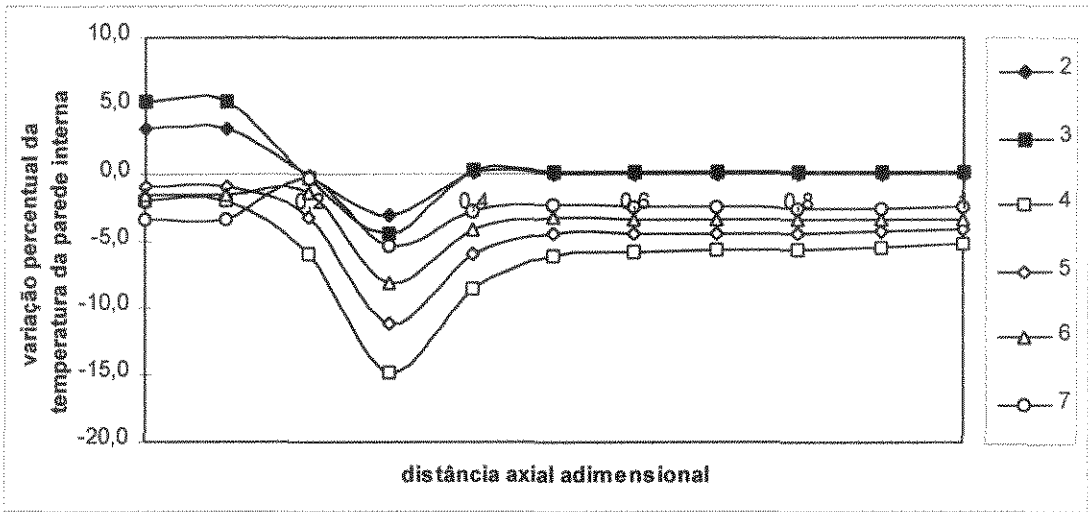


Figura 4.71: Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

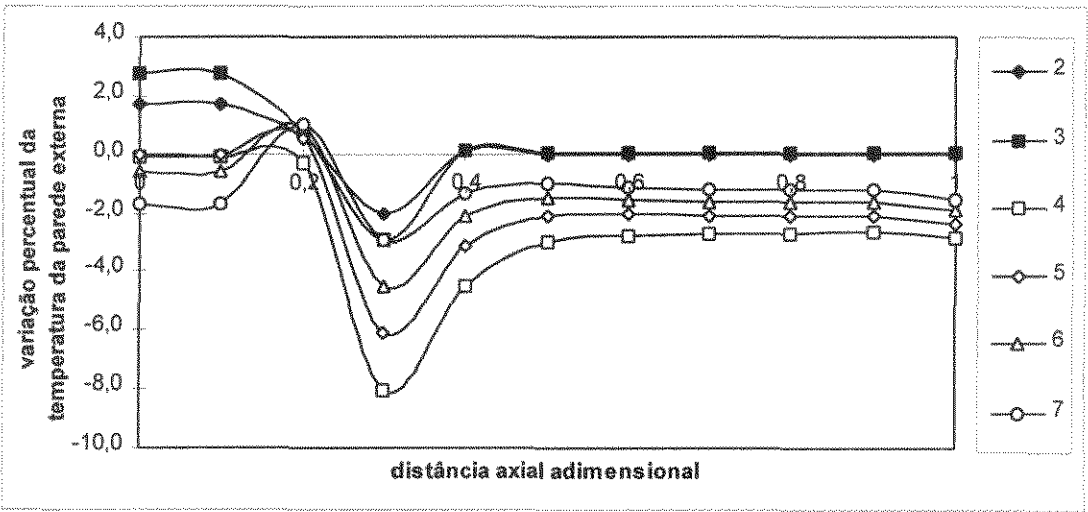


Figura 4.72: Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre a temperatura da parede externa câmara de combustão primária.

Tabela 4.11: Efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária

variações percentuais das temperaturas						
	aproximações para geometria da chama					
	2	3	4	5	6	7
sólido	-0,02	0,05	-4,04	-3,16	-2,48	-1,83
gás anular	-0,03	0,04	1,81	1,00	0,38	0,00
jato	-0,03	0,04	1,81	1,00	0,38	0,00
parede interna	-0,02	0,05	-5,29	-4,21	-3,33	-2,47
parede externa	-0,02	0,02	-2,90	-2,34	-1,92	-1,54
média	-0,02	0,04	-1,72	-1,54	-1,39	-1,17

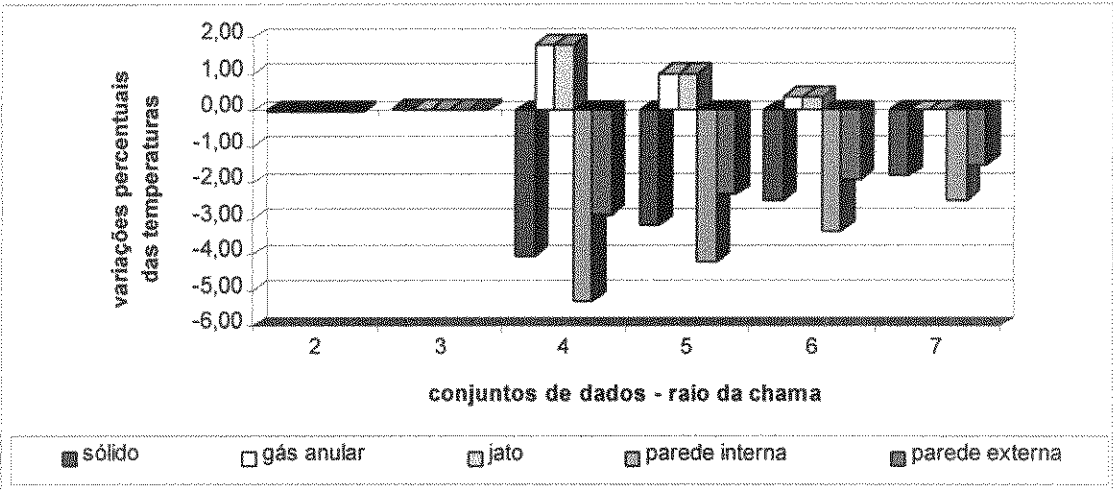


Figura 4.73: Representação gráfica do efeito da forma de variação axial do raio da chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária

4.5.2. Efeitos da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre as distribuições de temperaturas

A exemplo do que consta no item 4.4.1, as figuras 4.74 à 4.78 representam as variações percentuais das temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara para 6 conjuntos de dados de taxa de entrada de gás anular na chama. Observa-se claramente em cada gráfico, a presença de um pico de variação percentual de temperatura e uma região de comportamento monotônico. A tabela 4.12 e a figura 4.79 mostram as variações percentuais das temperaturas para a última seção transversal da câmara exclusivamente, por ser de interesse de controle e de monitorização, cuja análise leva a conclusão de que esta variável tem importância moderadamente significativa do ponto de vista da simulação e de compatibilização com os dados industriais.

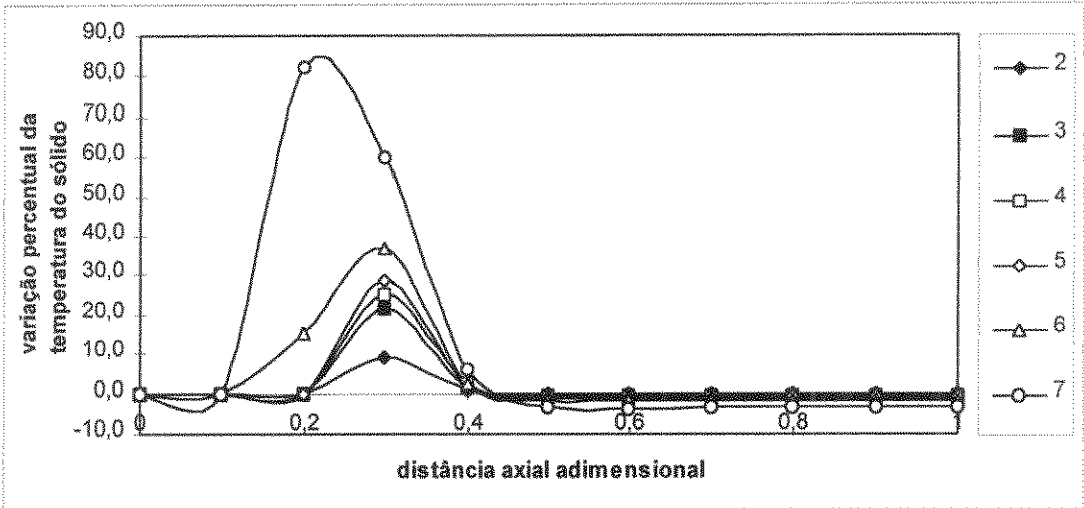


Figura 4.74: Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura do sólido na câmara de combustão primária.

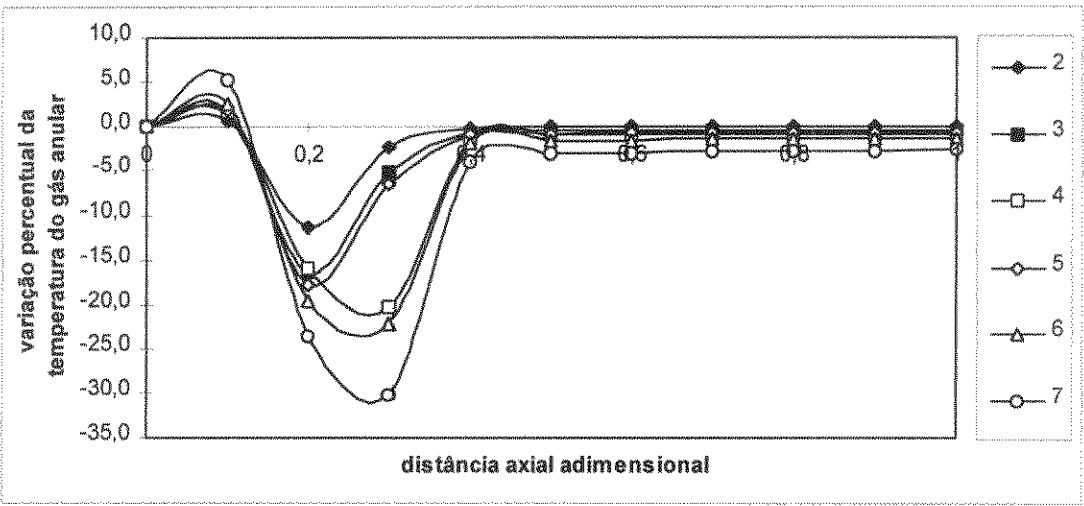


Figura 4.75: Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

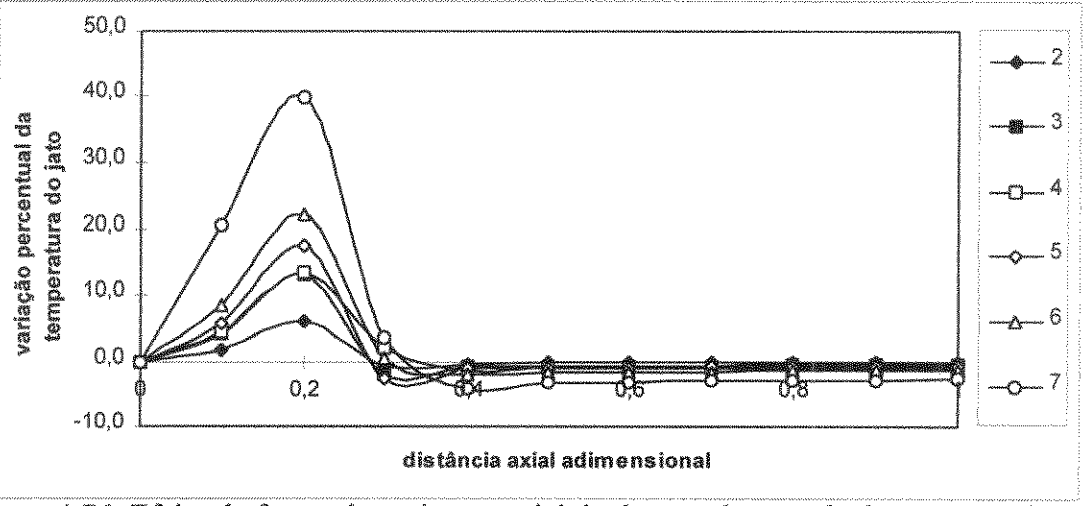


Figura 4.76: Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

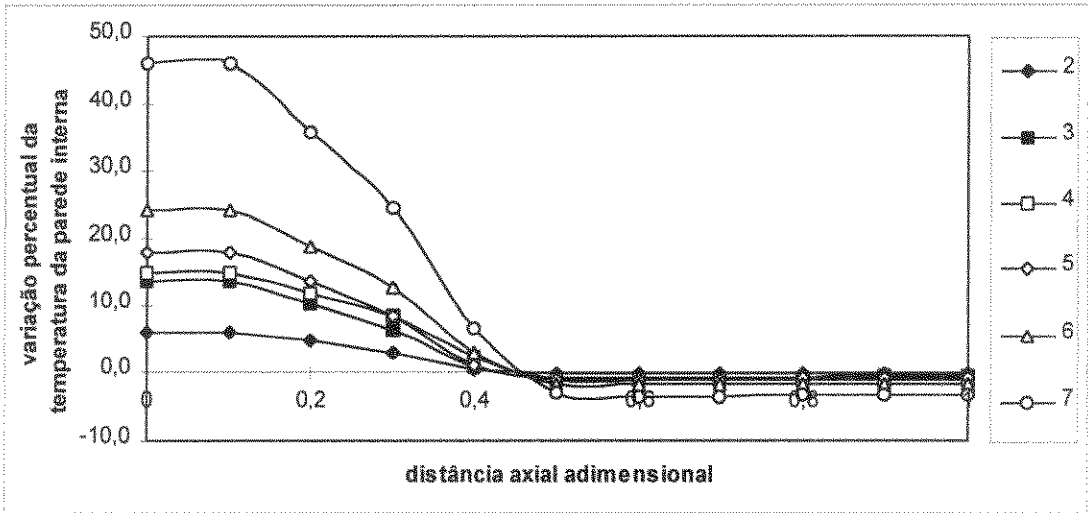


Figura 4.77: Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

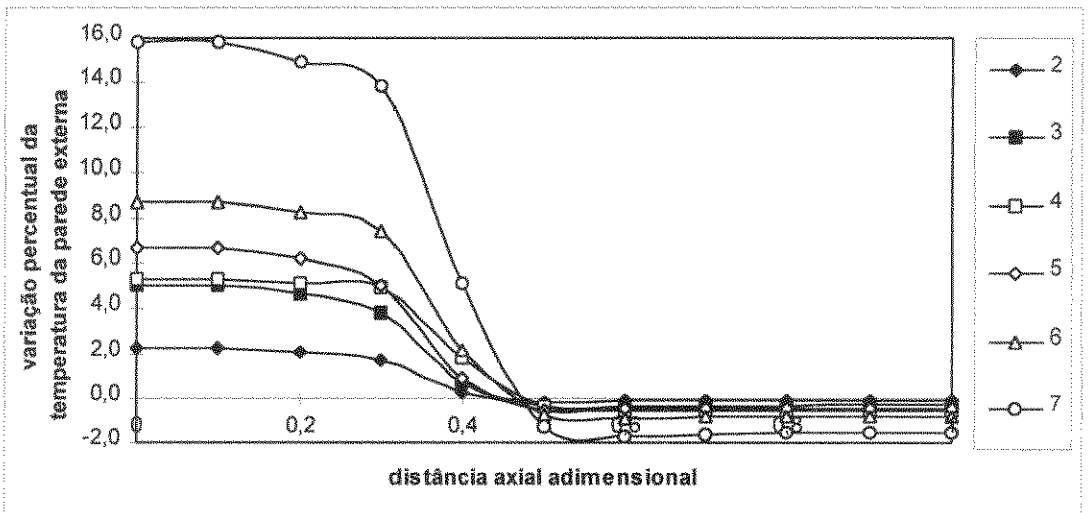


Figura 4.78: Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre a temperatura da parede externa câmara de combustão primária.

Tabela 4.12: Efeito da forma de variação axial da taxa de entrada de gases na chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.

	variações percentuais das temperaturas					
	taxa de entrada de gás na chama					
	2	3	4	5	6	7
sólido	-0,22	-0,63	-1,08	-0,90	-1,63	-3,14
gás anular	-0,19	-0,54	-0,92	-0,78	-1,40	-2,68
jato	-0,19	-0,54	-0,92	-0,78	-1,40	-2,68
parede interna	-0,22	-0,62	-1,07	-0,90	-1,62	-3,12
parede externa	-0,10	-0,30	-0,52	-0,44	-0,79	-1,52
média	-0,18	-0,52	-0,90	-0,76	-1,37	-2,63

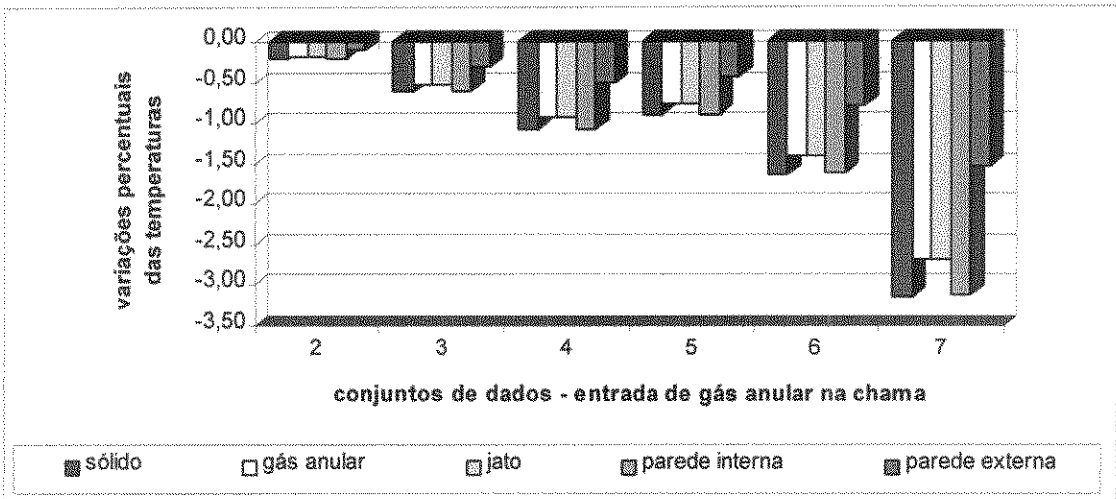


Figura 4.79: Efeito da forma de variação axial do da taxa de entrada de gases na chama sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.

4.5.3. Efeitos da forma de variação axial da taxa de redução de massa de sólido sobre as distribuições de temperaturas

Os resultados do estudo do efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa de sólido sobre as distribuições de temperaturas ao longo do eixo longitudinal da câmara de combustão, estão organizados na forma de gráficos, figuras 4.80 a 4.84. As temperaturas da última seção transversal constam na tabela 4.13, cuja representação gráfica pode ser observada por meio da figura 4.85.

A partir da observação desses resultados nota-se a importância moderadamente significativa dessa variável, uma vez que a variação percentual das temperaturas na última seção, com exceção do sólido, foi em torno de 1%, ou menor. Para o sólido essa variação foi bem maior, mas esta variável não é tão importante do ponto vista operacional, de controle e de monitorização.

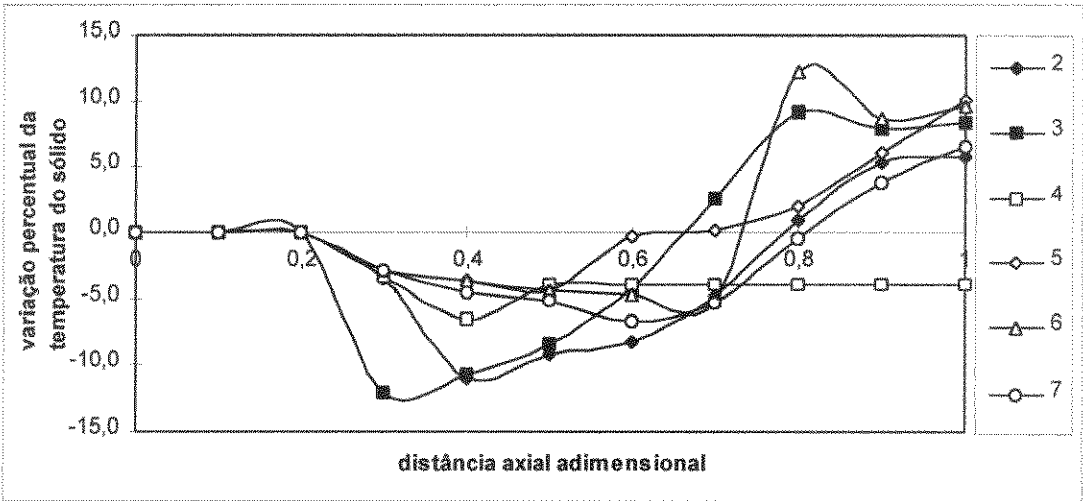


Figura 4.80: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura do mesmo na câmara de combustão primária.

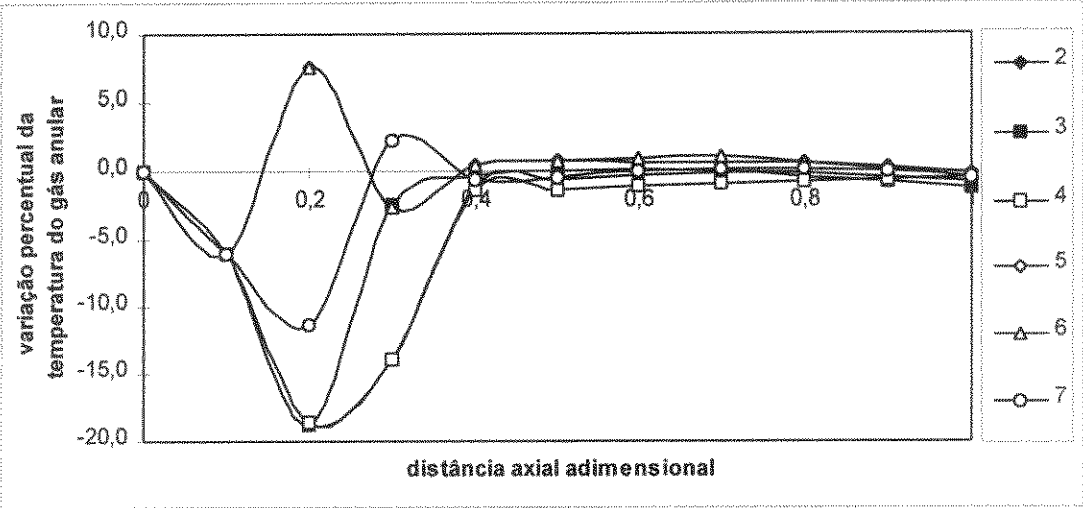


Figura 4.81: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura do gás anular na câmara de combustão primária.

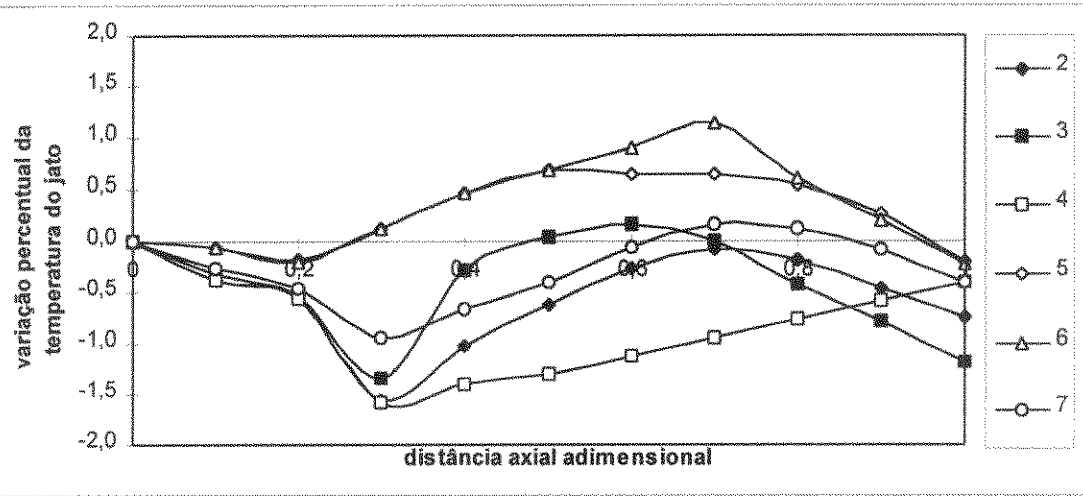


Figura 4.82: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura do jato na câmara de combustão primária.

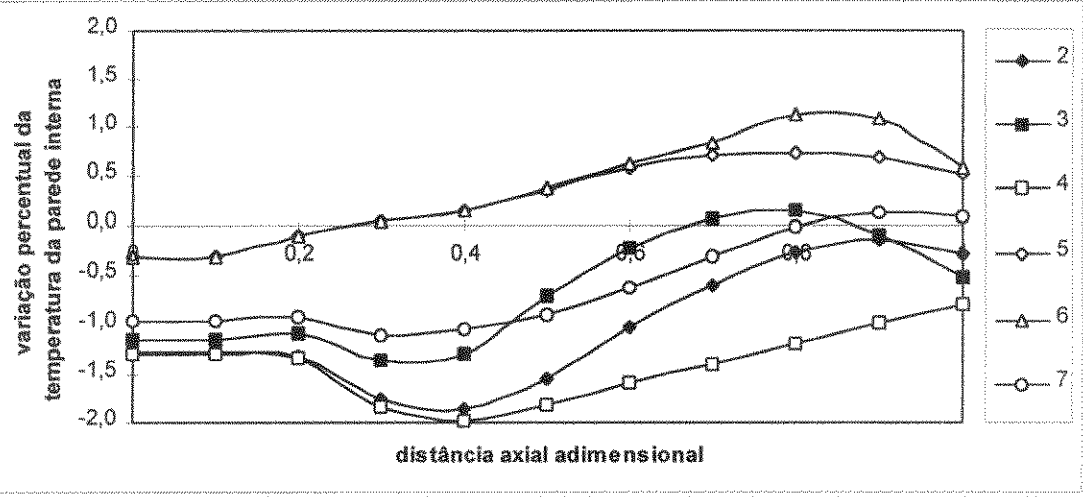


Figura 4.83: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura da parede interna da câmara de combustão primária.

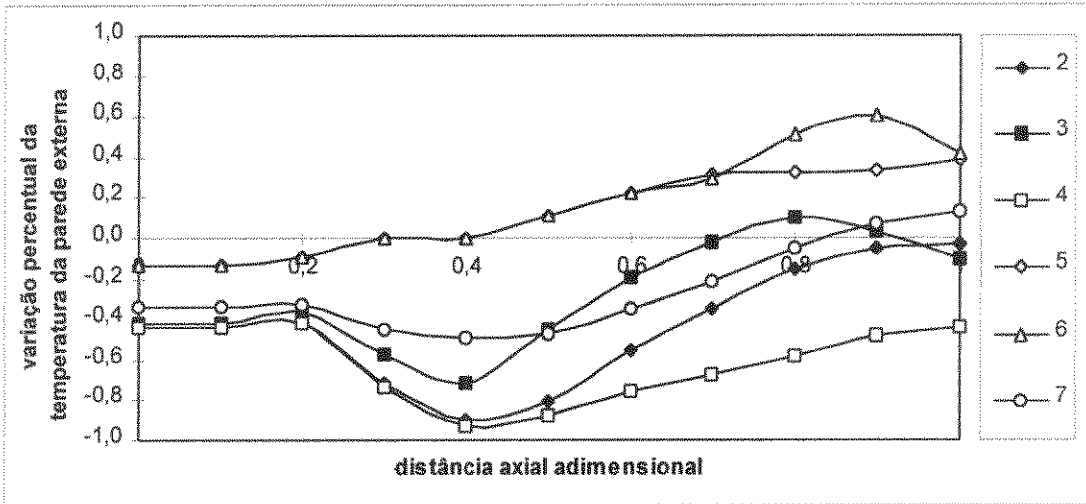


Figura 4.84: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre a temperatura da parede externa da câmara de combustão primária.

Tabela 4.13: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.

	variações percentuais das temperaturas					
	taxa de redução da massa de sólido					
	2	3	4	5	6	7
sólido	5,77	8,35	-4,00	10,11	9,58	6,55
gás anular	-0,75	-1,19	-0,40	-0,20	-0,22	-0,39
jato	-0,75	-1,19	-0,40	-0,20	-0,22	-0,39
parede interna	-0,29	-0,52	-0,78	0,53	0,58	0,08
parede externa	-0,03	-0,10	-0,44	0,38	0,42	0,13
média	0,79	1,07	-1,20	2,12	2,03	1,20

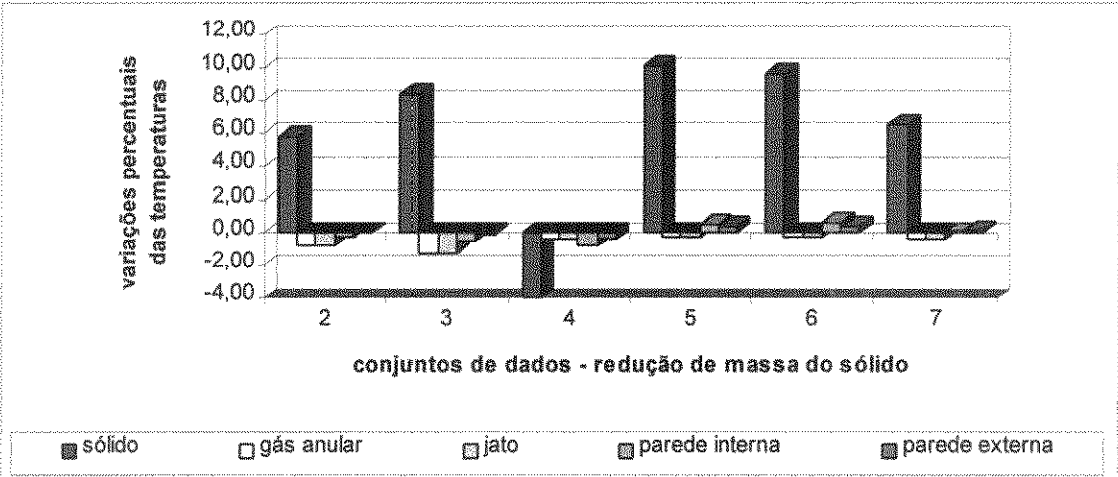


Figura 4.85: Efeito da forma de variação axial da taxa de redução de massa do sólido sobre as temperaturas da última seção transversal da câmara de combustão primária.

4.6. Análise e conclusão

O estudo desenvolvido neste item 4.4. tem grande importância para a definição do que é necessário aprimorar para que o modelo e o simulador desenvolvidos neste trabalho aproximem-se ainda mais da realidade das plantas industriais.

Os resultados mostram que cada uma das três variáveis estudadas influenciam individualmente os resultados da simulação de forma moderada, sendo que o uso de qualquer um dos conjuntos de dados sugeridos proporcionam resultados coerentes e com variações pequenas de um para outro.

Dentre as três variáveis estudadas, as aproximações para a geometria da chama e as distribuições de taxas de entrada de gás na chama são as que se apresentam com maiores possibilidades de proporcionar um refinamento dos resultados da simulação. Estas duas variáveis estão interrelacionadas pela fluido-dinâmica da chama, que para combustíveis auxiliares líquidos ultraviscosos utilizados no Brasil, não há estudos conclusivos publicados na literatura.

Quanto à taxa de redução de massa de sólido, em relação à qual está associada grande grau de incerteza devido à natureza heterogênea dos resíduos sólidos e ao fato de que na maioria das vezes a composição molecular é desconhecida, a escolha do conjunto de dados influenciou de forma moderadamente significativa os resultados finais, especialmente a temperatura dos gases. À luz dos resultados obtidos e do grau de incerteza e de desconhecimento associado aos resíduos sólidos, conclui-se que qualquer um conjuntos de dados de redução de massa dos resíduos sólidos estudados neste item, produzem resultados satisfatórios na simulação da câmara de combustão primária.

CAPÍTULO 5: MODELAGEM MATEMÁTICA EM ESTADO NÃO- ESTACIONÁRIO

CAPÍTULO 5:

MODELAGEM MATEMÁTICA EM ESTADO NÃO-ESTACIONÁRIO

5.1. Introdução:

Este capítulo é dedicado ao desenvolvimento do modelo não estacionário para incineradores de resíduos industriais composto de forno rotativo e de pós-combustor, a partir do modelo estacionário desenvolvido no capítulo 3. A adaptação do modelo estacionário para obtenção do modelo não estacionário é feita mediante as inclusões adequadas dos termos de acúmulo de energia, desprezando-se os transientes relativos aos transportes de massa dentro das câmaras, e procedendo-se algumas mudanças no método de cálculo, sem alterar, entretanto, a estrutura básica do procedimento de cálculo e do código de simulação numérica, desenvolvidos anteriormente.

5.2. Considerações sobre o modelo não estacionário:

Com base no modelo estacionário desenvolvido no capítulo 3, identifica-se vários processos não estacionários que poderiam ocorrer, nos seus diversos graus de importância em termos de efeito sobre as variáveis de processo de interesse:

- transiente referente ao fluxo de massa de sólido ao longo do leito;
- transiente referente ao fluxo de massa de gases ao longo das câmaras;
- transiente referente ao fluxo de energia associada à corrente de sólido;
- transiente referente ao fluxo de energia associada à corrente de gases;
- transiente referente ao fluxo de energia através das paredes das câmaras.

É considerado neste modelo, como hipótese, que as dinâmicas associadas às correntes de fluxos de massa são muito rápidas quando comparadas com as dinâmicas associadas aos fluxos de energia.

Portanto, considera-se que os transientes referentes às vazões mássicas são desprezíveis e são computados todos os transientes referentes aos fluxos de energia, exceto ao que diz respeito à radiação, cuja resposta em relação a perturbações é considerada instantânea.

A consideração que despreza os transientes referentes aos fluxos de massa é bastante razoável quando aplicada aos balanços de massa do gás anular e do jato, mas nem tanto quando aplicada ao balanço de massa da corrente de sólido, para perturbações nas vazões de alimentação do mesmo. A dinâmica da resposta da vazão de sólido ao longo do forno é bastante lenta, uma vez que o tempo de residência do mesmo é em torno de 30 minutos. Optou-se neste trabalho por não considerar esta dinâmica da vazão de sólido, deixando para trabalho futuro, principalmente porque o maior interesse do ponto de vista prático é analisar os efeitos ao longo do tempo das variações do teor de umidade no resíduo, das vazões de alimentação de combustível auxiliar e de ar de combustão, sobre os perfis de temperaturas e composições dos gases.

As demais hipóteses consideradas no desenvolvimento do modelo estacionário permanecem válidas.

5.3. Desenvolvimento do modelo:

No desenvolvimento do modelo em estado não estacionário, distingue-se dois tipos de balanços de energia, ou seja, aqueles referentes as correntes com fluxo de massa (sólido e gás) e aquele referente ao fluxo de energia sem fluxo de massa que é caso da transferência de calor através

das paredes das câmaras de combustão. Em ambos os casos, os balanços de energia em estado não estacionário são obtidos por meio da inclusão do termo de acúmulo de energia nas equações dos balanços em estado estacionário. Entretanto, no caso do balanço de energia na parede, a rotina de cálculo sofre algumas alterações uma vez que as temperaturas interna e externa da parede são obtidas simultaneamente com outras temperaturas, por método iterativo, via sistema de equações geradas pela aplicação da Lei de Kirchhoff no circuito elétrico equivalente.

5.3.1. Balanços de energia transiente nas correntes de sólido, gás e jato:

a) câmara primária:

Balanços de energia para o sólido na câmara primária:

O balanço de energia transiente para a corrente de sólido úmido é obtido com base no balanço em estado estacionário desenvolvido no item 3.6, bastando acrescentar o termo de acúmulo de energia correspondente. Ou seja, acrescentando-se o termo de acúmulo de energia na equação 3.150, obtém-se:

$$\rho_{su} \cdot V_{sol} \cdot Cp_{su} \cdot \frac{dT_{ss}(i+1)}{dt} = H_{ss}(i) - H_{ss}(i+1) + H_{ag}(i) - H_{ag}(i+1) - H_{va}(i) - H_{sv}(i) + q_s(i) \quad (5.1)$$

na qual ρ_{su} , Cp_{su} , e V_{sol} são a massa específica, a capacidade calorífica e o volume do leito de sólido úmido, respectivamente, sendo que os dois últimos são calculados por:

$$Cp_{su} = \left(\frac{M_{ss}(i+1)}{M_{ss}(i+1) + Mag(i+1)} \right) Cp_{ss} + \left(\frac{Mag(i+1)}{M_{ss}(i+1) + Mag(i+1)} \right) Cpa \quad (5.2)$$

$$V_{sol} = A_H \cdot \Delta z \quad (5.3)$$

Enquanto houver água a ser evaporada a partir do sólido, a temperatura no sólido permanecerá em 100°C, e qualquer perturbação na taxa de entrada de energia na zona em questão devido a efeitos transientes, provocará o aumento ou diminuição instantânea da evaporação, não havendo portanto, acúmulo de energia na corrente de sólido nestes casos.

Balanços de energia para o jato na região da chama na câmara primária:

O balanço de energia transiente para o jato na região da chama na câmara primária é obtido analogamente ao caso anterior pela inclusão do termo de acúmulo no balanço em estado estacionário representado pela equação 3.176, mantidas todas as considerações feitas no item 3.7, ou seja:

$$\rho_j \cdot V_j \cdot Cp_j(i+1) \cdot \frac{dT_j(i+1)}{dt} = H_j(i) + H_{en}(i) + Q_{ger}(i) + q_j(i) - H_j(i+1) \quad (5.4)$$

na qual ρ_j é a massa específica dos gases do jato calculada na temperatura e composição da corrente de saída da zona e V_j é o volume ocupado pelo jato na zona, calculado por:

$$V_j = \pi r_{jato}^2 \Delta z \quad (5.5)$$

Balancos de energia para o gás anular na região da chama na câmara primária:

Da mesma forma que para o jato e para o sólido, o balanço de energia transiente para a corrente de gás anular é obtida pela inclusão do termo de acúmulo de energia na equação que representa o balanço de energia em estado estacionário (equação 3.198), mantidas todas considerações feitas no item 3.8, ou seja:

$$\rho_g \cdot V_g \cdot Cpg(i+1) \frac{dTg(i+1)}{dt} = Hg(i) + Hva(i) + Hsv(i) + \Delta Hr(i) - Hen(i) + qg(i) - Hg(i+1) \quad (5.6)$$

na qual ρ_g é a massa específica do gás anular calculada em função da composição e da temperatura da corrente que deixa a zona em questão, e V_g é o volume ocupado pelo gás anular na zona em questão e calculado por:

$$V_g = \pi (r_{in}^2 - r_{jato}^2) \Delta z - V_{sol} \quad (5.7)$$

Balancos de energia para o gás anular na região pós-chama na câmara primária:

O balanço de energia transiente para o gás na região pós-chama é obtido por meio da inclusão do termo de acúmulo de energia na equação 3.213, mantidas todas as demais considerações do item 3.9, ou seja:

$$\rho_g V_g^* Cpg(i+1) \frac{dTg(i+1)}{dt} = Hg^*(i) + Hva(i) + Hsv(i) + \Delta Hr(i) + qg(i) - Hg^*(i+1) \quad (5.8)$$

na qual ρ_g é a massa específica do gás anular calculada em função da composição e da temperatura da corrente que deixa a zona em questão e V_g^* é o volume ocupado pelo gás na região pós-chama calculado por:

$$V_g^* = \pi r_{in}^2 \Delta z - V_{sol} \quad (5.9)$$

b) Câmara secundária:

Os balanços de energia em estado não estacionário para a câmara de combustão secundária podem ser obtidos de forma análoga aos obtidos para a câmara primária, ou seja, a partir das equações em estado estacionário desenvolvidos no item 3.10 com a inclusão dos termos de acúmulo de energia correspondentes. Na câmara secundária distinguem-se três grupos de zonas diferentes:

zona de injeção de combustível, de ar de combustão e de resíduo líquido, zonas da região pós-chama e as demais zonas, incluindo as zonas que precedem a zona de injeção e as que sucedem a mesma dentro da região de chama.

• **Zona de injeção:**

Nesta zona são computadas as quantidades de energia que entram na mesma associadas às entradas de combustível, de ar de combustão e de resíduo líquido, considerando a hipótese de vaporização instantânea deste último. Os balanços de energia para as correntes de gás anular e jato estão descritos a seguir, sendo que as massas específicas são calculadas na temperatura e composição das correntes que deixam a zona, e a nomenclatura é a mesma que foi aplicada à câmara primária:

Balanços de energia para o jato na zona de injeção na câmara secundária:

Incluindo o termo de acúmulo na equação 3.220 do item 3.10, obtém-se:

$$\rho_j V_j C_{pj}(i+1) \frac{dT_j(i+1)}{dt} = \text{Hen}(i_{inj}) + Q_{ger}(i_{inj}) + H_{ap} + H_{cb} + q_j(i_{inj}) - H_j(i_{inj} + 1) \quad (5.10)$$

na qual, o volume ocupado pelo jato V_j é calculado pela equação 5.5.

Balanços de energia para o gás anular na zona de injeção na câmara secundária:

Incluindo o termo de acúmulo na equação 3.233 do item 3.10 obtém-se:

$$\rho_g V_g C_{pg}(i+1) \frac{dT_g(i+1)}{dt} = H_g(i_{inj}) + H_{va}(i_{inj}) + H_{sv}(i_{inj}) + \Delta H_r(i_{inj}) - \text{Hen}(i_{inj}) + q_g(i_{inj}) + H_{as} - H_g(i_{inj} + 1) \quad (5.11)$$

na qual, o volume ocupado pelo jato V_g é calculado por:

$$V_g = \pi(r_m^2 - r_{jato}^2) \Delta z \quad (5.12)$$

• **Zonas da região pós-chama na câmara secundária:**

Balanços de energia para o gás na região pós-chama na câmara secundária (corrente de jato e gás anular unificadas):

Para a região pós-chama na câmara de combustão secundária, onde as correntes de jato e gás anular são unificadas para efeito de balanço de energia, este pode ser obtido a partir da equação 5.11, excluindo-se o termo da entalpia do ar secundário H_{as} e considerando as entalpias $H_g(i)$ e $H_g(i+1)$ como sendo as entalpias das correntes unificadas, e denotadas aqui por asterisco como superescrito.

$$\rho_g V_g^* C_{pg}(i+1) \frac{dT_g(i+1)}{dt} = Hg^*(i) + H_{va}(i) + H_{sv}(i) + \Delta Hr(i) - Hen(i) + qg(i) - Hg^*(i+1) \quad (5.13)$$

O volume ocupado pelo gás (jato mais gás anular) na zona é o volume total do cilindro interno após o débito do volume ocupado pelo sólido, ou seja:

$$V_g^* = \pi r_{in}^2 \Delta z - V_{sol} \quad (5.14)$$

• **Zonas da região da chama, exceto zona de injeção:**

Os balanços de energia referentes às zonas que sucedem a zona de injeção dentro da região da chama, são obtidos da mesma forma que para a zona de injeção, excluindo-se os termos referentes às entradas de ar de combustão, de combustível e resíduo líquido, como pode ser visto a seguir.

Balanços de energia para o jato na região da chama na câmara secundária:

$$\rho_j V_j C_{pj}(i+1) \frac{dT_j(i+1)}{dt} = Hen(i) + Q_{ger}(i) + qj(i) - Hj(i+1) \quad (5.15)$$

Balanco de energia para o gás anular na região da chama:

$$\rho_g V_g C_{pg}(i+1) \frac{dT_g(i+1)}{dt} = Hg(i) + H_{va}(i) + H_{sv}(i) + \Delta Hr(i) - Hen(i) + qg(i) - Hg(i+1) \quad (5.16)$$

• **Zonas que precedem a zona de injeção (sem chama) na câmara secundária:**

Nestas zonas, podem ser aplicadas as equações 5.15 e 5.16, excluindo-se somente o termo referente à geração de energia devido à queima de combustível $Q_{ger}(i)$.

5.3.2. Balanço de energia nas paredes da câmara primária em regime não-estacionário, com a presença de sólidos:

Em câmaras de combustão dotadas de sistema de isolamento térmico na forma como são os fornos rotativos e o pós-combustor, o transiente relativo ao acúmulo de energia nas paredes de isolamento é o elemento mais importante na definição da resposta em termos de temperaturas para estímulos que alterem a quantidade de energia alimentada ou gerada no sistema. Portanto, no modelo proposto aqui, é considerado o transiente referente ao acúmulo de energia na parede cilíndrica das câmaras de combustão. Nos itens 3.3.3. e 3.3.4. estão desenvolvidos os sistemas de equações cujas soluções fornecem os potenciais térmicos radiativos, a partir dos quais são calculadas as temperaturas, em estado estacionário. Para o modelo em estado não estacionário, pequenas modificações devem ser introduzidas nestes sistemas de equações, uma vez que as temperaturas das paredes devem ser obtidas por meio de balanços de energia transiente aplicados em torno da parede de cada zona. Desta forma, as equações relativas aos cálculos em estado

estacionário dos potenciais $Jpe(i)$ e $Epe(i)$ são substituídas por equações de balanços de energia em estado não estacionário, e resolvidas iterativamente com as equações dos demais potenciais.

Considera-se, para efeito de balanço de energia transiente, como volume de controle a parede da câmara de combustão, delimitada na direção radial pelas superfícies internas e externas das mesmas, e na direção axial pelas seções transversais que delimitam as zonas. Considera-se ainda, que esse volume de controle é representado por uma única temperatura uniforme ao longo de todo o volume de controle, e que corresponde a da parede externa Tpe . A superfície interna da parede da câmara, adjacente portanto ao volume de controle, é representada por Tp , ou seja, temperatura da parede interna. A figura 5.1 mostra a representação esquemática do balanço de energia transiente no elemento de volume considerado, com o circuito elétrico equivalente.

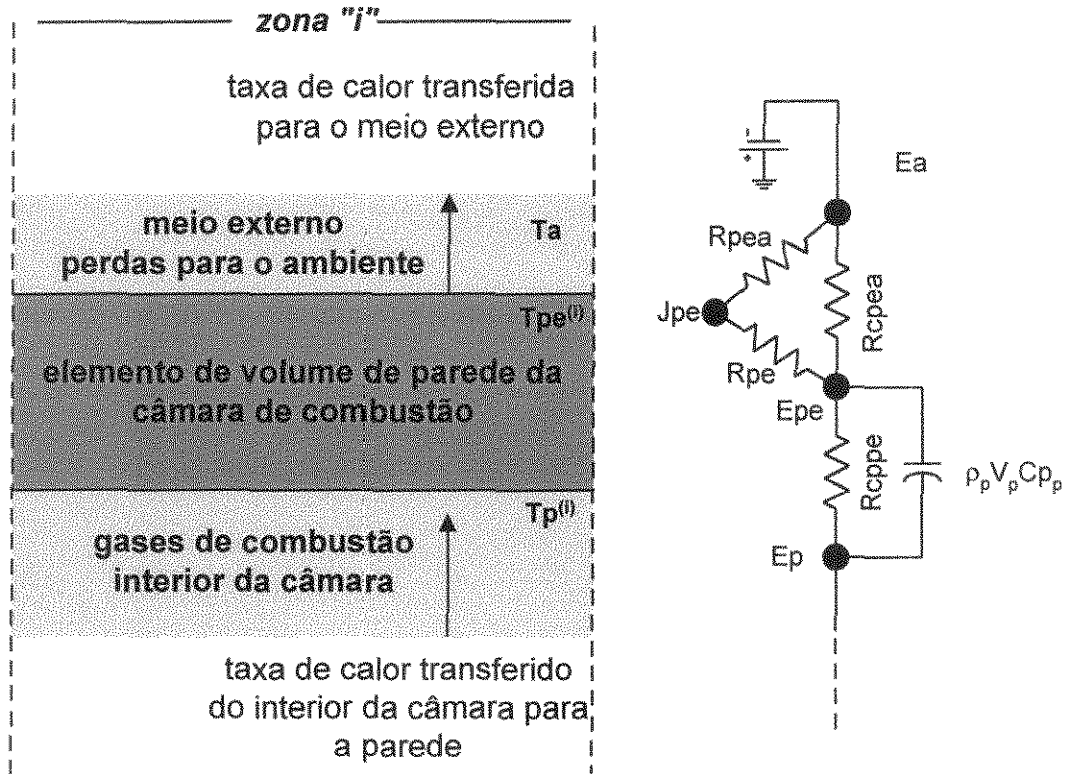


Figura 5.1.: Representação esquemática do balanço de energia em estado não estacionário num elemento de volume de parede equivalente à zona "i".

As demais taxas de transferência de calor, relativas às trocas internas de calor envolvendo parede interna, gás anular, jato, superfície de sólido e a parede do queimador, são calculadas por meio da lei de Kirchhoff aplicada aos circuitos análogos desenvolvidos no item 3.3, excluindo-se os potenciais $Jpe(i)$ e $Epe(i)$. Com isso, a temperatura da parede externa deixa de ser calculada pelo procedimento retro mencionado e passa a ser calculado de acordo com o procedimento de cálculo desenvolvido a seguir.

Balanço de energia no elemento de volume da parede da câmara de combustão:

Fazendo-se o balanço de energia em estado não estacionário num elemento de volume de parede da câmara de combustão, obtém-se:

$$\rho_p V_p C_{p_p} \frac{dT_{pe}^{(i)}}{dt} = \left(\begin{array}{c} \text{taxa de calor que} \\ \text{entra no elemento} \\ \text{de volume} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{taxa de calor que} \\ \text{deixa o elemento} \\ \text{de volume} \end{array} \right) \quad (5.17)$$

O termo $\rho_p V_p C_{p_p} \frac{dT_{pe}^{(i)}}{dt}$ representa o acúmulo de energia no elemento de volume considerado acima, e os parâmetros ρ_p , V_p e C_{p_p} representam a massa específica, o volume e a capacidade calorífica do referido elemento.

$$\left(\begin{array}{c} \text{taxa de calor que} \\ \text{entra no elemento} \\ \text{de volume} \end{array} \right) = \frac{E_p^{(i)} - E_{pe}^{(i)}}{R_{cppe}} \quad (5.18)$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{taxa de calor que} \\ \text{deixa o elemento} \\ \text{de volume} \end{array} \right) = \frac{E_{pe}^{(i)} - E_a}{R_{cpea}} + \frac{E_{pe}^{(i)} - J_{pe}^{(i)}}{R_{pe}} \quad (5.19)$$

Combinando as equações 5.17 a 5.19, obtém-se:

$$\rho_p V_p C_{p_p} \frac{dT_{pe}^{(i)}}{dt} = \frac{E_p^{(i)} - E_{pe}^{(i)}}{R_{cppe}} - \frac{E_{pe}^{(i)} - E_a}{R_{cpea}} - \frac{E_{pe}^{(i)} - J_{pe}^{(i)}}{R_{pe}} \quad (5.20)$$

5.4 Cálculos dos potenciais

Os sistemas de equações algébricas resultantes da aplicação da lei das correntes de Kirchhoff no circuito elétrico análogo desenvolvido no item 3.3, com as devidas adaptações para o caso não estacionário, é mostrado a seguir. Omite-se aqui as etapas intermediárias do desenvolvimento matemático por tratar-se de procedimento análogo ao desenvolvido no capítulo 3.

Os potenciais $J_{pe}^{(i)}$ e $E_{pe}^{(i)}$ são obtidos pelas equações 5.22 e 5.23, válidas para todas as zonas:

$$J_{pe}^{(i)} = \frac{\frac{E_{pe}^{(i)}}{R_{pe}} + \frac{E_a}{R_{pea}}}{\frac{1}{R_{pe}} + \frac{1}{R_{pea}}} \quad (5.21)$$

$$E_{pe}^{(i)} = \sigma T_{pe}^{(i)} \quad (5.22)$$

Os demais potenciais são obtidos pelos sistemas de equações mostrados a seguir, para os casos com e sem a presença de sólidos.

5.4.1 Cálculos dos potenciais na presença de sólidos

- Para a primeira zona:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rps} & \frac{1}{Rp} & \frac{1}{Rpq} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rps} & -S2 & 0 & \frac{1}{Rs q} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & 0 & -S3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rpq} & \frac{1}{Rs q} & 0 & -S6 & \frac{1}{Rq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rq} & -S7 & \frac{1}{Rcqqe} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rcqqe} & -S8 & \frac{1}{Rqe} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rqe} & -S9 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Js^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Jq \\ Eq \\ Eqe \\ Jqe \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ A2 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} - \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} \\ A3 \\ 0 \\ -\frac{Ea}{Rc qea} \\ -\frac{Ea}{R qea} \end{vmatrix} \quad (5.23)$$

nas quais A1, A2, S1, S2, S3, S6, S7, S8 e S9 são calculados pelas equações 3.67, 3.68, 3.57, 3.58, 3.59, 3.62, 3.63, 3.64 e 3.65, respectivamente, desenvolvidas no capítulo 3, e A3 é dada por:

$$A3 = -\frac{Ej^{(1)}}{Rjq^{(1)}} - \frac{Jp^{(2)}}{Rpq^{(2)}} - \frac{Ej^{(2)}}{Rjq^{(2)}} - \frac{Js^{(2)}}{Rs q^{(2)}}$$

• Para zonas intermediárias, inclusive segunda zona:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rps} & \frac{1}{Rp} \\ \frac{1}{Rps} & -S2 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & 0 & -S3 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Js^{(i)} \\ Ep^{(i)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ A2 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} - \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} \end{vmatrix} \quad (5.24)$$

nas quais A1, A2, S1, S2 e S3 são calculados pelas equações 3.77, 3.78, 3.74, 3.75, 3.59 respectivamente, para a segunda zona, e 3.86, 3.87, 3.83, 3.84 e 3.59 para as demais zonas intermediárias, respectivamente, desenvolvidas no capítulo 3.

• Para a última zona:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rps} & \frac{1}{Rp} & \frac{1}{Rppc} \\ \frac{1}{Rps} & -S2 & 0 & \frac{1}{Rspc} \\ \frac{1}{Rp} & 0 & -S3 & \frac{1}{Rcppe} \\ \frac{1}{Rppc} & \frac{1}{Rspc} & 0 & -S10 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Js^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epc \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ A2 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcp g} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} - \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} \\ -\frac{Ej^{(i)}}{Rjpc} \end{vmatrix} \quad (5.25)$$

nas quais A1, A2, S1, S2, S3 e S10 são calculados pelas equações 3.98, 3.99, 3.94, 3.95 e 3.59 respectivamente, desenvolvidas no capítulo 3.

5.4.2 Cálculos dos potenciais na ausência de sólidos:

Para a câmara as zonas da câmara primária operando com ausência de sólido e para a câmara secundária (pós-combustor) os sistemas de equações algébricas resultantes são semelhantes aos indicados por 5.23 a 5.25, excluindo-se tão somente os termos relacionados com o sólido, como pode ser visto a seguir:

- Para a primeira zona:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rp} & \frac{1}{Rpq} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rp} & -S3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Rpq} & 0 & -S6 & \frac{1}{Rq} & & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rq} & -S7 & \frac{1}{Rcqqe} & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rcqqe} & -S8 & \frac{1}{Rqe} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Rqe} & -S9 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Jq \\ Eq \\ Eqe \\ Jqe \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpq} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} - \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} \\ -\frac{Ej^{(i)}}{Rjq^{(i)}} \\ 0 \\ -\frac{Ea}{Rcqe} \\ -\frac{Ea}{Rqea} \end{vmatrix} \quad (5.26)$$

nas quais S1, S2, S3, S6, S7, S8, S9, A1 e A2 são calculados pelas equações 3.112, 3.112, 3.60, 3.61, 3.114, 3.115, 3.116, 3.117 e 3.119 respectivamente, desenvolvidas no capítulo 3.

- Para zonas intermediárias, inclusive segunda zona:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rp} \\ \frac{1}{Rp} & -S3 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpq} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} - \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} \end{vmatrix} \quad (5.27)$$

Nas quais S1, S2, S3, A1 e A2 são calculados pelas equações 3.123, 3.124, 3.60, 3.61 e 3.126 respectivamente, para a segunda zona, e 3.129, 3.130, 3.60, 3.61 e 3.132 para as demais zonas intermediárias, respectivamente, desenvolvidas no capítulo 3.

- Para a última zona:

$$\begin{vmatrix} -S1 & \frac{1}{Rp} & \frac{1}{Rppc} \\ \frac{1}{Rp} & -S3 & \frac{1}{Rcppe} \\ \frac{1}{Rppc} & 0 & -S10 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Jp^{(i)} \\ Ep^{(i)} \\ Epc \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 \\ -\frac{Eg^{(i)}}{Rcpg} - \frac{Es^{(i)}}{Rcps} - \frac{Epe^{(i)}}{Rcppe} \\ -\frac{Ej^{(i)}}{Rjpc} \end{vmatrix} \quad (5.28)$$

nas quais S1, S3, S10, A1 e A2 são calculados pelas equações 3.136, 3.137, 3.60, 3.61, 3.138 e 3.140 respectivamente, desenvolvidas no capítulo 3.

5.5 Métodos de cálculo das temperaturas e das taxas de transferência de calor

As equações diferenciais 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.11, 5.13, 5.15, 5.16 e 5.20 precisam ser integradas para a obtenção das temperaturas do gás, do jato, do sólido e da parede, simultaneamente, uma vez que os balanços de energia são interdependentes, e iterativamente, envolvendo todas as zonas, devido ao fato de haver trocas radiativas entre zonas adjacentes.

A integração é realizada pelo método de Euler, para todas as temperaturas, representadas genericamente por:

$$T_{t+\Delta t}^{(i)} = T_t^{(i)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{dT^{(i)}}{dt} dt \cong T_t^{(i)} + \frac{dT^{(i)}}{dt} \cdot \Delta t \quad (5.29)$$

Para o caso específico do cálculo da temperatura da parede externa da câmara, $Tpe^{(i)}$, a integração é um processo iterativo em cada zona, uma vez que aparece na equação diferencial 5.20 o termo $Epe^{(i)}$, que depende da mesma variável $Tpe^{(i)}$, segundo a equação de Stephan-Boltzman.

Os cálculos das taxas de transferência de calor não sofrem qualquer alteração em relação aos procedimentos desenvolvidos no capítulo 3 e são portanto calculados pelas equações 3.101 a 3.105 e 3.141 a 3.145.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÃO:

CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÃO:

6.1 Introdução:

Para exemplificar os resultados típicos que podem ser obtidos mediante a aplicação do simulador desenvolvido a partir do modelo proposto, são apresentados neste capítulo alguns resultados interessantes, tomando como base, a simulação com os parâmetros e condições operacionais de referência utilizados no capítulo 4, item 4.2.1. A partir desta referência, são realizadas mudanças nas condições operacionais e os resultados obtidos no novo estado estacionário são analisados, permitindo a avaliação da adequação do modelo e do simulador, assim como, o estudo de condições operacionais que proporcionem efetiva redução no consumo de combustível. São realizadas ainda, simulações em estado não estacionário, para perturbações em algumas das mais importantes variáveis, no intuito de demonstrar a coerência e a potencialidade de aplicação do modelo e simulador desenvolvido neste trabalho.

6.2 Simulação em estado estacionário para as câmaras primária e secundária:

Neste item, são apresentados os resultados de simulação nas condições de referência, e na sequência são apresentados os resultados que expressam os efeitos de alterações de algumas das variáveis operacionais mais importantes.

a) Simulação nas condições operacionais de referência:

Como já mencionado, é tomada como base para a análise a simulação com os parâmetros e condições de referência utilizados no capítulo 4, item 4.2.1, cujos resultados em termos de perfis de temperaturas, de frações mássicas de oxigênio e de vazão mássica de voláteis não oxidados são apresentados abaixo, para as câmaras primária e secundária.

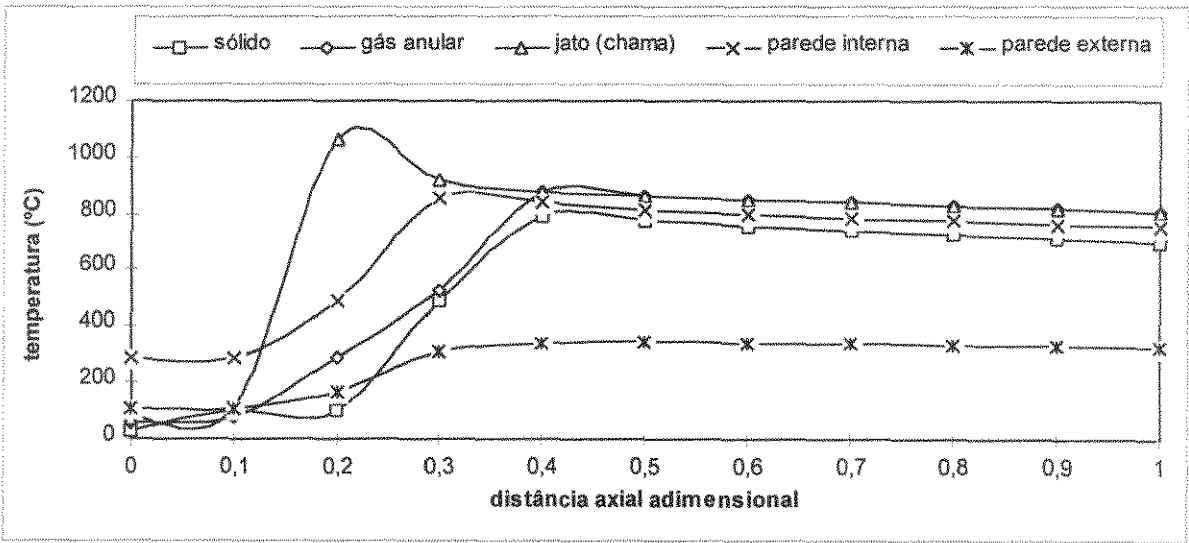


Figura 6.1: Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão primária, nas condições de referência.

É importante notar na figura 6.1 que as curvas referentes ao gás anular e ao jato (ou chama) não são coincidentes entre o início da câmara e a distância 0,4, a partir de onde o são. O trecho não

coincidente refere-se à região da chama, onde é possível distinguir-se duas regiões: uma de alta temperatura (chama) e outra de temperaturas inferiores, mas em processo de aquecimento (região gasosa anular). Após o final da chama, há uma única temperatura que representa a fase gasosa na câmara, onde se espera uma região gasosa mais homogênea. O mesmo comportamento é esperado para a fração mássica de oxigênio representado na figura 6.2, onde observa-se duas regiões gasosas com características diferentes na região da chama, as curvas para o gás anular e o jato são não coincidentes, tornando-se uma só após a chama.

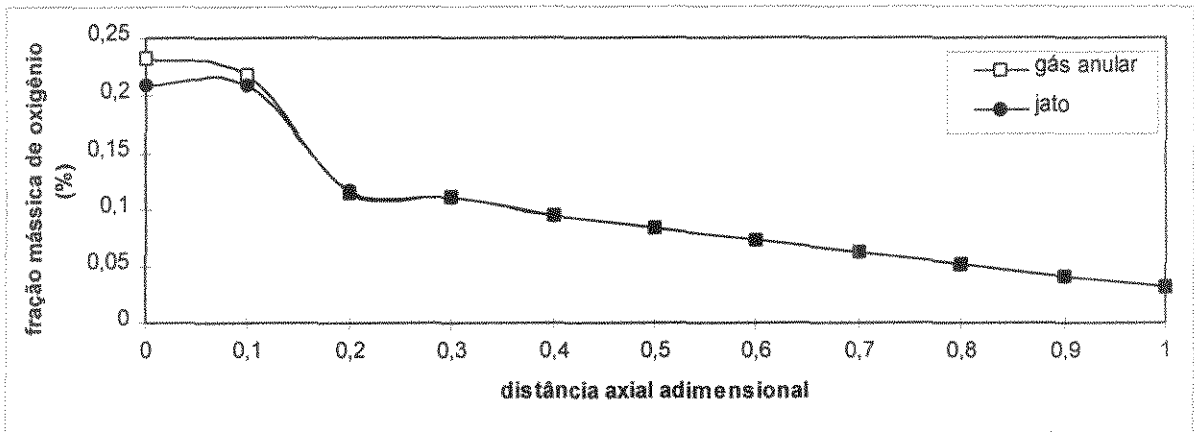


Figura 6.2: Fração mássica de oxigênio em função distância axial adimensional na câmara primária, nas condições operacionais de referência.

As figuras 6.3 e 6.4 referentes à câmara secundária, são análogas às figuras 6.1 e 6.2. Entre as distâncias axiais 0,2 e 0,3 ocorre a injeção de combustível, de ar de combustão e de resíduo líquido. A partir desta zona, inicia-se a chama, reaparecendo as duas regiões gasosas distintas, o gás anular e o jato. O gás anular sofre uma redução da sua temperatura devido à entrada de ar secundário com temperatura pouco acima da temperatura ambiente, não compensado, neste caso, pela geração de energia devido à queima do resíduo líquido. Por outro lado, o jato sofre uma elevação de temperatura devido à injeção e queima de combustível auxiliar.

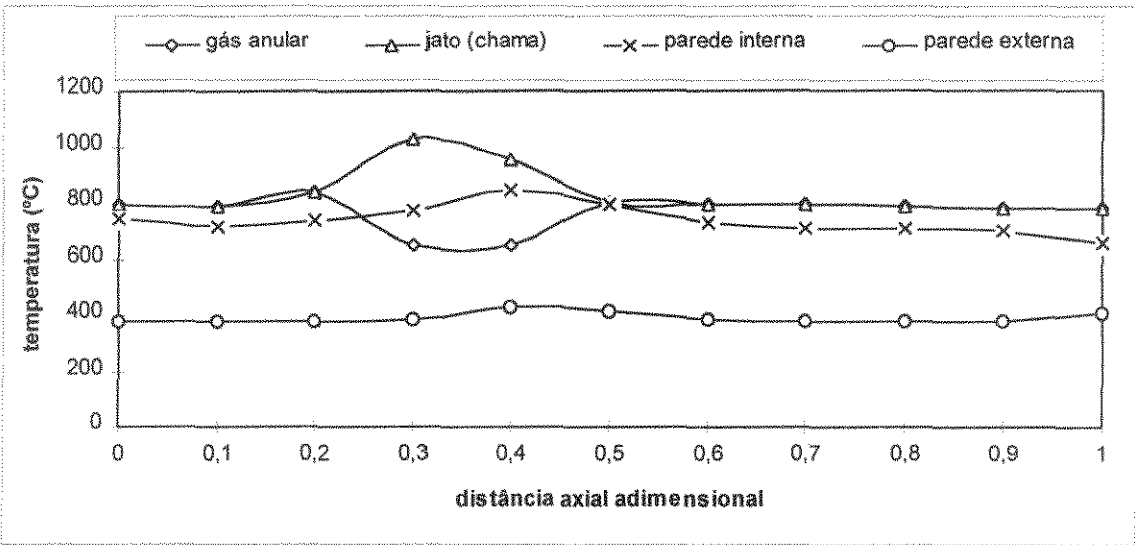


Figura 6.3: Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão secundária, nas condições de referência.

Com relação à fração mássica de oxigênio, as duas correntes, gás anular e jato, sofrem aumentos devido às injeções de ar de combustão, que enriquecem ambas (figura 6.4).

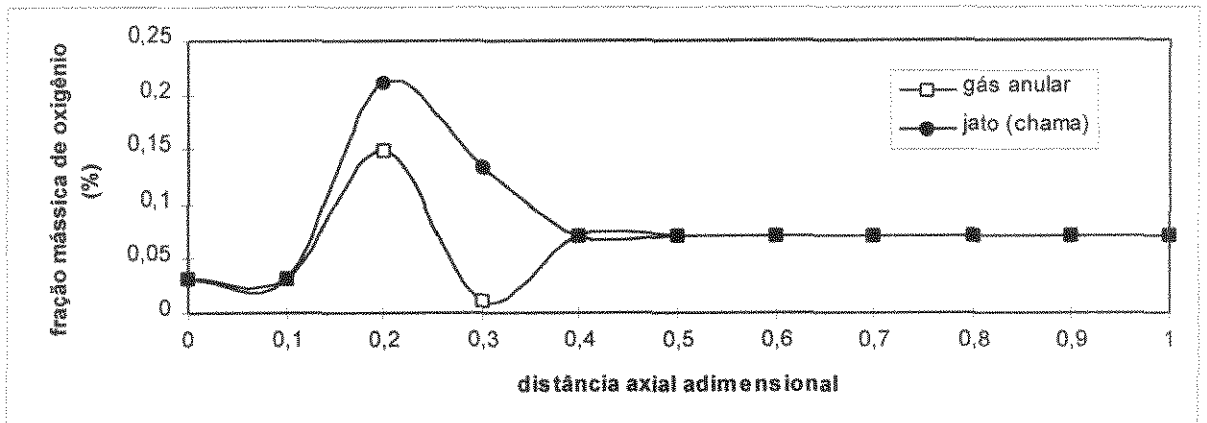


Figura 6.4: Fração mássica de oxigênio em função distância axial adimensional na câmara secundária, nas condições operacionais de referência.

b) Simulação para vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s:

As figuras 6.5 a 6.10, contidas neste sub-item, representam os perfis de temperaturas, as frações mássicas de oxigênio e as vazões mássicas de voláteis não oxidados, para um incinerador com as condições operacionais e parâmetros de referência, mencionados anteriormente, submetido a uma alteração da vazão mássica de sólido de 0,200 para 0,400 kg/s. Os perfis de temperaturas para este novo estado estacionário, apresenta grandes semelhanças com o apresentado na figura 6.1, nas condições de referência. Entretanto, devido ao aumento da taxa de alimentação de sólidos e consequente aumento da quantidade de constituintes oxidáveis alimentados, ocorre a deficiência de oxigênio na câmara primária, que bem pode ser visto na figura 6.6. Ou seja, a partir da distância axial 0,6, a concentração de oxigênio aproxima-se de zero, a partir de onde, aumenta a vazão mássica dos voláteis não oxidados, conforme pode ser visto na figura 6.7. Observa-se também, a presença de voláteis não oxidados na região da chama, onde há uma alta demanda de oxigênio devido a elevada taxa de queima de combustível auxiliar.

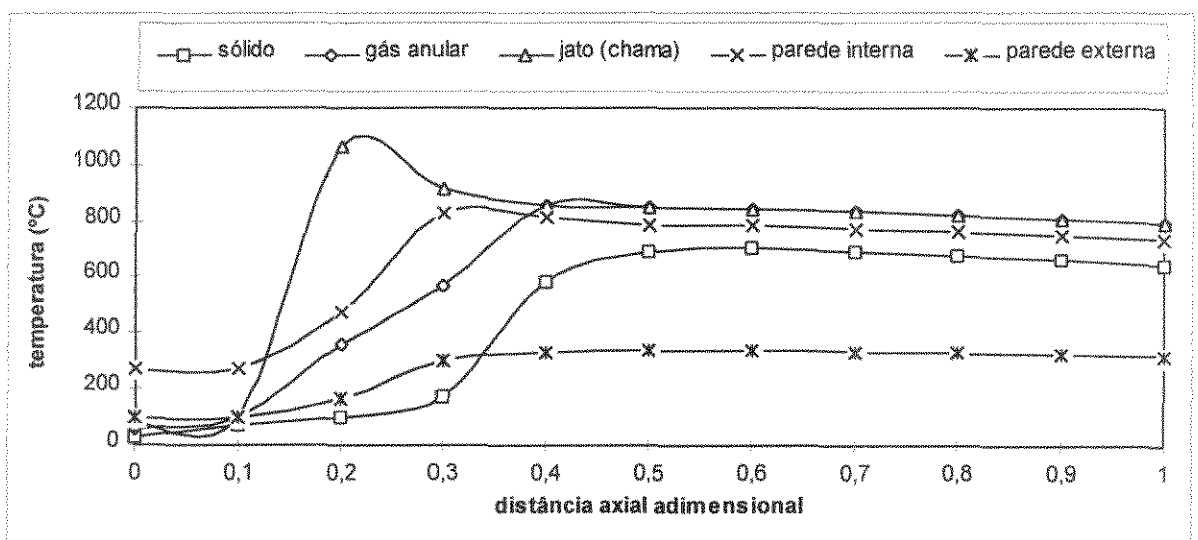


Figura 6.5: Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão primária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.

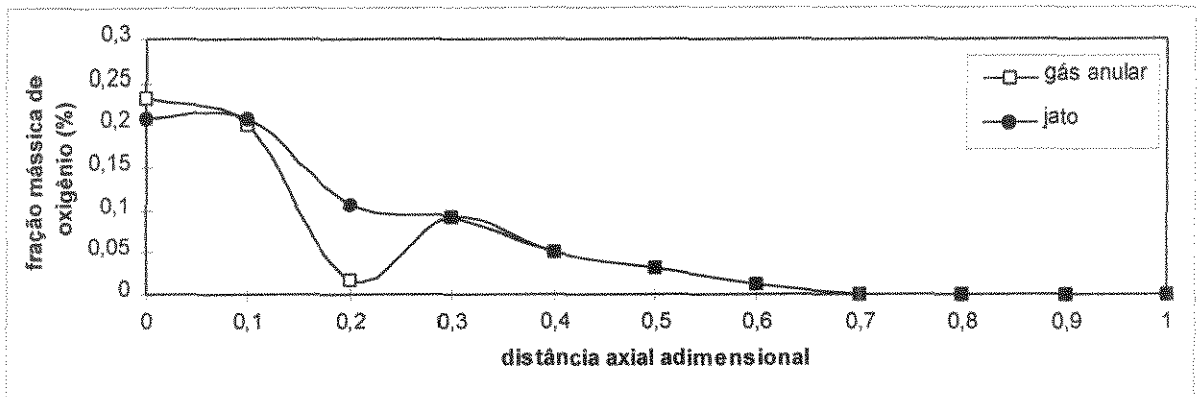


Figura 6.6: Fração de mássica de oxigênio em função da distância axial adimensional na câmara primária expressa em %, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.

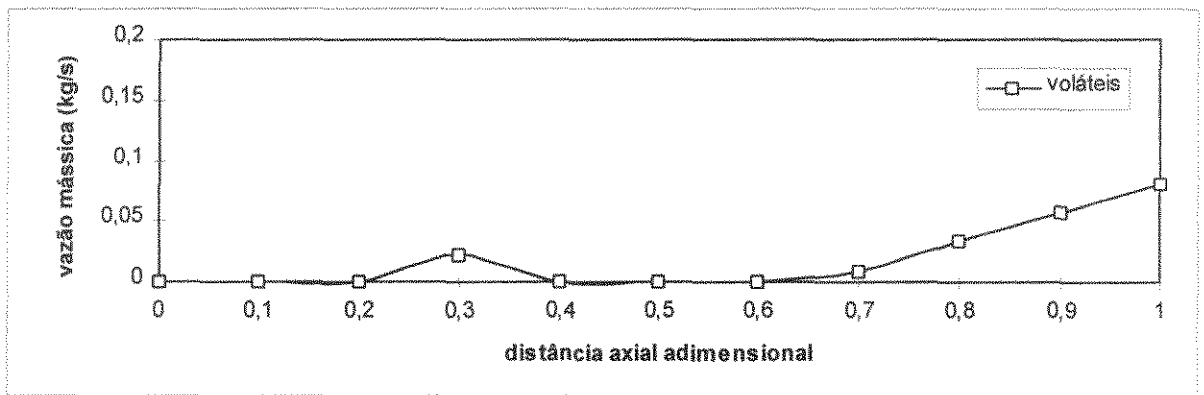


Figura 6.7: Vazão mássica de voláteis não oxidado em função da distância axial adimensionalizada, na câmara primária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.

Observando-se as figuras 6.9 e 6.10, nota-se que, devido à injeção de ar de combustão na câmara secundária, os voláteis não oxidados remanescente da câmara primária são consumidos, mesmo com a injeção de resíduo líquido, e a fração mássica de oxigênio aumenta, eliminando a deficiência da câmara primária. Este exemplo ilustra claramente a importante função da câmara secundária na eficiência da incineração.

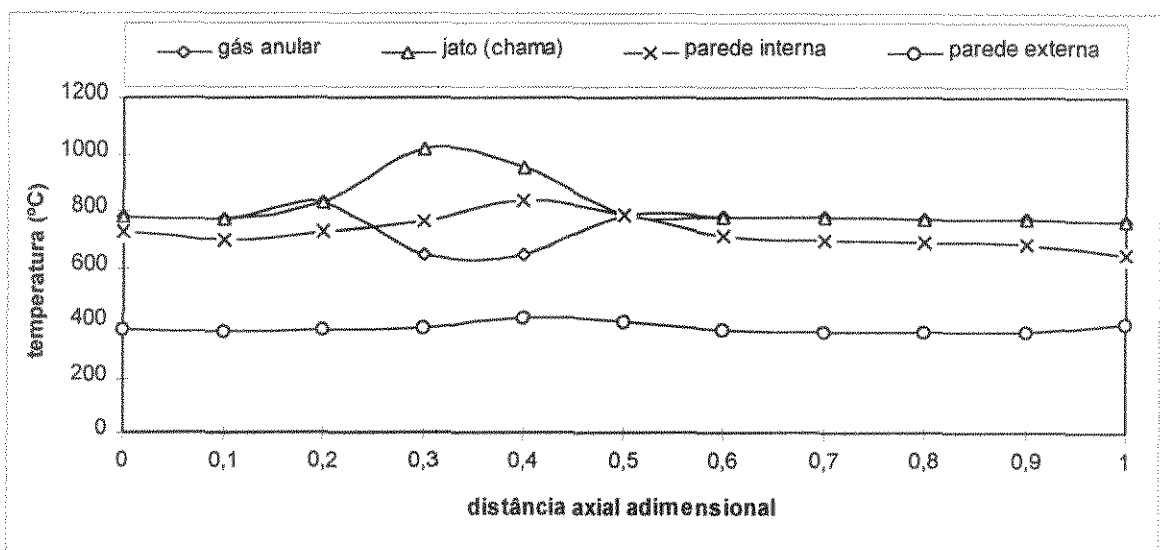


Figura 6.8: Perfis de temperaturas em função da distância axial adimensional para a câmara de combustão secundária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.

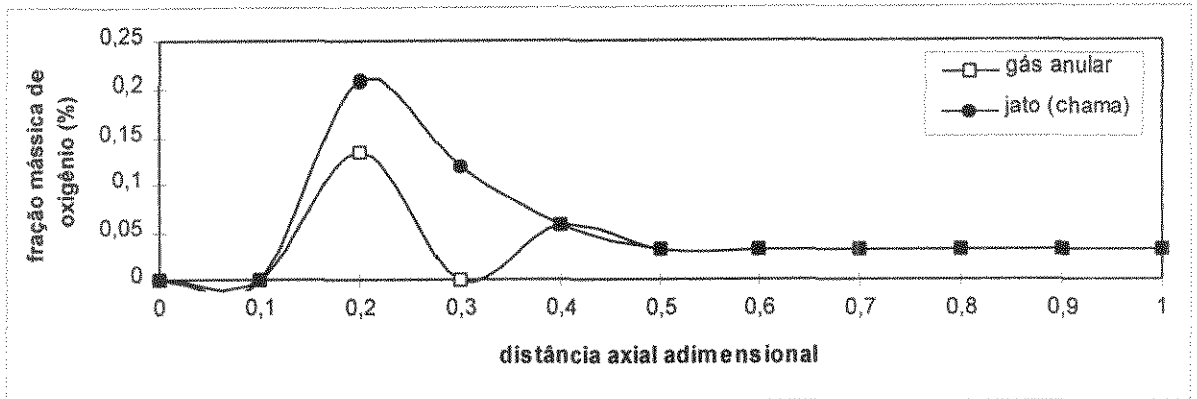


Figura 6.9: Fração de mássica de oxigênio em função da distância axial adimensional na câmara secundária expressa em %, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.

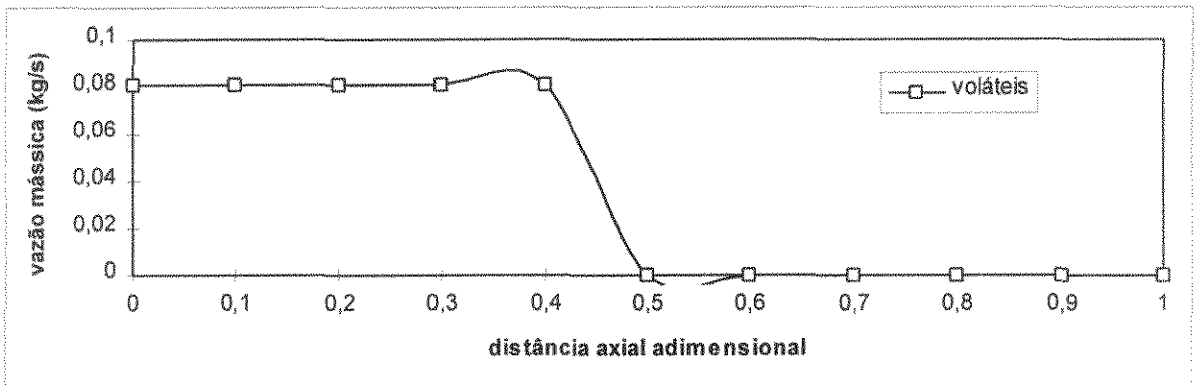


Figura 6.10: Vazão mássica de voláteis não oxidados em função da distância axial adimensionalizada, na câmara secundária, com vazão mássica de sólido de 0,400 kg/s.

6.3 Redução do consumo de combustível

As plantas de incineração têm em geral investido esforços no sentido de aumentar suas capacidades de processamento, atender aos padrões ambientais de emissão e de eficiência e principalmente, reduzir o custo operacional, que neste caso equivale a dizer reduzir o consumo de combustível auxiliar. Neste item, utiliza-se o modelo proposto para estudar a redução de consumo de combustível por duas vias: o pré-aquecimento do ar de combustão e o enriquecimento do ar primário de combustão com oxigênio.

Para tanto, emprega-se os parâmetros de projeto e operacionais de referência mencionado no capítulo 4, com alteração na vazão de ar secundário, de forma que a a fração mássica de oxigênio na saída da câmara seja 5,0%. Nestas condições, a temperatura dos gases na saída do forno é de 763,5 °C, para uma vazão de ar secundário de 3,011 kg/s, constituindo a nova condição de referência para este estudo. As variáveis vazões mássicas de combustível e de ar secundário foram manipuladas para as diversas condições até que a temperatura e a fração mássica de oxigênio na saída da câmara fossem as estabelecidas acima. As figuras 6.11 e 6.12 mostram os resultados em termos da redução de consumo de combustível em função do aumento da temperatura do ar primário e do aumento da fração mássica de oxigênio na alimentação, respectivamente.

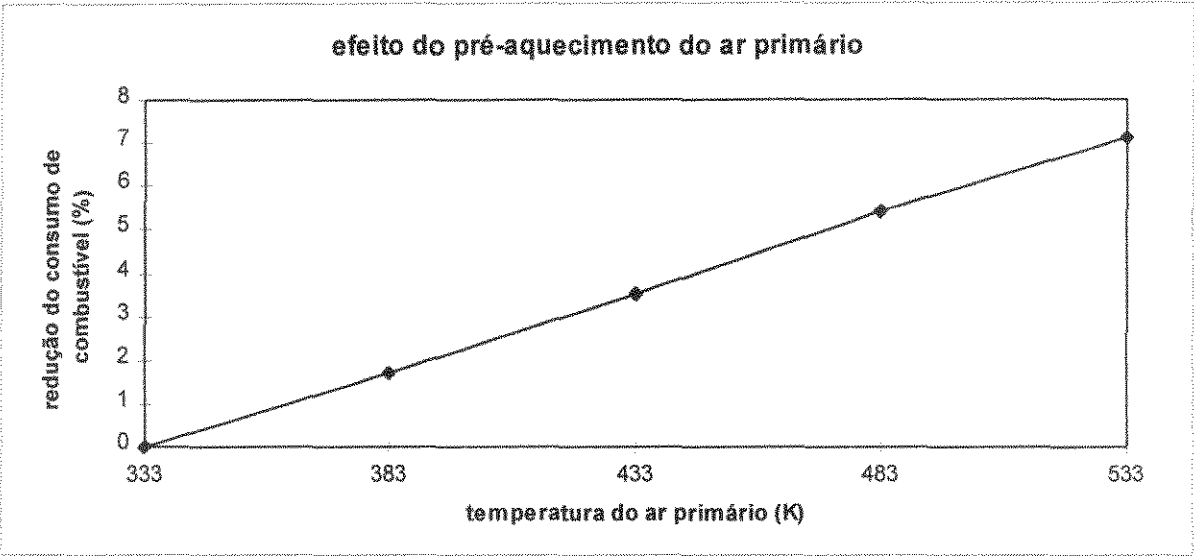


Figura 6.11: Efeito do pré-aquecimento do ar primário sobre a redução do consumo de combustível.

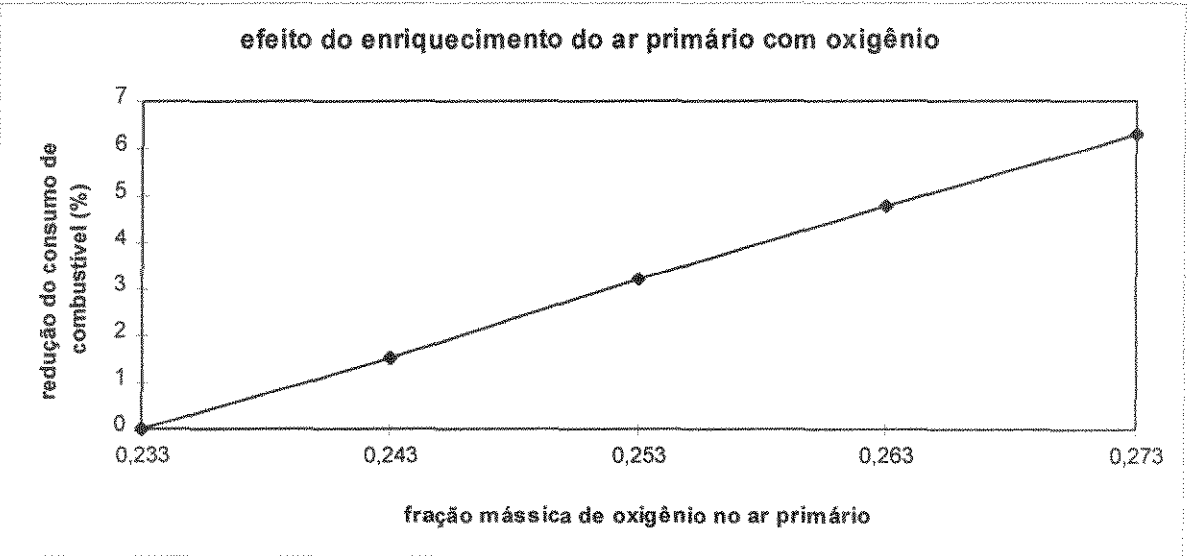


Figura 6.12: Efeito do enriquecimento do ar primário com oxigênio sobre a redução do consumo de combustível.

Observa-se que, pelas duas vias é possível obter-se uma redução significativa de consumo de combustível. Entretanto, o pré-aquecimento do ar aparenta ser uma alternativa mais atraente no caso em que é possível o pré-aquecimento do ar de combustão mediante a recuperação da energia entre o pós-combustor e o “quench”. Precauções devem ser tomadas no sentido de evitar que, com a recuperação da energia, a temperatura nos gases de combustão não fique abaixo da temperatura na qual pode ocorrer a formação de dioxinas. No caso do enriquecimento do ar primário com oxigênio, é necessária a realização de uma análise econômica pois há o custo associado ao suprimento de oxigênio que deve ser compensado pela redução do consumo de combustível.

6.4 Simulação em estado não estacionário de um incinerador de forno rotativo

Neste item, são apresentados os vários perfis de temperaturas resultantes da simulação em estado não estacionário de um incinerador de forno rotativo, para perturbações no estado estacionário de referência mencionado no capítulo 4.

a) Simulação do aquecimento do forno, sem resíduo sólido

Industrialmente, os fornos rotativos são aquecidos até o estado estacionário almejado mediante uma estratégia específica, com gradativa e lenta evolução da temperatura de forma a preservar a estrutura interna do refratário. Assim sendo, não deve haver degrau acentuado na alimentação de combustível durante esta fase. Entretanto, para avaliar a coerência dos resultados obtidos com o simulador desenvolvido neste trabalho, é realizada uma simulação para uma mudança drástica na alimentação de combustível, de um valor baixo de 0,030 kg/s para 0,100 kg/s, que é vazão de alimentação nas condições de referência, sem a alimentação de sólido. Esta situação assemelha-se a uma partida em condição hipotética em que não há a preocupação com a preservação do refratário. Não partiu-se da vazão nula, pois neste caso, as temperaturas iniciais seriam baixas e várias das hipóteses consideradas no modelo não seriam aplicáveis, especialmente as relacionadas com a radiação. As figuras 6.13 a 6.16 mostram os resultados desta simulação em termos de perfis de temperaturas.

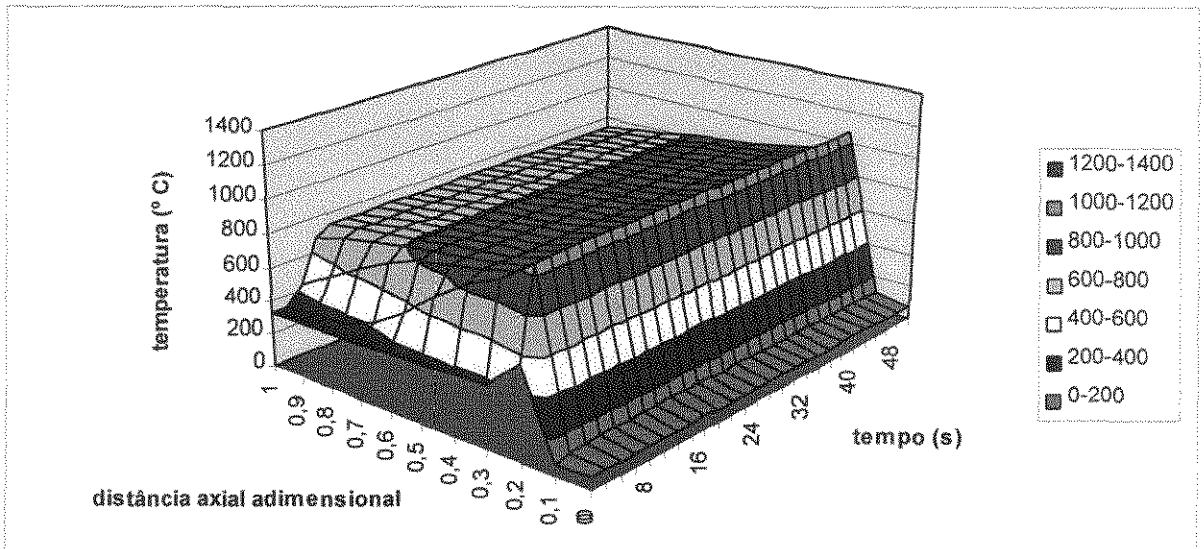


Figura 6.13: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura do jato, para a câmara primária.

Analisando-se as figuras 6.13 a 6.16, nota-se que as dinâmicas das correntes gasosas são, como esperado, muito mais rápidas do que a dinâmica da parede, representada pela figura 6.16. A dinâmica referente à parede com isolamento de material refratário, com alta capacitância térmica, manifesta-se através da variável temperatura da parede externa. A esta temperatura está associado o volume da parede de refratário e a correspondente capacitância térmica.

A temperatura da superfície interna da parede tem um comportamento dinâmico semelhante a dos gases. Segundo o modelo, a superfície interna da parede não tem volume, e portanto, a capacitância térmica correspondente é nula.

O emprego das variáveis temperaturas associadas às superfícies é necessário no desenvolvimento do modelo devido à predominância dos processos de transferência de calor por radiação.

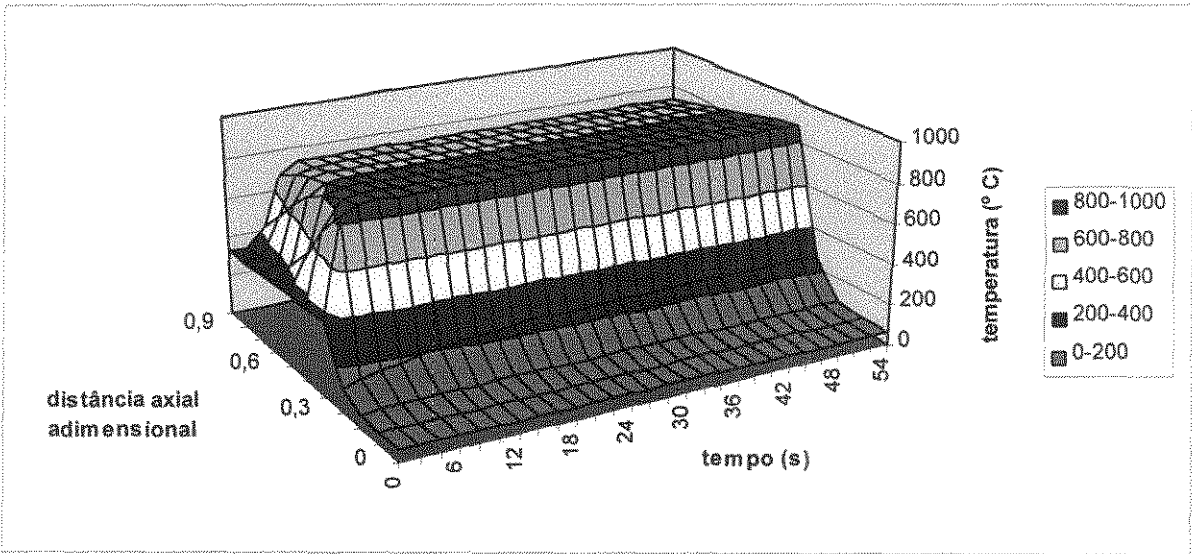


Figura 6.14: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura do gás, para a câmara primária.

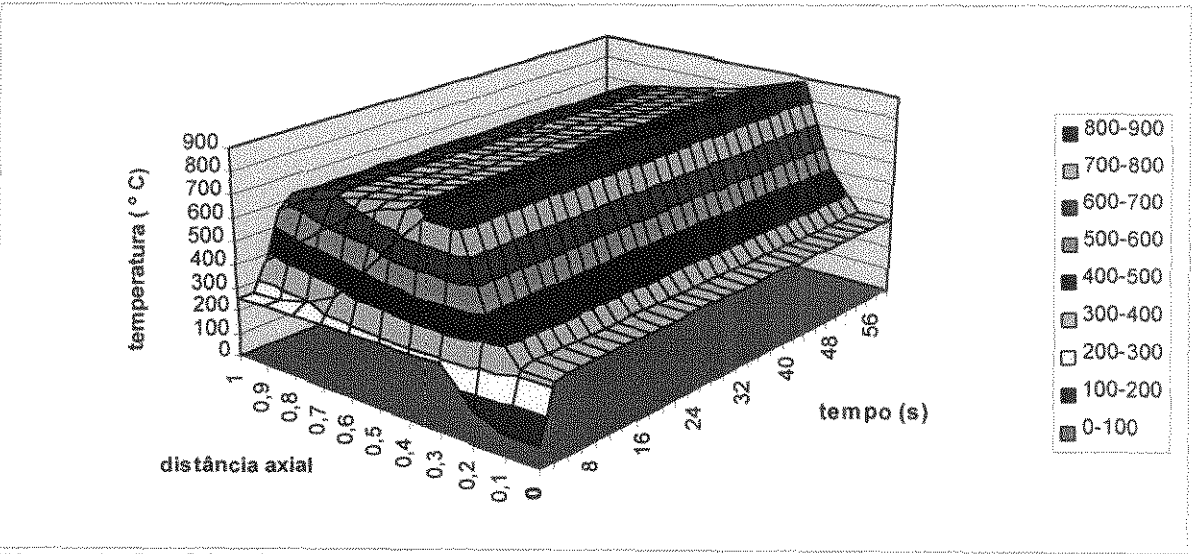


Figura 6.15: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura da parede interna, para a câmara primária.

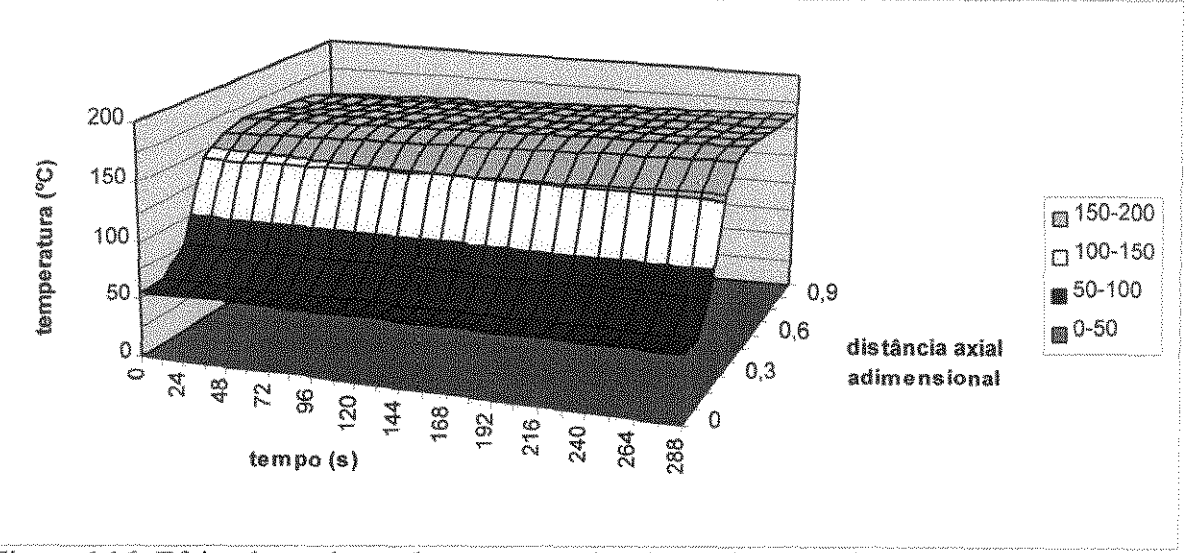


Figura 6.16: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,030 para 0,100 kg/s sobre a temperatura parede externa, para a câmara primária.

b) Efeito da redução da vazão de combustível

As figuras 6.17 a 6.21 apresentam as respostas dinâmicas em termos de perfis de temperaturas como efeitos da mudança da vazão mássica de 0,100 para 0,030 kg/s.

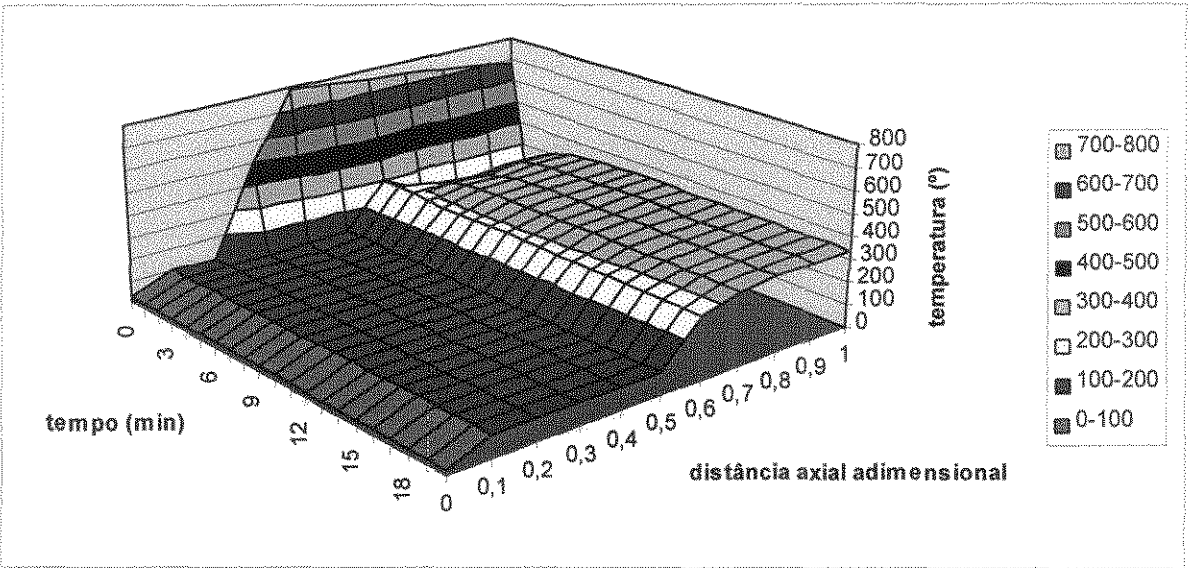


Figura 6.17: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.

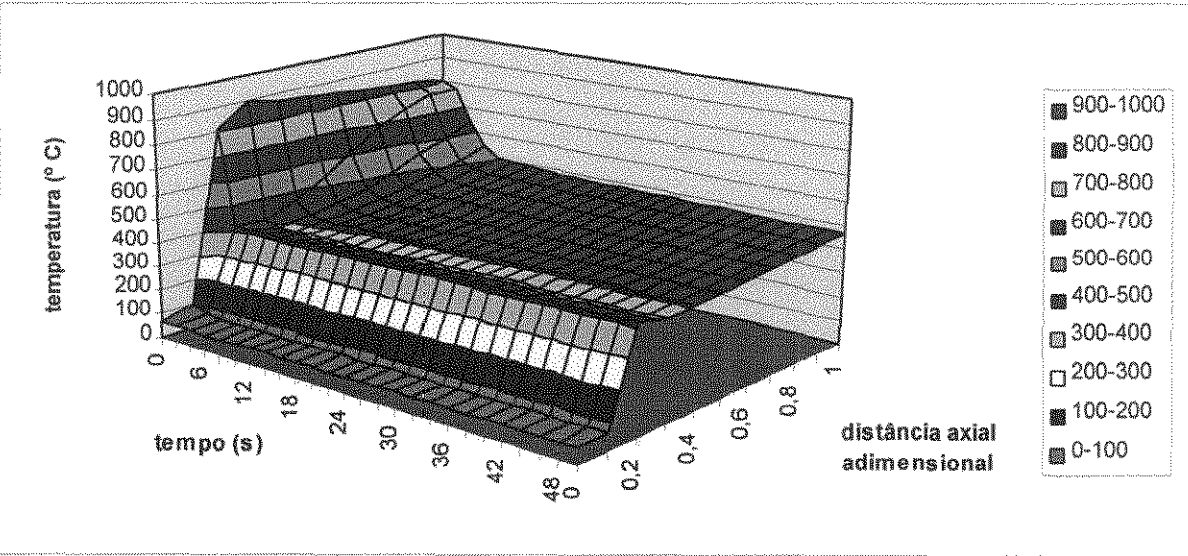


Figura 6.18: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.

As observações feitas no item “a” são igualmente válidas para este caso, acrescentando-se que, a exemplo da parede de refratário, a dinâmica do leito de sólido é, como esperado, mais lenta que a dos gases, como pode ser visto na figura 6.17. A figura 6.21 mostra que a resposta em termos de perfil de temperatura da parede externa , à perturbação em questão, é bastante lenta, demorando várias horas para o atingimento do novo estado estacionário.

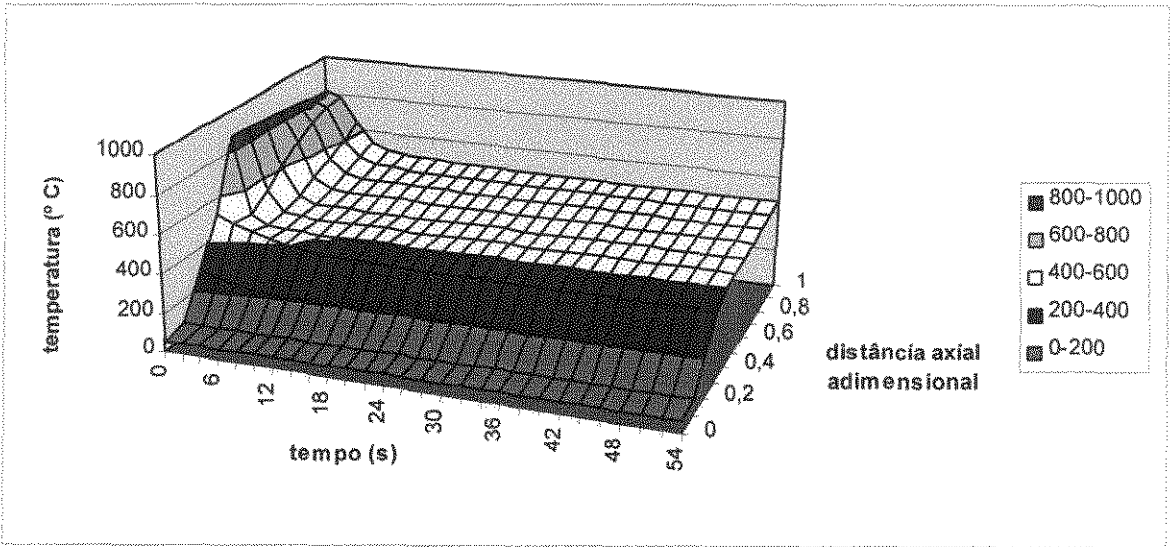


Figura 6.19: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.

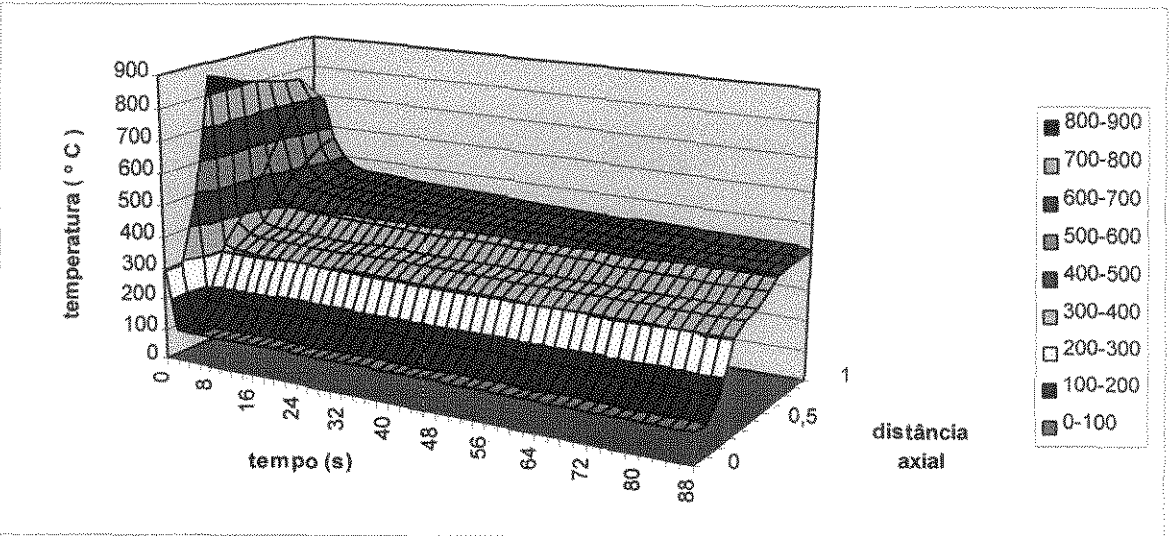


Figura 6.20: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura da parede interna ao longo do forno.

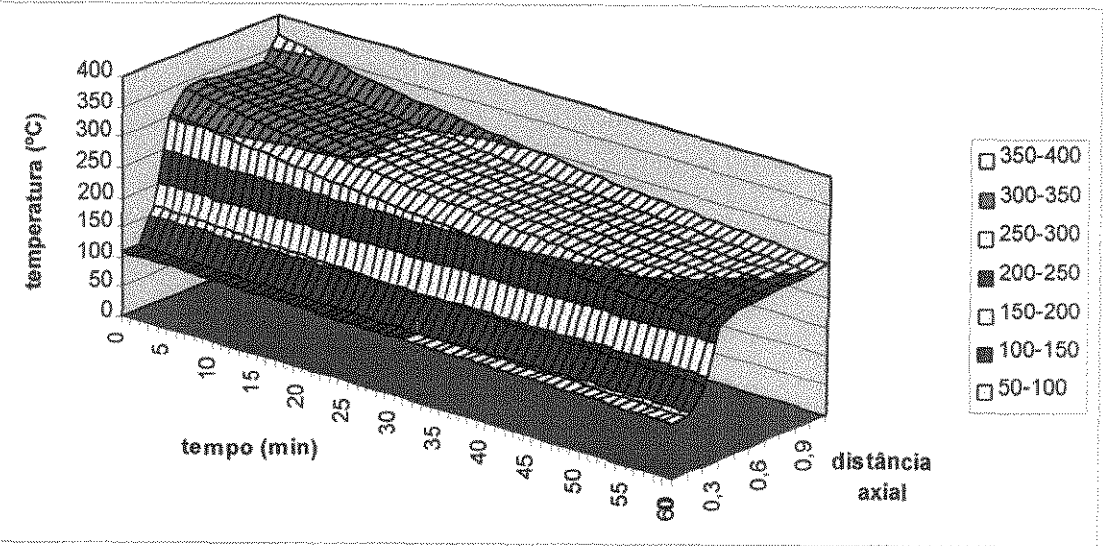


Figura 6.21: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,030 kg/s sobre o perfil de temperatura da parede externa ao longo do forno.

c) Efeito do aumento da vazão de combustível

As figuras 6.22 a 6.25, mostram os efeitos em termos de perfis de temperaturas do aumento da vazão de combustível auxiliar de 0,100 para 0,120 kg/s.

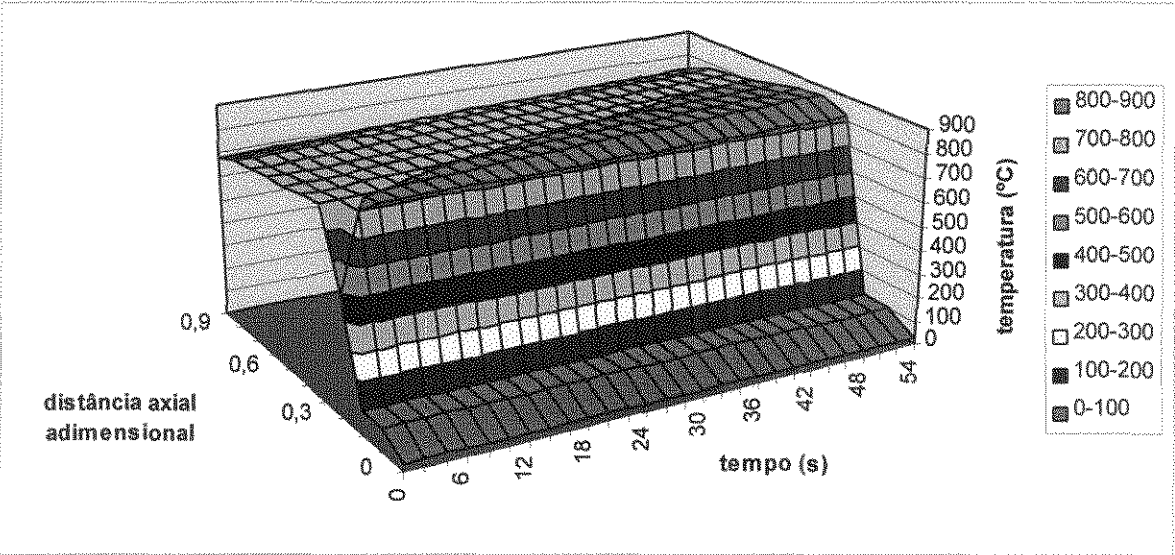


Figura 6.22: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.

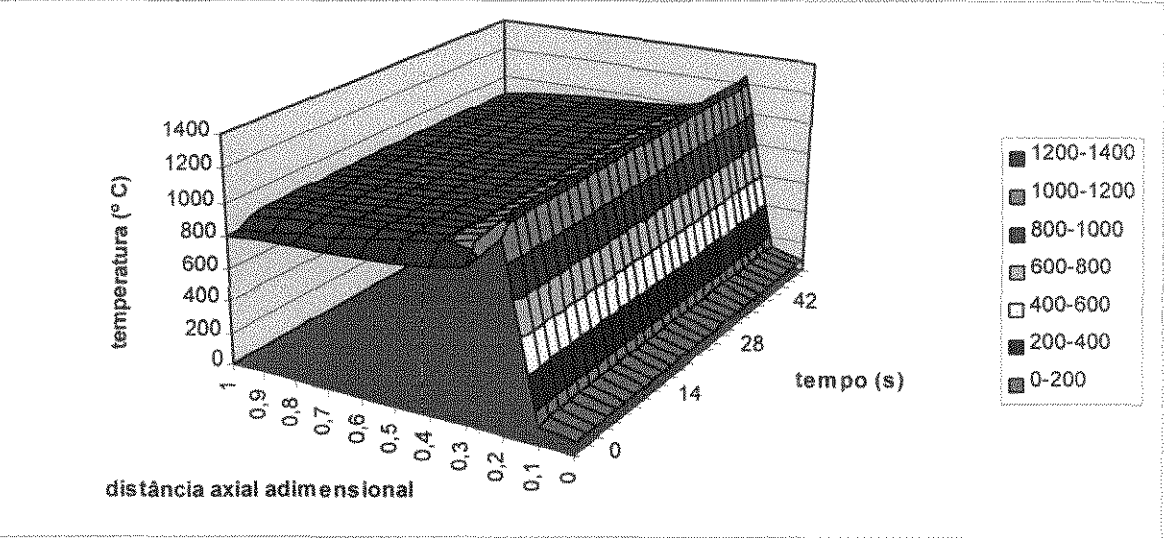


Figura 6.23: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.

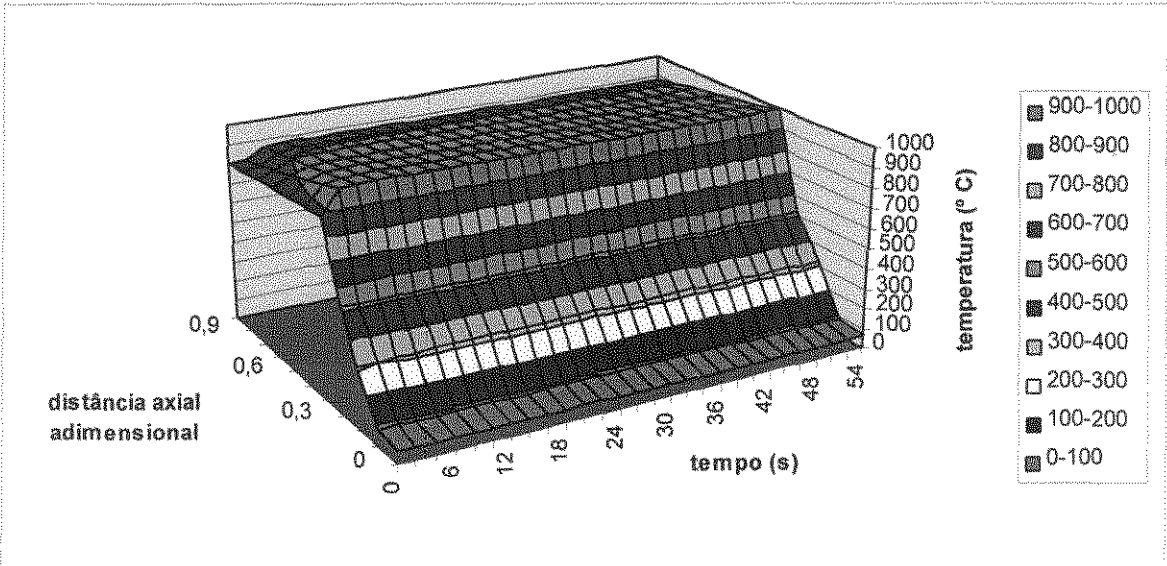


Figura 6.24: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.

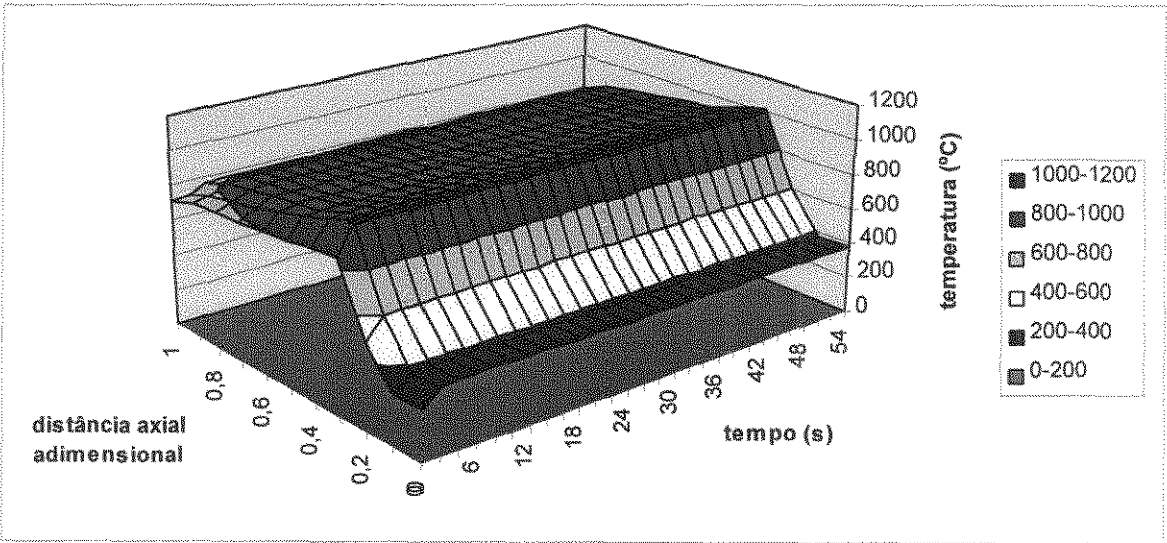


Figura 6.25: Efeito da mudança da vazão mássica de combustível de 0,100 para 0,120 kg/s sobre o perfil de temperatura parede interna ao longo do forno.

Da mesma forma que nos itens “a” e “b”, nota-se que a dinâmica é mais rápida para os gases e mais lenta para o leito de sólido devido às diferenças entre as capacidades térmicas.

d) Efeito das reduções simultâneas das vazões de combustível e de ar de combustão

As figura 6.26 a 6.29, mostram os resultados que representam os efeitos das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno), simultaneamente, sobre o perfis de temperaturas.

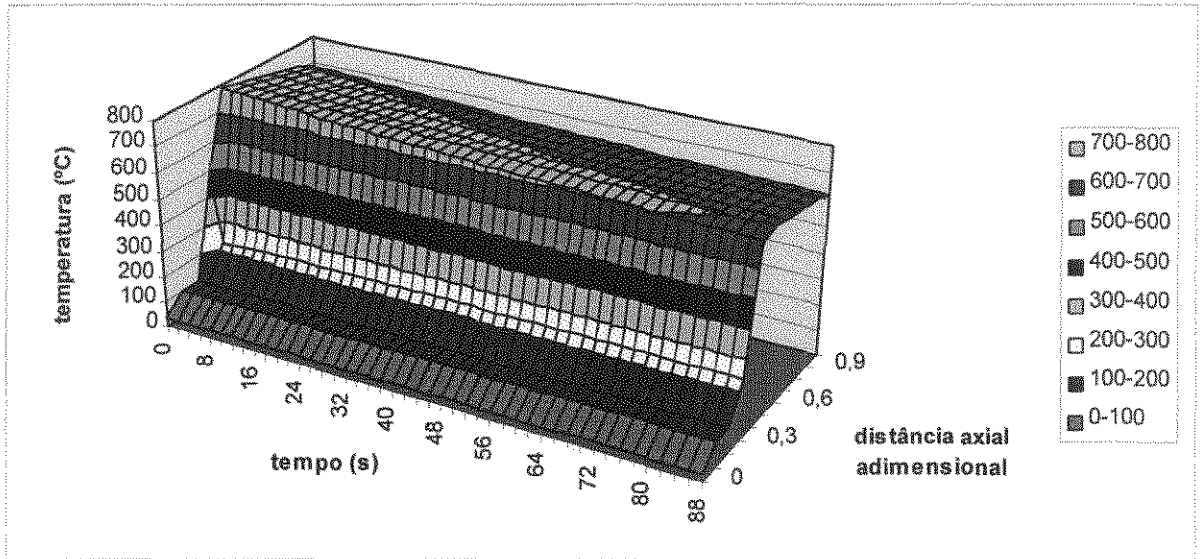


Figura 6.26: Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno) sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.

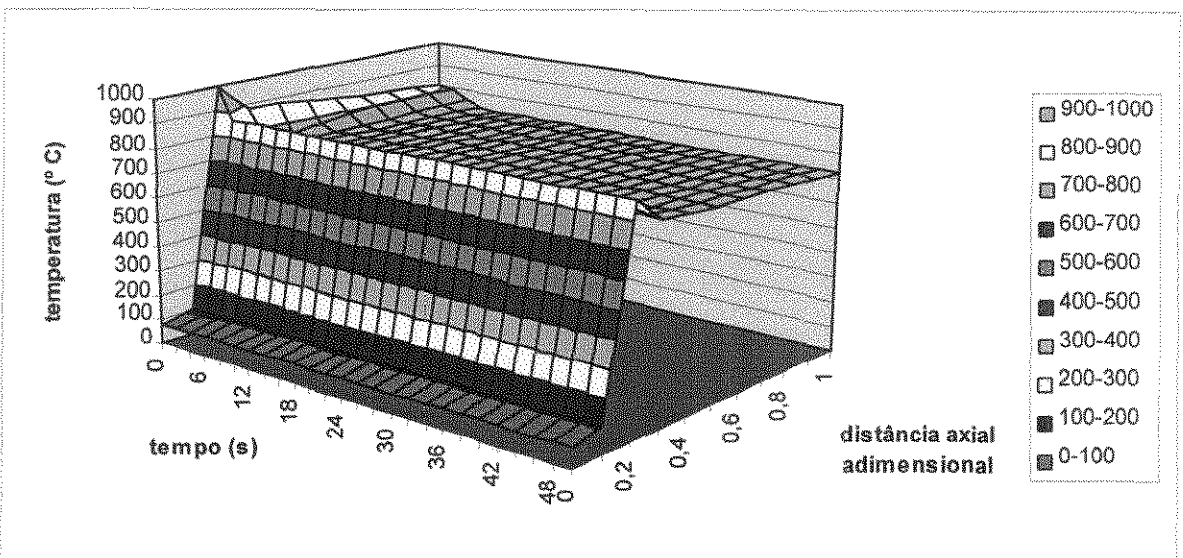


Figura 6.27: Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno) sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.

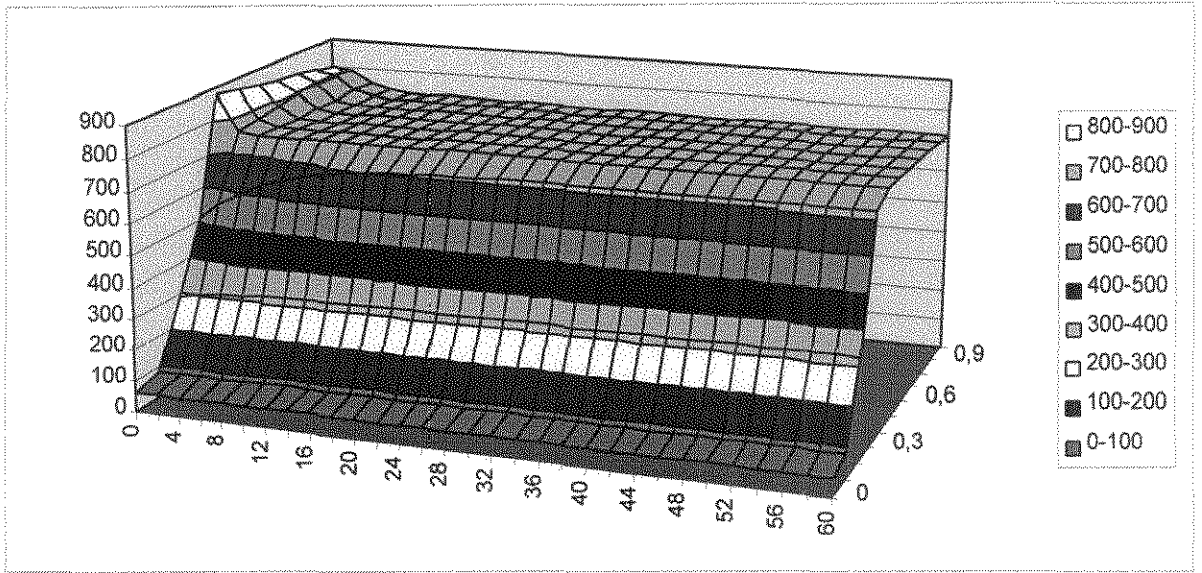


Figura 6.28: Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída do forno) sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.

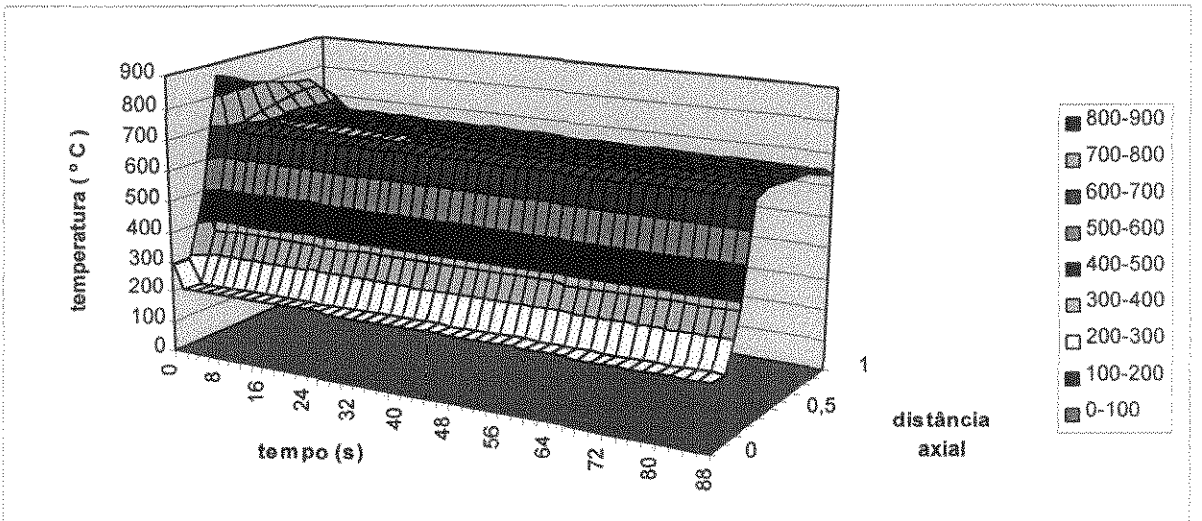


Figura 6.29: Efeito das mudanças das vazões mássicas de combustível de 0,100 para 0,070 kg/s e de ar de combustão de 3,5 para 2,992 kg/s (de 5,77% para 3% de oxigênio na saída) sobre o perfil de temperatura da parede interna ao longo do forno.

A mudança simultânea destas duas variáveis implica na redução da alimentação de combustível e comburente no forno e consequentemente a redução da geração de energia. Este efeito manifesta-se através da redução das temperaturas do gás, do leito de sólido e da parede da câmara, com dinâmicas diferentes em função das magnitudes distintas das capacitâncias térmicas, apresentando respostas mais lentas para o sólido do que para os gases.

e) Efeito do aumento do teor de umidade no resíduo

As figuras de 6.30 à 6.33 mostram os resultados que representam os efeitos do aumento do teor de umidade no resíduos de 16,7% para 35%, em massa, sobre os perfis de temperaturas ao longo do forno.

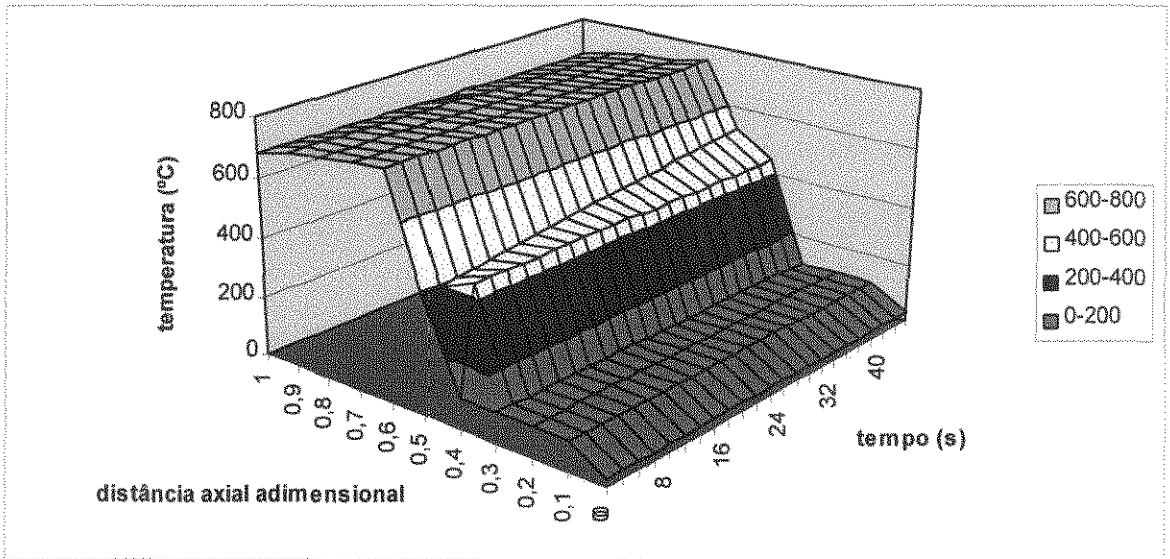


Figura 6.30: Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura do sólido ao longo do forno.

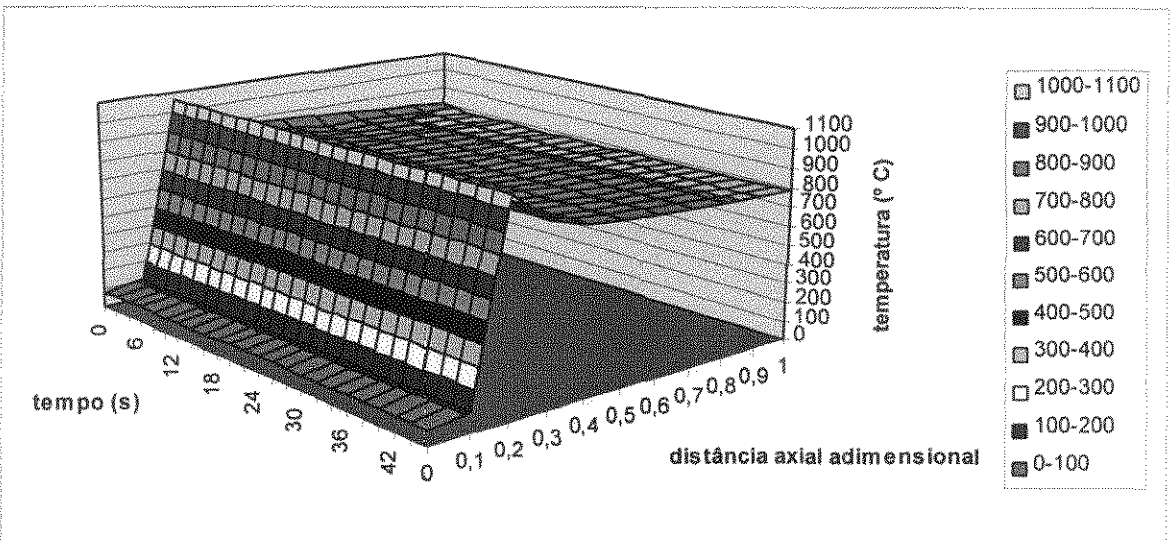


Figura 6.31: Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura do jato ao longo do forno.

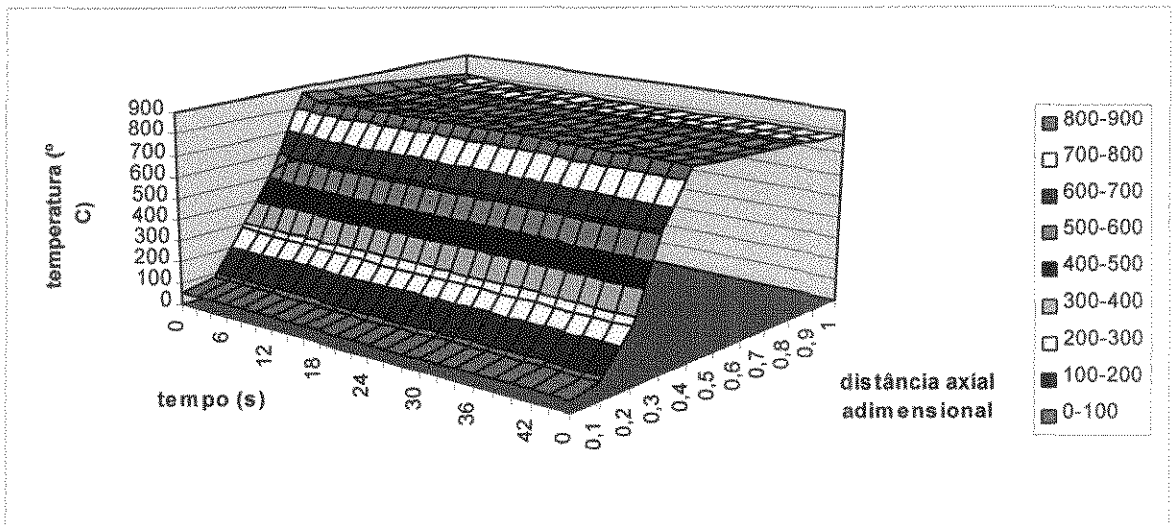


Figura 6.32: Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura do gás anular ao longo do forno.

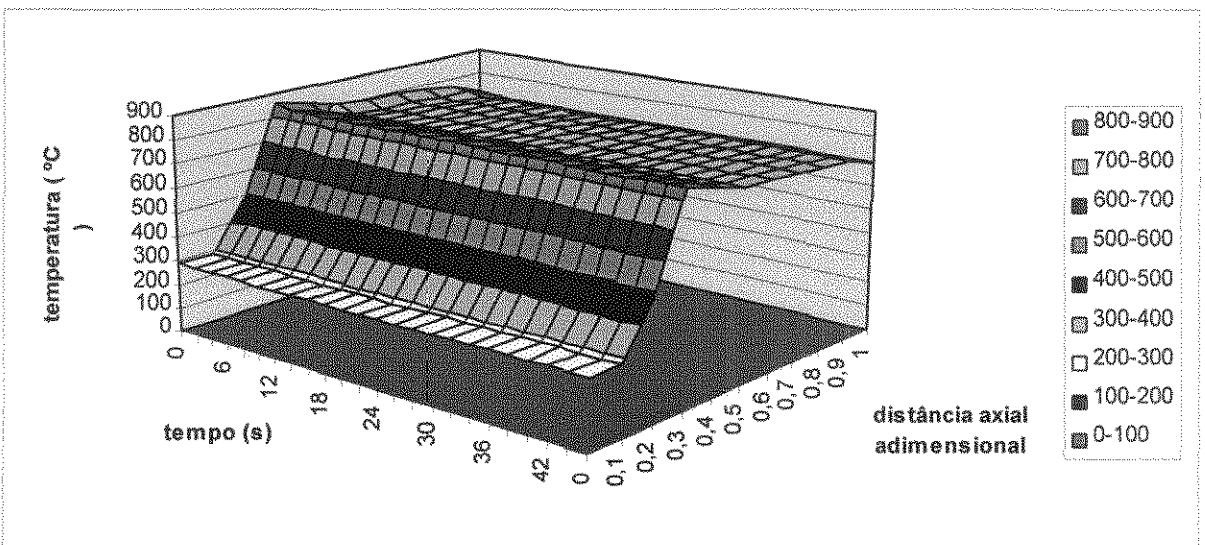


Figura 6.33: Efeito da mudança da fração mássica de umidade no sólido de 0,167 para 0,350 sobre o perfil de temperatura da parede interna ao longo do forno.

O aumento da fração mássica de umidade no sólido pode ser entendido como uma substituição de parte da fração orgânica com poder calorífico por água que consome energia para ter a sua temperatura elevada até a temperatura de combustão, passando por uma mudança de fase. Portanto os efeitos destas mudanças sobre as temperaturas observados nas figuras 6.30 a 6.33 revelam exatamente este fenômeno, ou seja, a redução da temperatura dos gases, pois há o consumo de energia para vaporizar e aquecer a água, e ainda o aumento da temperatura do sólido devido ao fato de que a quantidade de sólido remanescente após a perda da umidade é menor do que na situação inicial. As velocidades das respostas transientes são, da mesma forma que nos casos anteriores, mais rápidas para os gases e mais lenta para o sólido.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As conclusões relativas a este trabalho podem ser subdivididas em dois grupos: um sob uma visão mais geral, contextualizada na prática da incineração, e outro, sob a visão das efetivas contribuições do trabalho ao conhecimento científico envolvido no processo de incineração com fornos rotativos dotado de pós-combustor. Em ambas as abordagens, o presente trabalho traz contribuições importantes e cria perspectivas e orientações para novos estudos.

Contribuições à prática de incineração:

Planejamento de operação:

Do ponto de vista da prática da incineração, na qual encontram-se vários problemas devido à variabilidade dos resíduos e às altas temperaturas envolvidas, o presente trabalho contribui no sentido de permitir um planejamento rigoroso da operação do incinerador.

Isto pode ser melhor compreendido analisando-se as exigências de performances desses processos e as dificuldades práticas em manter a operação do equipamento sem transientes indesejáveis. Cada resíduo possui características diferentes em termos de composição química e principalmente de poder calorífico e de teor de umidade. Dependendo dessas características, as demandas de combustível auxiliar, ar primário e ar secundário variam, se uma mesma condição operacional (temperaturas e concentração de oxigênio na saída) em estado estacionário é desejado. O início da operação com a queima de um determinado resíduo, ou a mudança do resíduo alimentado são exemplos de situações nas quais há a alteração da demanda de combustível auxiliar e de ar de combustão. Se estas condições operacionais não estiverem adequadas, o incinerador poderá operar em regime transiente durante algum período, emitindo poluentes para a atmosfera acima dos limites estabelecidos legalmente. É desejável portanto, que haja um planejamento da operação com a previsão de mudanças antecipadas nas condições operacionais de forma a evitar esses transientes.

Geralmente, no Brasil, os resíduos que são destruídos nos incineradores de resíduos industriais são analisados quimicamente, sendo determinado a sua composição elementar, o seu teor de umidade e o seu poder calorífico. Com essas informações, e com o emprego do simulador desenvolvido neste trabalho, a operação do equipamento pode ser planejada, com a especificação das vazões necessárias de combustível auxiliar, ar primário, ar secundário e de resíduo, nas câmaras primária e secundária e os transientes indesejáveis podem ser minimizados ou até mesmo eliminados.

Operação otimizada:

Além do planejamento prévio da operação do incinerador para cada tipo de resíduo de forma a evitar os transientes indesejáveis, é possível fazê-lo de forma que proporcione uma performance otimizada do equipamento, objetivando, por exemplo, o mínimo consumo de combustível. Do ponto de vista de controle de processo, o modelo em estado não estacionário pode ser empregado para estudar a dinâmica do equipamento, assim como, podem ser testadas diferentes estratégias de

controle, visando uma operação otimizada; ou ainda, a aplicação em controle avançado, mediante o emprego de uma versão simplificada do modelo dinâmico desenvolvido.

Projeto, melhoria de processo, treinamento de operador:

A utilização do modelo matemático e do simulador em projetos de incineradores e em alterações de processos traz facilidades e qualidades nos resultados. As facilidades dizem respeito principalmente à possibilidade de se fazer com rapidez e precisão a análise de várias configurações geométricas e condições operacionais de acordo com as necessidades do projeto.

Essa possibilidade de exploração das condições operacionais e até mesmo dos limites inviáveis de serem testados na prática devido às implicações ambientais e de segurança pessoal ou de processo, permite o emprego do simulador para o treinamento de operadores.

Contribuições ao conhecimento científico:

Do ponto de vista científico, várias contribuições podem ser identificadas. Alguns trabalhos publicados na literatura sobre transferência de calor em fornos rotativos, especialmente os de Gorog et al.^{13,14,15} e de Silcox e Pershing⁶, mostram que há um conhecimento consolidado sobre os mecanismos de trocas de calor e sobre o método de cálculo empregando a analogia com circuitos elétricos. As aplicações destes modelos, entretanto, estão enfocados em transferência de calor em fornos rotativos, com simplificações em relação aos demais processos, como a destruição do resíduo e consequente redução de volume do leito.

Modelo realístico:

Na tentativa de aproximar-se o máximo possível do processo industrial, o modelo e o simulador desenvolvidos neste trabalho, considera em suas hipóteses vários aspectos que foram negligenciados ou simplificados nos trabalhos anteriores. Entre as hipóteses importantes no modelo, e que o fazem bastante realístico, estão a consideração da variação do volume do leito ao longo ao forno devido à perda de massa do sólido decorrente dos processos de pirólise, de destilação destrutiva e de volatilização, a aproximação da geometria da chama por cilindros de diâmetros que podem ser diferentes a cada zona, e a consideração da presença de substâncias oxidáveis dentro do sólido que sofrem combustão em fase gasosa.

Deve-se ressaltar também, a abrangência do estudo, que considera o processo de incineração na sua totalidade, isto é, o forno rotativo dotado de pós-combustor, com alimentação de resíduo sólido na câmara primária e injeção de resíduo líquido na câmara secundária, nos estados estacionário e não estacionário.

Inovações no modelo para o cálculo das taxas de transferência de calor:

Com relação aos processos de transferência de calor e aos cálculos das taxas de trocas, algumas modificações foram introduzidas em relação ao proposto por Silcox e Pershing⁶, que são a consideração das trocas radiativas entre a segunda zona e a parede do queimador; a dependência das propriedades físicas com a temperatura e a composição; o cálculo, e não o pré-estabelecimento da temperatura da última seção transversal da última zona; e a variação dos fatores de forma,

calculados para cada zona, devido às variações das áreas das superfícies expostas à radiação (parede interna, sólido e chama).

Os trabalhos de Silcox e Pershing⁶ e de Fudihara¹⁶ se detiveram na aplicação do modelo de transferência de calor em fornos rotativos destinados à queima de resíduos nos quais os orgânicos presentes são contaminantes em quantidades desprezíveis para este tipo de análise. Portanto, esses trabalhos não consideraram a redução do volume do leito ao longo da câmara, nem mesmo devido à perda de umidade. Além disso, consideraram as propriedades físicas constantes, a chama de forma cilíndrica com diâmetro constante ao longo de todo forno e calcularam as distribuições de temperaturas, especificando as temperaturas das extremidades. Os estudos de sensibilidade paramétrica realizado neste trabalho, mostraram claramente a importância das considerações das variações das propriedades físicas com a temperatura e composição, assim como a importância da geometria da chama.

Estudo de sensibilidade paramétrica:

Foram analisados os efeitos das variações negativas e positivas de 10% em 21 parâmetros sobre os perfis axiais de temperaturas no incinerador, considerando-se as câmaras primária e secundária. As variações nos parâmetros capacidade calorífica do gás anular, capacidade calorífica do jato e condutividade térmica da parede provocam efeitos muito significativos sobre as distribuições das temperaturas ao longo da câmara, superiores a 1% e atingindo várias unidades percentuais.

As variações nos parâmetros emissividades do sólido, da parede externa, da parede interna, da chama e do gás provocam efeitos moderadamente significativos, em torno de 1% ou menores. As variações nos demais parâmetros, provocam efeitos pouco significativos sobre as distribuições das temperaturas ao longo da câmara, em torno de 0,1% ou menores.

Para os coeficientes de transferência de calor convectivo, em relação aos quais há os maiores graus de incerteza quanto a sua estimativa, foram analisados os efeitos das variações negativas e positivas de 50% sobre as distribuições de temperaturas ao longo da câmara de combustão.

Verificou-se que, em termos das temperaturas dos gases na última seção da câmara primária, para variações positivas e negativas de 50% nos coeficientes de película, os efeitos não foram superiores a 0,35%. Isto significa dizer que, apesar dos graus de incertezas consideráveis nas estimativas desses parâmetros, estes influenciam pouco nos resultados finais da simulação, principalmente em relação às variáveis mais importantes.

A importância das capacidades caloríficas da jato e do gás anular, pode ser compreendida pelo fato de que as correntes do jato e do gás anular correspondem às maiores vazões mássicas do processo em questão, associado ao fato de que esta propriedade termodinâmica tem sempre grande influência nos processos em que ocorrem grandes taxas de transferência de calor com fluxos de massa, como é o presente caso.

As capacidades caloríficas das outras correntes, ou seja, do sólido seco, das substâncias voláteis, do resíduo líquido, e do combustível, apresentam efeitos pouco significativos sobre as distribuições de temperaturas. Embora haja a destacada importância desta propriedade termodinâmica, neste caso, ela torna-se pouco significativa pois diz respeito à correntes que correspondem à uma fração pequena ou relativamente pequena da vazão mássica global, e ainda, que existem apenas em alguns trechos das câmaras, pois são consumidas e incorporadas às correntes de jato e gás anular.

A condutividade térmica da parede de refratário da câmara, é também um parâmetro importante, embora provoque efeitos menores que aqueles provocados pelas capacidades

caloríficas. Isto é justificado pelo fato de que trata-se de um processo com elevadas temperatura e de grandes áreas de trocas térmicas com o ambiente.

A importância mais significativa das emissividades do que dos coeficientes de película, justifica-se pelo fato de que trata-se de um processo onde ocorrem altas temperaturas e o principal processo de transferência de calor é a radiação térmica e não a convecção.

Estudo da influência das considerações relacionadas com a chama e à combustão do sólido:

Além do estudo de sensibilidade paramétrica, estudou-se também as influências de várias formas de aproximações para a geometria da chama e para as curvas de taxas de entrada de gás na chama e de redução de massa de sólido.

O estudo desenvolvido neste item 4.4. tem grande importância para a definição do que é necessário aprimorar para que o modelo e o simulador desenvolvidos neste trabalho aproximem-se ainda mais da realidade das plantas industriais.

Dentre as três variáveis estudadas, as aproximações para a geometria da chama e as distribuições de taxas de entrada de gás na chama são as que se apresentam com maiores possibilidades de proporcionar um refinamento dos resultados da simulação. Estas duas variáveis estão interrelacionadas pela fluido-dinâmica da chama, que para combustíveis auxiliares líquidos ultraviscosos utilizados no Brasil, não há estudos conclusivos publicados na literatura.

Quanto à taxa de redução de massa de sólido, em relação à qual está associada grande grau de incerteza devido à natureza heterogênea dos resíduos sólidos e ao fato de que na maioria das vezes a composição molecular é desconhecida, a escolha do conjunto de dados influenciou de forma moderadamente significativa os resultados finais, especialmente a temperatura dos gases. À luz dos resultados obtidos e do grau de incerteza e de desconhecimento associado aos resíduos sólidos, conclui-se que qualquer um dos conjuntos de dados de redução de massa dos resíduos sólidos estudados, produzem resultados satisfatórios na simulação da câmara de combustão primária.

Redução do consumo de combustível

Com o intuito de exemplificar o potencialidade de emprego do presente trabalho, estudou-se os efeitos do pré-aquecimento do ar de combustão e do enriquecimento de do ar combustão com oxigênio sobre os perfis de temperaturas para um incinerador industrial típico, com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e o custo operacional das plantas de incineração.

Observou-se que, pelas duas vias é possível obter-se uma redução significativa de consumo de combustível. Entretanto, o pré-aquecimento do ar aparenta ser uma alternativa mais atraente no caso em que o mesmo é possível mediante a recuperação da energia entre o pós-combustor e o “quench”. No caso do enriquecimento do ar primário com oxigênio, é necessária a realização de uma análise econômica pois há o custo associado ao suprimento de oxigênio que deve ser compensado pela redução do consumo de combustível.

Estado não-estacionário:

O modelo em estado não estacionário desenvolvido no presente trabalho considera os transientes relacionados com os balanços de energia nas correntes de gases (gás anular e jato ou chama) e de resíduo sólido e na parede do forno. Os transientes relacionados com os fluxos de massas são considerados muito rápidos quando comparados com aqueles relacionados com os fluxos de energia, e portanto não são computados.

Os resultados obtidos e apresentados no capítulo 6 mostram-se coerentes, onde observa-se respostas rápidas em termos de temperaturas dos gases (gás anular e chama) e respostas lentas para a parede do forno e para o leito de sólido, que possuem alta capacitância térmica.

Aspectos gerais:

De forma geral, o trabalho desenvolvido atingiu os objetivos propostos, em que foi desenvolvido um modelo matemático para um incinerador industrial amplamente empregado no Brasil e no mundo, e de grande importância dentro da ciência ambiental. O modelo considera de forma bastante abrangente os diversos aspectos envolvidos nos incineradores industriais e nas características dos resíduos, resultando num simulador que pode, de fato, ser empregado industrialmente.

Com relação ao simulador propriamente, desenvolvido em código FORTRAN, mostrou-se bastante robusto, especialmente para simulação em estado estacionário.

Embora não tenha sido feito a validação do modelo através de comparação quantitativa com dados industriais, os resultados obtidos para as diversas simulações realizadas mostraram-se muito coerentes e de acordo com o encontrado tipicamente na indústria e na literatura.

Sugestões para trabalhos futuros:

A realização deste trabalho criou, como esperado, perspectivas de novos estudos, podendo trazer ainda mais contribuições importantes ao conhecimento do processo de incineração, como os sugeridos abaixo:

- validação do modelo mediante a comparação com dados industriais;
- a estimativa da taxa de entrada de gás na chama a partir do gás anular e da geometria da chama, em função de outras variáveis como vazões de ar de combustão e de combustível auxiliar e geometria do bico aspersor, através do estudo da fluidodinâmica da chama;
- a inclusão de um modelo de equação de taxa cinética de oxidação de monóxido de carbono e de um modelo de equilíbrio termodinâmico, com estudo comparativo entre ambos;
- o estudo de eficiência de destruição de orgânicos de difícil queima como o tetracloreto de carbono, utilizando equações da taxa da literatura, comparando com dados industriais de testes de queima;
- estudo de estratégias de controle empregando o modelo dinâmico desenvolvido no presente trabalho;
- simplificação do modelo dinâmico para uso em controle avançado e otimização em tempo real;
- desenvolvimento de uma interface amigável para o simulador objetivando a aplicação industrial em projeto, apoio operacional e treinamento.

APÊNDICES

APÊNDICE A :
ÁREAS DE TROCAS TÉRMICAS

APÊNDICE A: ÁREAS DE TROCAS TÉRMICAS

1. Introdução:

Neste apêndice, apresenta-se os procedimentos para os cálculos das áreas de trocas térmicas no forno rotativo, para uma determinada zona i . Estas áreas variam ao longo do eixo axial da câmara primária devido à variação da altura do leito de sólido. Já na câmara de combustão secundária, o conjunto dos valores das áreas permanecem inalteradas de uma zona para outra, uma vez que não há a presença do sólido.

2. Estimativa da área média da seção transversal ocupada pelo sólido:

A partir das vazões mássicas de sólido e umidade associados calculadas a cada zona, e do tempo de residência do sólido no forno, pode-se estimar a área transversal do leito de resíduo sólido, utilizando-se a seguinte equação:

$$Ats = \frac{\text{vazão má ssa de sólido e umidade}}{\rho_s \Delta z} \text{ tres} \quad (\text{A.1})$$

A vazão mássica de sólido utilizada nesta equação é a média aritmética entre as vazões que entram e que saem da zona i . Assim sendo, a área média da seção transversal ocupada pelo sólido pode ser expressa por:

$$Ats = \frac{\frac{(Mss(i) + Mag(i) + Mss(i+1) + Mag(i+1))}{2}}{\rho_s \Delta z} \text{ tres} \quad (\text{A.2})$$

3. Cálculo da altura do leito de sólido:

A área transversal do leito do sólido corresponde geometricamente à área do segmento determinado pelo arco e pela corda subtendidos pelo ângulo β , conforme pode ser visto na figura A.2.

A área do segmento pode ser calculado como a diferença entre a área do setor determinado pelo ângulo β , e a área do triângulo isósceles cuja base é a corda determinada pelo mesmo ângulo. Desta forma temos:

$$Ats = r_m^2 a \cos\left(\frac{r_m - H}{H}\right) - (r_m - H)(2r_m H - H^2)^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

A altura do leito de sólido pode ser obtida através de solução numérica da equação acima para a variável H . Pode ser utilizado para tal, o método de Newton-Raphson:

$$H_{k+1} = H_k - \frac{f(H_k)}{\frac{df(H_k)}{dH_k}} \quad (\text{A.4})$$

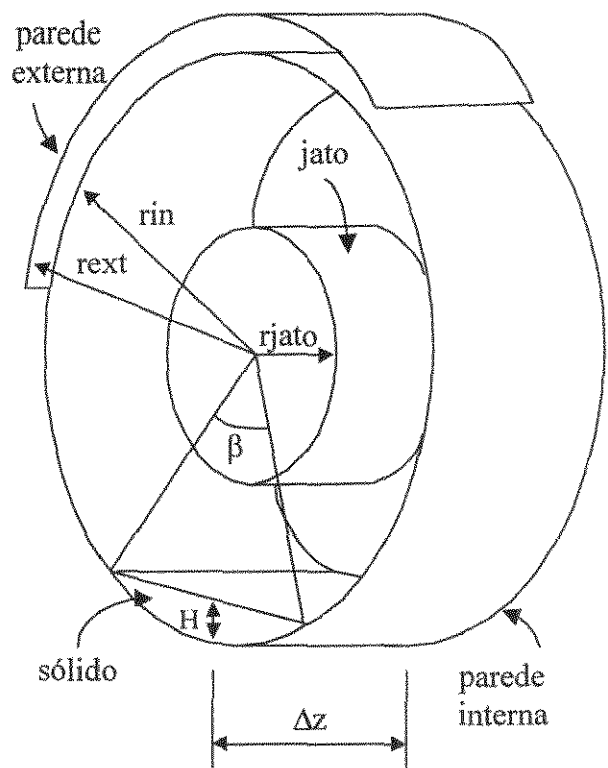


Figura A.1: Esquema da geometria do modelo adotado com as superfícies de trocas térmicas.

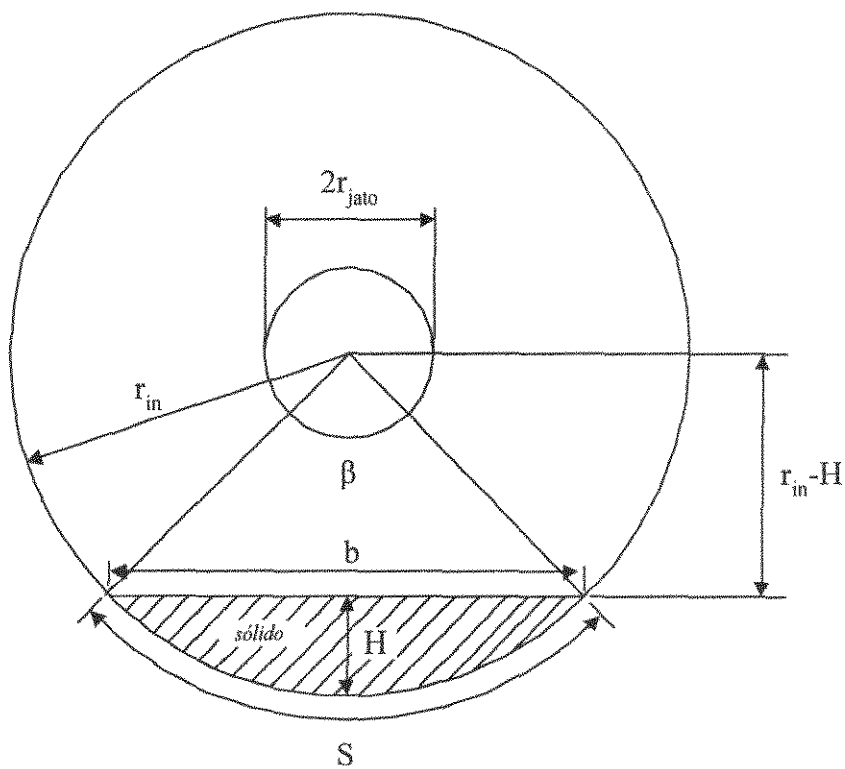


Figura A.2: Dimensões do forno rotativo

em que:

$$f(H_k) = r_m^2 a \cos\left(\frac{r_m - H_k}{H_k}\right) - (r_m - H_k)(2r_m H_k - H_k^2)^{1/2} - A t_s \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \frac{df(H_k)}{dH_k} &= r_m^2 \frac{d}{dH_k} \left[a \cos\left(\frac{r_m - H_k}{H_k}\right) \right] - \frac{d}{dH_k} \left[(r_m - H_k)(2r_m H_k - H_k^2)^{1/2} \right] = \\ &= \frac{r_m^2}{\sqrt{2r_m H - H^2}} - \frac{(r_m - H_k)^2}{\sqrt{2r_m H - H^2}} + \sqrt{2r_m H_k - H_k^2} = \\ &= \frac{2r_m H_k - H_k^2}{\sqrt{2r_m H_k - H_k^2}} + \sqrt{2r_m H_k - H_k^2} = 2\sqrt{2r_m H_k - H_k^2} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Portanto:

$$\frac{df(H_k)}{dH_k} = 2\sqrt{2r_m H_k - H_k^2} \quad (\text{A.7})$$

4. Ângulo Central determinado pelo resíduo sólido:

$$\beta = 2a \cos\left(\frac{r_m - H}{H}\right) \quad (\text{A.8})$$

5. Comprimento do arco subtendido pelo ângulo central :

$$S = r_m \beta \quad (\text{A.9})$$

6. Comprimento da corda subtendida pelo ângulo central:

$$b = 2\sqrt{2r_m H - H^2} \quad (\text{A.10})$$

7. Área exposta da parede interna (excusive a área coberta pelo sólido):

$$A_p = r_m \Delta z (2\pi - \beta) \quad (\text{A.11})$$

8. Área da parede interna coberta pelo sólido:

$$A_{cob} = r_m \Delta z \beta \quad (\text{A.12})$$

9. Área superficial plana do sólido :

$$A_s = b \cdot \Delta z = 2\sqrt{2r_m H - H^2} \Delta z \quad (\text{A.13})$$

APÊNDICE B:

**ESTEQUIOMETRIAS DAS COMBUSTÕES DOS
RESÍDUOS E DO COMBUSTÍVEL**

APÊNDICE B:
ESTEQUIOMETRIAS DAS COMBUSTÕES DOS RESÍDUOS E DO
COMBUSTÍVEL

1. Introdução:

Os resíduos normalmente destinados para a incineração, são compostos, em geral, de uma fração orgânica, uma fração inorgânica e umidade. Na fração orgânica, estão os compostos que conferem ao resíduo um poder calorífico e que o torna passível de incineração. A fração inorgânica contém compostos que podem transformar-se quimicamente durante o processo, por exemplo, formação de gases halogenados, com reduções de massa muito inferiores a da fração orgânica. A volatilização dos metais, embora seja um dos aspectos mais importantes do ponto de vista ambiental, é desprezível no balanço massa global. A umidade do resíduo é uma das características mais importantes de um resíduo, podendo ser um fator de determinação da viabilidade ou não da incineração do mesmo.

2. Composição dos resíduos.

Um resíduo para fins de incineração, é normalmente representado pela sua composição elementar incluindo os halogêneos, carbono, enxofre e uma série de 14 metais, além da umidade, teor de cinzas e do poder calorífico. Para fins de simulação numérica de acordo com os objetivos deste trabalho, um resíduo pode ser bem caracterizado em termos dos seguintes componentes: carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio, oxigênio, cloro, flúor, bromo, iodo, fósforo, umidade e cinzas.

No modelo, a umidade do resíduo é tratada como uma corrente a parte, porém associada à corrente de sólido seco. Isto traz facilidades no desenvolvimento do modelo matemático e também compatibiliza os dados de entrada, principalmente da composição dos resíduos, que normalmente é fornecida em base seca, sendo o teor de umidade como um dado adicional.

A tabela B.1 abaixo procura organizar os dados de composição dos resíduos e do combustível de uma forma uniformizada no intuito de proporcionar facilidades computacionais.

O combustível auxiliar pode ser caracterizado de uma forma mais simples, ou seja, através da composição elementar de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre e pelo seu poder calorífico.

Tabela B.1: Composição elementar nos resíduos e no combustível auxiliar.

índice (j)	componente	combustível (k=1)	resíduo sólido (k=2)	resíduo líquido (k=3)
1	C	CC(1,1)	CC(1,2)	CC(1,3)
2	H	CC(2,1)	CC(2,2)	CC(2,3)
3	S	CC(3,1)	CC(3,2)	CC(3,3)
4	N	CC(4,1)	CC(4,2)	CC(4,3)
5	P	CC(5,1)	CC(5,2)	CC(5,3)
6	Cl	CC(6,1)	CC(6,2)	CC(6,3)
7	F	CC(7,1)	CC(7,2)	CC(7,3)
8	Br	CC(8,1)	CC(8,2)	CC(8,3)
9	I	CC(9,1)	CC(9,2)	CC(9,3)
10	O	CC(10,1)	CC(10,2)	CC(10,3)

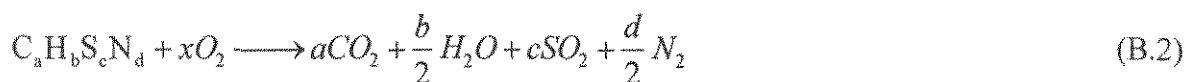
Na tabela A.1, $CC(j, k)$ é a composição elementar do componente “j” no combustível ou no resíduo denotado por “k”, cuja unidade é kg do componente/kg do combustível ou resíduo.

3. Fator de geração dos produtos de combustão:

A partir da composição elementar do resíduo ou do combustível, pode-se calcular a massa gerada de cada produto de combustão por unidade de massa de resíduo ou combustível queimado. Esta relação de *fator de geração de produtos de combustão*, será definida como:

$$FM(i) = \frac{\text{massa do produto de combustão } i \text{ produzido}}{\text{massa de combustível ou resíduo consumido}} \quad (B.1)$$

Se o combustível pode ser representado por $C_aH_bS_cN_d$, então a estequiometria da combustão completa do mesmo é:



A fração $FM(i)$ para o CO_2 é portanto:

$$FM(CO_2) = \frac{\text{massa de } CO_2 \text{ produzido}}{\text{massa de combustível consumido}}$$

que é equivalente a:

$$FM(CO_2) = \frac{(\text{Massa de } CO_2 \text{ produzido})}{(\text{Massa de C no combustível})} \cdot \frac{(\text{Massa de C no combustível})}{(\text{massa de combustível})} \quad (B.3)$$

Portanto:

$$FM(CO_2) = \left(\frac{a \cdot M(CO_2)}{aM(C)} \right) x(C) \quad (B.4)$$

em que $x(C)$ representa a fração mássica de carbono no combustível e $M(j)$ a massa molecular do componente “j”.

Ou seja:

$$FM(CO_2) = \left(\frac{x(C)}{M(C)} \right) M(CO_2) \quad (B.5)$$

Analogamente, para os outros produtos de combustão, obtem-se:

$$FM(H_2O) = \left(\frac{1}{2} \frac{x(H)}{M(H)} \right) M(H_2O) \quad (B.6)$$

$$FM(SO_2) = \left(\frac{x(S)}{M(S)} \right) M(SO_2) \quad (B.7)$$

$$FM(N_2) = \left(\frac{1}{2} \frac{x(N)}{M(N)} \right) M(N_2) \quad (B.8)$$

De forma análoga, a seguinte expressão matemática é desenvolvida para calcular a relação estequiométrica oxigênio-combustível:

$$OC = \left(\frac{x(C)}{M(C)} + \frac{1}{4} \frac{x(H)}{M(H)} + \frac{x(S)}{M(S)} \right) M(O_2)$$

Pode-se demonstrar facilmente, que :

$$\sum FM(i) = I + OC = \frac{\text{Massa produtos combustao}}{\text{Massa de combustivel}} \quad (B.9)$$

Este procedimento de cálculo pode ser estendido para a combustão de um resíduo genérico caracterizado pela sua composição elementar e teor de umidade, sintetizado na tabela.B.2 .

Tabela B.2 : Fator de geração dos produtos de combustão (massa de produto de combustão gerado por unidade de massa de combustível ou resíduo queimado), em condições estequiométricas e combustão completa

	$x(i)$	estequiometria	$FM(CO_2)$	$FM(H_2O)$	$FM(SO_2)$	$FM(N_2)$	$FM(P_2O_5)$	$FM(hal.)$	OC
C	$x(1)$	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\frac{x(1)}{M(C)} M(CO_2)$	0	0	0	0	0	$\frac{x(1)}{M(C)} M(O_2)$
H	$x(2)$	$H + \frac{1}{4} O_2 \rightarrow \frac{1}{2} H_2O$	0	$\left(\frac{x(2)}{M(H)} - \frac{x(6)}{M(Cl)} - \frac{x(7)}{M(F)} \right) \frac{M(H_2O)}{2}$	0	0	0	0	$\left(\frac{x(2)}{M(H)} - \frac{x(6)}{M(Cl)} - \frac{x(7)}{M(F)} \right) \frac{M(O_2)}{4}$
S	$x(3)$	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0	0	$\frac{x(3)}{M(S)} M(SO_2)$	0	0	0	$\frac{x(3)}{M(S)} M(O_2)$
N	$x(4)$	$N \rightarrow \frac{1}{2} N_2$	0	0	0	$x(4)$	0	0	0
P	$x(5)$	$P + \frac{5}{4} O_2 \rightarrow \frac{1}{2} P_2O_5$	0	0	0	0	$\frac{x(5)}{M(P)} \frac{1}{2} M(P_2O_5)$	0	$\frac{x(5)}{M(P)} \frac{5}{4} M(O_2)$
Cl	$x(6)$	$Cl + H \rightarrow HCl$	0	0	0	0	0	$\frac{x(6)}{M(Cl)} M(HCl)$	0
F	$x(7)$	$F + H \rightarrow HF$	0	0	0	0	0	$\frac{x(7)}{M(F)} M(HF)$	0
Br	$x(8)$	$Br \rightarrow \frac{1}{2} Br_2$	0	0	0	0	0	$x(8)$	0
I	$x(9)$	$I \rightarrow \frac{1}{2} I_2$	0	0	0	0	0	$x(9)$	0
O	$x(10)$	$O \rightarrow \frac{1}{2} O_2$	0	0	0	0	0	0	$-x(10)$
	$\sum x(i) = 1$	$\leftarrow TOTAL \rightarrow$	$\frac{x(1)}{M(C)} M(CO_2)$	$\left(\frac{x(2)}{M(H)} - \frac{x(6)}{M(Cl)} - \frac{x(7)}{M(F)} \right) \frac{M(H_2O)}{2}$	$\frac{x(3)}{M(S)} M(SO_2)$	$x(4)$	$\frac{x(5)}{M(P)} \frac{1}{2} M(P_2O_5)$		OC

OC = relação ar/combustível ou resíduo estequiométrica (kg/kg);
 $x(i)$ = fração mássica do elemento i no resíduo ou no combustível (kg/kg);
 $FM(j)$ = fração “massa do produto de combustão j gerado por massa de combustível ou resíduo queimado;
 $hal.$ = compostos halogenados (Br_2 , HCl , I_2 e HF);
 $M(i)$ = massa molecular do componente i

APÊNDICE C:
COEFICIENTES CONVECTIVOS ANÁLOGOS

APÊNDICE C: COEFICIENTES CONVECTIVOS ANÁLOGOS

1. Introdução:

Neste apêndice, apresenta-se o procedimento de obtenção das expressões dos coeficientes de transferência de calor convectivo e o condutivo de tal forma que a expressão para o cálculo do fluxo de calor seja análoga à da obtida para a radiação.

2. Coeficiente de transferência de calor convectivo análogo:

Para que seja possível a representação de todos os processos de transferência de calor, ou seja, condução, radiação e convecção, empregando a analogia com circuitos elétricos, faz-se necessário expressar o fluxo de calor convectivo entre dois nodos de temperaturas T_1 e T_2 , de forma análoga à que representa o fluxo radiativo entre duas superfícies, ou seja:

$$q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} \quad (C.1)$$

Na transferência de calor por convecção, o fluxo de calor é expresso por:

$$q = Ah(T_1 - T_2) \quad (C.2)$$

sendo, h o coeficiente de transferência de calor convectivo.

O fluxo de calor pode ainda ser expresso em termos de potenciais e resistências por:

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{Ah}} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{conv.}}$$

na qual, a resistência à transferência calor convectivo é dada por:

$$R_{conv.} = \frac{1}{Ah} \quad (C.3)$$

Igualando-se as equações C.1 e C.2, obtém-se uma expressão para a resistência:

$$\frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} = Ah(T_1 - T_2)$$

portanto:

$$R = \frac{1}{Ah \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}} \quad (C.4)$$

Por analogia à equação C.3, define-se como *coeficiente de transferência de calor convectivo análogo*, como sendo:

$$h^* = \frac{h}{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)} \quad (C.5)$$

2. Coeficiente de transferência de calor condutivo análogo:

A dedução do coeficiente de transferência de calor condutivo é análoga ao apresentado no item anterior para o coeficiente convectivo.

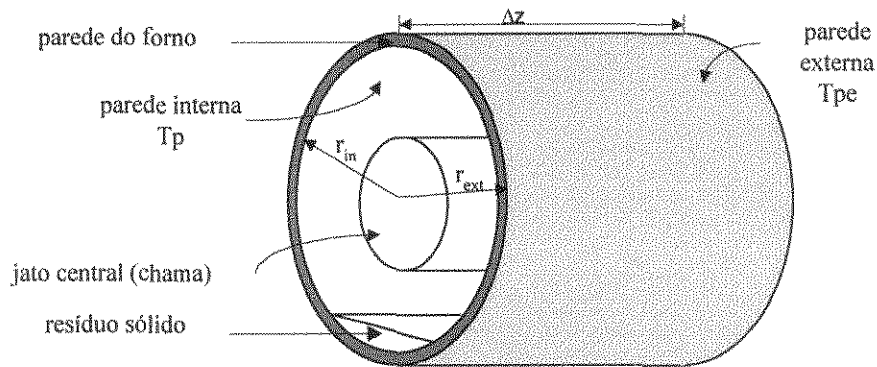


Figura C.1: Parede do forno na forma de casca cilíndrica.

Na transferência de calor por condução numa parede cilíndrica, com dimensões de acordo com o que pode ser visto na figura C.1, o fluxo de calor através da parede é dada pela lei de Fourier, de acordo com:

$$q = \frac{2\pi k_p \Delta z (T_p - T_{pe})}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)} = \frac{(T_p - T_{pe})}{R_{cond.}} \quad (C.6)$$

sendo, k_p a condutividade térmica da parede e $R_{cond.}$ a resistência à transferência de calor por condução definida como:

$$R_{cond.} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)}{2\pi k_p \Delta z} \quad (C.7)$$

Igualando-se as equações C.1 e C.6, obtém-se uma expressão para a resistência:

$$\frac{\sigma(T_p^4 - T_{pe}^4)}{R} = \frac{2\pi k_p \Delta z (T_p - T_{pe})}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)}$$

portanto:

APÊNDICE D:
ESTIMATIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

APÊNDICE D:
CÁLCULO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

1. Introdução:

Este item trata de procedimentos de estimativas das propriedades físicas , a saber, massa específica, condutividade térmica, viscosidade e calor específico, para misturas gasosas, levando em conta as influências da temperatura e da composição.

2. Influência da temperatura sobre as propriedades físicas dos componentes puros:

A influência da temperatura sobre as propriedades físicas dos componentes puros está disponível na literatura^{21,22,23} na forma de tabela de dados experimentais. A partir desses dados, foram realizadas regressões lineares ou ajuste de equação não linear (capacidade calorífica), cujas equações ajustadas são apresentadas a seguir, para cada propriedade física, juntamente com as tabelas dos dados da literatura.

2.1. Capacidade calorífica:

A equação ajustada para os dados da tabela D.1 tem a seguinte forma:

$Cp = A + B.T + C.T^2 + D.T^3$ (D.7)

em que:

Cp = capacidade calorífica isobárica, em j/(mol.K)
T = temperatura. em K
A,B,C e D = parâmetros ajustáveis

Tabela D.1: Parâmetros da equação D.7

componente	A	B	C	D	fonte
CO ₂	+1,980E+1	+7,344E-2	-5,602E-5	+1,715E-8	21
H ₂ O	+3,224E+1	+1,924E-3	+1,055E-5	-3,596E-9	21
SO ₂	+5,699E+1	+5,699E-2	-4,961E-5	+1,328E-8	21
N ₂	-1,315E+1	-1,357E-2	+2,680E-5	-1,168E-8	21
P ₂ O ₅ (P)	+2,080E+1	0	0	0	21
HCl	+3,067E+1	-7,201E-2	-1,246E-5	-3,898E-9	21
HF	+2,906E+1	+6,611E-4	-2,032E-6	+2,504E-9	21
Br ₂	+3,386E+1	+1,125E-2	-1,192E-5	+4,534E-9	21
I ₂	+3,559E+1	+6,515E-3	-6,988E-6	+2,834E-9	21
O ₂	+2,811E+1	-3,680E-6	+1,746E-5	-1,065E-8	21

2.2. Condutividade térmica:

A equação ajustada para os dados da tabela D.2 tem a seguinte forma:

$$k = A + B.T + C.T^2 + D.T^3$$

(D.8)

em que:

k =condutividade térmica, em w/(m.K)
 T =temperatura, em K
 A,B,C e D = parâmetros ajustáveis

Tabela D.2: Parâmetros da equação D.8

componente	A	B	C	D	fonte
CO ₂	-7,215E-3	+8,015E-5	+5,477E-9	-1,053E-11	21
H ₂ O	+7,341E-3	-1,013E-5	+1,801E-7	-9,100E-11	21
SO ₂	-8,086E-3	+6,344E-5	-1,382E-8	+2,303E-12	21
N ₂	+3,919E-4	+9,816E-5	-5,067E-8	+1,504E-11	21
P ₂ O ₅	*				
HCl	-1,089E-4	+5,306E-5	-1,047E-8	+6,700E-13	21
HF	+3,857E-3	+5,276E-5	+2,261E-8	-9,841E-13	21
Br ₂	-6,700E-5	+1,729E-5	-1,256E-9	-3,769E-13	21
I ₂	+2,638E-4	+1,143E-5	-1,256E-9	+6,281E-13	21
O ₂	-3,273E-4	+9,966E-5	-3,743E-8	9,732E-12	21

* não disponível.

2.3. Viscosidade:

Tabela D.3 : Parâmetros da equação D.9

componente	A	B	fonte
CO ₂	0,0788	0,336E-3	22
H ₂ O	-0,3148	4,109E-3	22
SO ₂	0,7089	40,55E-3	22
N ₂	1,0743	3,114E-3	22
P ₂ O ₅	*		
HCl	0,1463	4,36E-3	23
HF	0,1463	11,21E-3	23
Br ₂	0,3404	4,26E-3	23
I ₂	0,1817	4,08E-3	23
O ₂	0,9650	4,10E-3	23

* não disponível.

A equação ajustada para os dados da tabela D.3 tem a seguinte forma:

$$\mu = (A + B.T).10^{-5}$$

(D.9)

em que:

μ = viscosidade, em Pa.s
 T = temperatura, em K
 A, B = parâmetros ajustáveis

3. Influência da composição sobre as propriedades físicas da mistura gasosa:

Uma vez calculadas as propriedades físicas dos componentes puros na temperatura desejada, estima-se as propriedades físicas da mistura gasosa levando em conta a composição da mesma conforme descrito a seguir.

3.1. Viscosidade:

Para a estimativa da viscosidade de misturas gasosas a baixa pressão, pode-se empregar o método de Herning e Ziprerer⁽¹⁰⁾ expressa por:

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1} y_i \mu_i (M_i)^{0,5}}{\sum y_i (M_i)^{0,5}} \quad (D.1)$$

em que:

M_i = peso molecular do componente i;
 Y_i = fração molar do componente i;
 μ_i = viscosidade do componente i;
 μ_m = viscosidade da mistura.

3.2. Capacidade calorífica:

A capacidade calorífica da mistura pode ser obtida simplesmente pela média das capacidades caloríficas dos componentes puros ponderada pelas suas frações molares.

$$C_{pm} = \sum_{i=1} y(i) \cdot C_p(i) \quad (D.2)$$

em que :

$C_p(i)$ = capacidade calorífica do componente i;
 C_{pm} = capacidade calorífica da mistura;
 $y(i)$ = fração molar do componente i na mistura.

3.3. Massa específica

A massa específica da mistura pode ser calculada a partir de uma equação estado empregando-se o peso molecular médio da mistura, ou seja:

$$\rho_m = \frac{P \cdot M_m}{R \cdot T} \quad (D.3)$$

em que:

ρ_m = massa específica da mistura;
 P = pressão absoluta;
 M_m = peso molecular médio da mistura;
 R = constante dos gases ideais;
 T = temperatura absoluta.

O peso molecular médio pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_m = \sum y(i) \cdot M(i) \quad (D.4)$$

em que:

$y(i)$ = fração molar do componente i na mistura;
 $M(i)$ = massa molecular do componente i .

3.4. Condutividade térmica:

As condutividades térmicas de misturas gasosas em pressões baixas podem ser calculadas com simplicidade a partir das condutividades térmicas dos componentes puros pela equação⁽¹⁰⁾;

$$k_m = \frac{\sum_{i=1} y_i k_i (M_i)^{1/3}}{\sum y_i (M_i)^{1/3}} \quad (D.5)$$

em que:

M_i = peso molecular do componente i ;
 Y_i = fração molar do componente i ;
 k_i = viscosidade do componente i ;
 k_m = viscosidade da mistura.

Esta fórmula foi testada para mistura de hidrocarbonetos e misturas multicompostas industriais, sendo que o desvio médio ficou em torno de 1,5% e o máximo de 5%. Misturas ricas em hidrogênio, que não é o caso, podem apresentar desvios maiores.

3.5. Número de Prandtl

O número de Prandtl médio para a mistura é calculado a partir das propriedades média calculadas pelos métodos acima.

$$Pr_m = \frac{\mu_m \cdot C_{p_m}}{k_m} \quad (D.6)$$

APÊNDICE E: DEMANDA E DISPONIBILIDADE DE OXIGÊNIO

APÊNDICE E: DEMANDA E DISPONIBILIDADE DE OXIGÊNIO

1. Introdução:

O desenvolvimento matemático apresentado a seguir tem como objetivo definir procedimentos para calcular as concentrações de oxigênio nas saídas das câmaras primária e secundária, a partir das vazões mássicas e composições de todas as correntes de alimentação do forno, considerando combustões completas do resíduo e do combustível. Este procedimento é a base para a construção de duas subrotinas para compor o código de simulação numérica, sendo que a primeira destina-se ao cálculo da fração mássica de oxigênio em função das vazões mássicas e composições das correntes de alimentação do forno, e a segunda, de forma inversa, destina-se ao cálculo das vazões mássicas de entrada de ar de combustão em função da fração mássica de oxigênio pré-estabelecida.

2. Câmara de combustão primária:

A figura E.1 mostra um esquema simplificado da câmara primária com as variáveis importantes no desenvolvimento matemático realizado neste item.



Figura E.1: Vazões mássicas e composições da câmara de combustão primária.

A nomenclatura das variáveis constantes na figura E.1 está descrita a seguir:

- $y_{O_2,ap}^I$ fração mássica de oxigênio no ar primário alimentado na câmara primária;
- $y_{O_2,as}^I$ fração mássica de oxigênio no ar secundário alimentado na câmara primária
- $Y_{O_2}^I$ fração mássica de oxigênio nos gases de combustão na saída da câmara primária
- $Map(1)$ vazão mássica de ar primário alimentado na câmara primária
- $Mas(1)$ vazão mássica de ar secundário alimentado na câmara primária
- $Fcb(1)$ vazão mássica de combustível auxiliar alimentado na câmara primária
- $Mss(1)$ vazão mássica de resíduo sólido alimentado na câmara primária
- $Mag(1)$ vazão mássica de umidade associada ao resíduo sólido alimentado na câmara primária

2.1. Cálculo da demanda de oxigênio na câmara primária

A quantidade de oxigênio demandado na câmara primária é a soma da quantidade necessária para a combustão do resíduo com a quantidade necessária para a queima do combustível, ou seja:

$$oxdema = -FM_{(O_2)}^{resíduo} \cdot Mss(1)(1 - tcin^{(1)}) - FM_{(O_2)}^{combustível} Fcb(1) \quad (E.1)$$

sendo:

$-FM_{(O_2)}^{resíduo}$ = massa de oxigênio por massa de resíduo necessária para combustão em condições estequiométricas (veja Apêndice B).

$-FM_{(O_2)}^{combustível}$ = massa de oxigênio por massa de combustível necessária para combustão em condições estequiométricas (veja Apêndice B).

$tcin^{(1)}$ = teor de cinzas no resíduo sólido na câmara primária

Os termos $FM(O_2)$ são obtidos diretamente do Apêndice B e o termo $(1 - tcin^{(1)})$ corresponde à exclusão das cinzas que não sofrem combustão.

2.2. Oxigênio disponível na câmara primária:

O oxigênio disponível na câmara primária é a soma das contribuições da corrente do ar primário com a da corrente de ar secundário, isto é:

$$oxdisp = y_{O_2,ap}^I Map(1) + y_{O_2,as}^I Mas(1) \quad (E.2)$$

2.3. Estimativa da fração mássica de oxigênio na saída da câmara primária

Considerando a combustão completa do resíduo e do combustível, a fração mássica de oxigênio na saída da câmara de combustão primária pode ser calculado pela razão entre a diferença entre a quantidade de oxigênio disponível e a demandada pela vazão mássica total dos gases, resultando na seguinte expressão:

$$Y_{O_2}^I = \frac{oxdisp - oxdema}{Mas(1) + Map(1) + Mss(1)(1 - tcin^{(1)}) + Mag(1) + Fcb(1)} \quad (E.3)$$

2.4. Estimativas das vazões mássicas de ar de combustão quando a fração mássica de oxigênio na saída da câmara é especificada.

Combinando as equações E.1, E.2 e E.3, pode-se obter uma expressão para o cálculo da vazão mássica de ar primário em função do valor especificado para a fração mássica de oxigênio na saída da câmara primária

$$Map(1) = \frac{\left[\left(Mss(1)(1 - tcin^{(1)}) + Mag(1) + Fcb(1) \right) Y_{O_2}^{(1)} \right] + oxdema - Mas(1) \left(y_{O_2,as}^{(1)} - Y_{O_2}^{(1)} \right)}{\left(y_{O_2,ap}^{(1)} - Y_{O_2}^{(1)} \right)} \quad (E.4)$$

De forma análoga, pode-se obter a expressão para o cálculo da vazão mássica de ar secundário:

$$Mas(1) = \frac{\left[\left(Mss(1)(1 - tcin^{(1)}) + Mag(1) + Fcb(1) \right) Y_{O_2}^{(1)} + oxdema - Map(1) \left(y_{O_2,ap}^{(1)} - Y_{O_2}^{(1)} \right) \right]}{\left(y_{O_2,as}^{(1)} - Y_{O_2}^{(1)} \right)} \quad (E.5)$$

3. Câmara de combustão secundária:

A figura E.2 mostra um esquema simplificado da câmara primária com as variáveis importantes no desenvolvimento matemático realizado neste item.

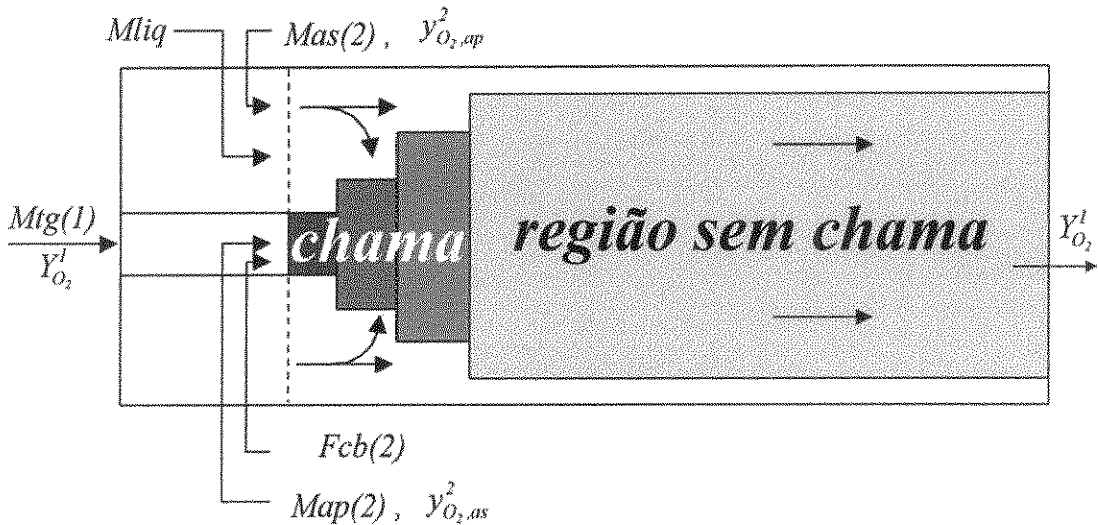


Figura E.2: Vazões mássicas e composições da câmara de combustão secundária.

A nomenclatura das variáveis constantes na figura E.1 está descrita a seguir:

- $y_{O_2,ap}^{(2)}$ fração mássica de oxigênio no ar primário alimentado na câmara secundária;
- $y_{O_2,as}^{(2)}$ fração mássica de oxigênio no ar secundário alimentado na câmara secundária
- $Y_{O_2}^{(2)}$ fração mássica de oxigênio nos gases de combustão na saída da câmara secundária
- $Map(2)$ vazão mássica de ar primário alimentado na câmara secundária
- $Mas(2)$ vazão mássica de ar secundário alimentado na câmara secundária
- $Fcb(2)$ vazão mássica de combustível auxiliar alimentado na câmara secundária
- $Mliq$ vazão mássica de resíduo líquido alimentado na câmara secundária

3.1. Cálculo da demanda de oxigênio na câmara secundária

Analogamente ao desenvolvido no item 2, a quantidade de oxigênio demandado na câmara primária é a soma da quantidade necessária para a combustão do resíduo com a quantidade necessária para a queima do combustível, ou seja:

$$oxdema = -FM_{(O_2)}^{res.liq.} \cdot Mliq \left(1 - tcin^{(2)} - umid^{(2)} \right) - FM_{(O_2)}^{combustível} Fcb(2) \quad (E.6)$$

sendo:

$-FM_{(O_2)}^{res.liq.}$ = massa de oxigênio por massa de resíduo líquido necessária para combustão em condições estequiométricas (veja Apêndice B).

$-FM_{(O_2)}^{combustível}$ = massa de oxigênio por massa de combustível necessária para combustão em condições estequiométricas (veja Apêndice B).
 $tcin^{(2)}$ = teor de cinzas no resíduo líquido na câmara secundária
 $umid^{(2)}$ = teor de cinzas no resíduo líquido na câmara secundária

Os termos $FM(O_2)$ são obtidos diretamente do Apêndice B e o termo $(1 - tcin^{(2)} - umid^{(2)})$ corresponde à exclusão das cinzas e da água que não sofrem combustão.

3.2. Oxigênio disponível na câmara secundária:

O oxigênio disponível na câmara secundária é a soma das contribuições da corrente do ar primário com a da corrente de ar secundário e com o oxigênio remanescente da câmara primária, isto é:

$$oxdisp = y_{O_2,ap}^2 Map(2) + y_{O_2,as}^2 Mas(2) + oxrem \quad (E.7)$$

A quantidade de oxigênio remanescente, $oxrem$, que aparece na equação E.7, pode ser calculado por:

$$oxrem = Y_{O_2}^1 (Mas(1) + Map(1) + Mss(1)(1 - tcin^{(1)}) + Mag(1) + Fcb(1)) \quad (E.8)$$

3.3. Estimativa da fração mássica de oxigênio na saída da câmara secundária

Considerando a combustão completa do resíduo e do combustível, a fração mássica de oxigênio na saída da câmara de combustão primária pode ser calculado de forma análoga ao realizado para a câmara primária, pela razão entre a diferença entre a quantidade de oxigênio disponível e a demandada, pela vazão mássica total dos gases, resultando na seguinte expressão:

$$Y_{O_2}^2 = \frac{oxdisp - oxdema}{\left[\frac{Mas(1) + Map(1) + Fcb(1) + Mag(1) + Mss(1)(1 - tcin^{(1)})}{Mas(2) + Map(2) + Fcb(2) + Mliq(1 - tcin^{(2)})} \right]} \quad (E.9)$$

3.4. Estimativas das vazões mássicas de ar de combustão quando a fração mássica de oxigênio na saída da câmara é especificada.

Combinando as equações E.6, E.7 e E.9, obtém-se uma expressão para o cálculo da vazão mássica de ar primário em função do valor especificado para fração mássica de oxigênio na saída da câmara secundária:

$$Map(2) = \frac{\left[(Mtg^{(1)} + Mliq(1 - tcin^{(2)}) + Fcb(2)) Y_{O_2}^{(2)} + oxdema - oxrem - Mas(2) (y_{O_2,as}^{(2)} - Y_{O_2}^{(2)}) \right]}{(y_{O_2,ap}^{(1)} - Y_{O_2}^{(1)})} \quad (E.10)$$

sendo $Mtg^{(1)}$ a vazão mássica total dos gases que deixam a câmara primária e entram na secundária, isto é:

$$Mtg^{(1)} = Mas(1) + Map(1) + Fcb(1) + Mag(1) + Mss(1)(1 - tcin^{(1)}) \quad (E.11)$$

De forma análoga, pode-se obter a expressão para o cálculo da vazão mássica de ar secundário:

$$Mas(2) = \frac{\left[\left(Mtg^{(1)} + Mliq(1 - tcin^{(2)}) + Fcb(2) \right) Y_{O_2}^{(2)} \right. \\ \left. + oxdema - oxrem - Map(2) \left(y_{O_2,ap}^{(2)} - Y_{O_2}^{(2)} \right) \right]}{\left(y_{O_2,as}^{(1)} - Y_{O_2}^{(1)} \right)} \quad (E.12)$$

APÊNDICE F:

FATORES DE FORMA

APÊNDICE F: FATORES DE FORMA

1. Introdução:

Os fatores de forma, ou fatores de visibilidade, são calculados a partir do “Catálogo dos Fatores de Forma”, constante no Apêndice A de Sparrow e Cess¹⁰ que fornece as representações algébricas desses fatores para diversas configurações geométricas. Este procedimento permite a obtenção dos fatores de forma que relacionam superfícies dentro da mesma zona. Os fatores de forma envolvendo superfícies de zonas adjacentes serão estimados utilizando-se relações fundamentais e hipóteses simplificadoras.

Neste trabalho, são adotadas as seguintes notações para os fatores de forma:

- $F_{A_1 A_2}^i$ representa a fração de energia que deixa a superfície A_1 na zona i e atinge a superfície A_2 na mesma zona. O índice “ i ” indica a zona de onde a fração da energia considerada tem origem. Os índices “ a ” e “ p ” são acrescentados como subscritos indicando se a superfície onde a fração da energia considerada atinge é anterior ou posterior à zona “ i ” onde esta tem origem.
- $F_{A_1 A_2 a}^i$ representa a fração de energia que deixa a superfície A_1 na zona i e atinge a superfície A_2 na zona anterior (“ a ” indica que A_2 refere-se à zona anterior)
- $F_{A_1 A_2 p}^i$ representa a fração de energia que deixa a superfície A_1 na zona i e atinge a superfície A_2 na zona posterior (“ p ” indica que A_2 refere-se à zona posterior)
- $F_{A_1 A_2 p}^{i-1}$ representa a fração de energia que deixa a superfície A_1 na zona $i-1$ e atinge a superfície A_2 na zona posterior (ou seja, A_2 na zona i)

As superfícies A_1 e A_2 identificam as superfícies de acordo com a seguinte notação:

- p superfície da parede interna do forno
- q superfície da parede interna do queimador
- s superfície exposta do leito de sólido
- j superfície do jato central

2. Fatores de forma envolvendo superfícies dentro da mesma zona:

a. Fator de forma entre um cilindro e um plano paralelo, correspondentes à superfície cilíndrica do jato central e a superfície plana do sólido, respectivamente, mostrado esquematicamente na figura F.1:

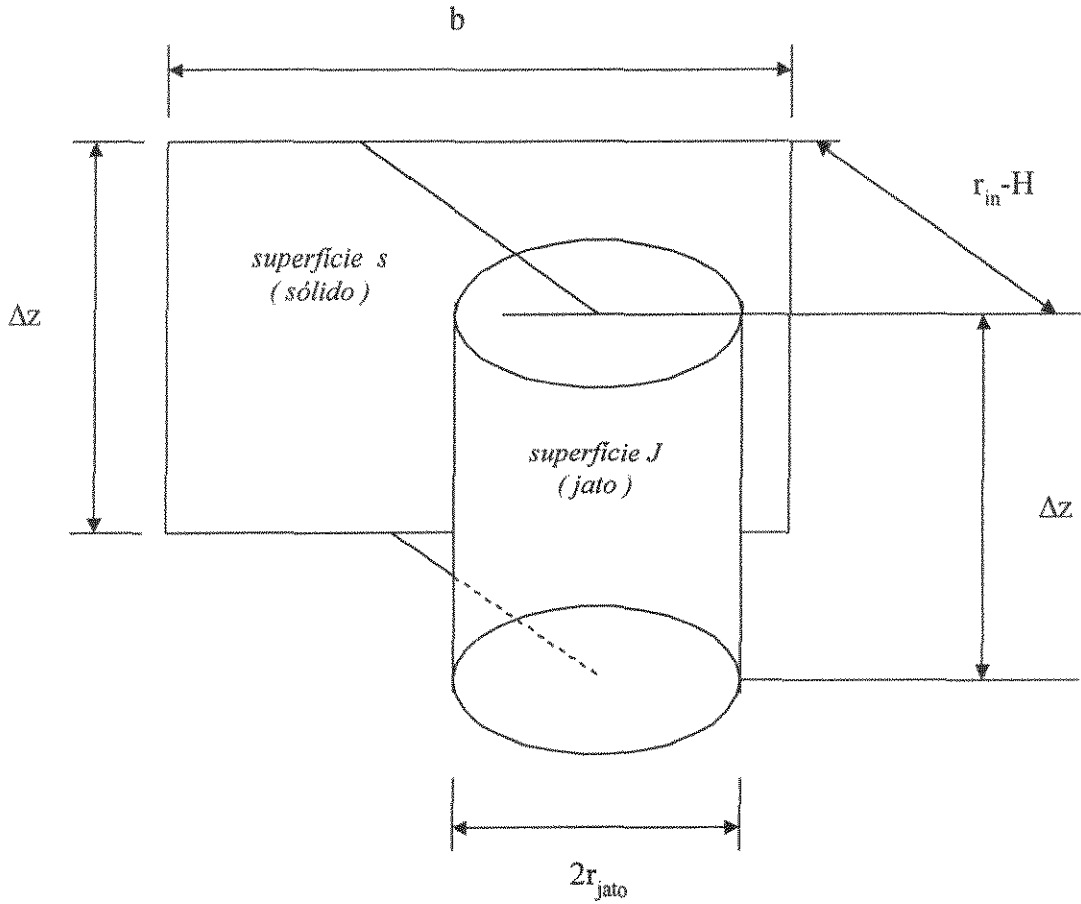


Figura F.1: Representação geométrica das superfícies de trocas radiativas da parede do sólido e da superfície do jato cilíndrico hipotético.

As seguintes equações foram deduzidas por Sparrow e Cess¹⁰:

$$F_{sj'} = \frac{2}{Y} \int_0^Y f(\zeta) d\zeta \quad (F.1)$$

$$f(\zeta) = \frac{X}{X^2 + \zeta^2} - \frac{X}{\pi(X^2 + \zeta^2)} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Z} \left[\sqrt{A^2 + 4Z^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{A\sqrt{X^2 + \zeta^2}} \right) + B \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{X^2 + \zeta^2}} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (F.2)$$

$$X = \frac{rin - H}{r_{jato}} \quad (F.3)$$

$$Y = \frac{2\sqrt{rin^2 - (rin - H)^2}}{r_{jato}} \quad (F.4)$$

$$Z = \frac{\Delta z}{r_{jato}} \quad (F.5)$$

$$A = Z^2 + X^2 + \zeta^2 - 1 \quad (F.6)$$

$$A = Z^2 - X^2 - \zeta^2 + 1 \quad (F.7)$$

b. Fator de forma entre dois cilindros concêntricos, correspondentes à parede cilíndrica do forno e a superfície cilíndrica do jato central:

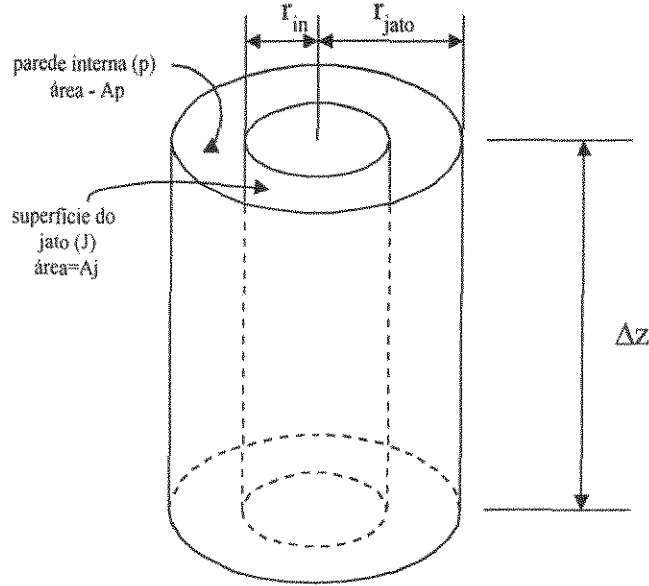


Figura F.2: Representação geométrica das superfícies de trocas radiativas da parede interna do forno e da superfície do jato cilíndrico hipotético.

$$F_{pj}^{i*} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left[\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{AX} \right) + B \sin^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (F.8)$$

$$X = \frac{r_{in}}{r_{jato}} \quad (F.9)$$

$$Y = \frac{\Delta z}{r_{jato}} \quad (F.10)$$

c. Fator de forma entre a parede do cilindro de maior diâmetro com a própria parede, considerando a geometria de dois cilindros concêntricos:

$$F_{pp}^{i*} = 1 - \frac{1}{X} - \frac{2}{\pi X} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\sqrt{X^2 - 1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left\{ \frac{\frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left[\frac{4 \left(X^2 - 1 + \frac{Y^2}{X^2} (X^2 - 2) \right)}{Y^2 + 4(X^2 - 1)} \right]}{-\sin^{-1} \left(\frac{X^2 - 2}{X^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} \right) - 1} \right\} \quad (F.11)$$

$$X = \frac{r_{in}}{r_{jato}} \quad (F.12)$$

$$Y = \frac{\Delta z}{rjato} \quad (F.13)$$

Em b. e c., não está sendo considerada a área ocupada pelo sólido que reduz a área exposta da parede cilíndrica. Para que isso seja levado em conta, considera-se que o fator de forma é proporcional à área e faz-se a devida correção, como segue:

$$F_{pj}^i = \left(1 - \frac{\beta}{2\pi}\right) F_{pj}^{i*} \quad (F.14)$$

$$F_{pp}^i = \left(1 - \frac{\beta}{2\pi}\right) F_{pp}^{i*} \quad (F.15)$$

A fração subtraída de F_{pp} , referente à área coberta pelo sólido, corresponde, portanto, à troca entre a parede e o sólido, pode ser calculada por:

$$F_{ps}^i = \frac{\beta}{2\pi} F_{pp}^{i*} \quad (F.16)$$

A partir de relações de reciprocidade, calcula-se os outros fatores de forma:

$$F_{js}^i = \frac{A_s}{A_j} F_{sj}^i \quad (F.17)$$

$$F_{ps}^i = \frac{A_s}{A_p} F_{sp}^i \quad (F.18)$$

$$F_{jp}^i = \frac{A_p}{A_j} F_{pj}^i \quad (F.19)$$

Os fatores de forma F_{sj} , F_{js} , F_{pj} , F_{jp} , F_{ps} , F_{sp} e F_{pp} , obtidos a partir das equações algébricas acima, dizem respeito às trocas radiativas dentro de um mesma zona.

3. Procedimento para estimativas dos fatores de forma envolvendo superfícies de zonas adjacentes

Para as estimativas dos fatores de forma que relacionam superfícies de zonas adjacentes propõe-se procedimentos diferenciados para as diferentes zonas, obedecendo as hipóteses do modelo. Pode-se distinguir os seguintes procedimentos de estimativas, os quais estão relacionados abaixo:

- I. estimativas dos fatores de forma para a primeira zona, envolvendo interações com a parede do queimador e com superfícies da segunda zona;
- II. estimativas dos fatores de forma para a segunda zona envolvendo interações com a parede do queimador e com superfícies da primeira e da terceira zona;
- III. estimativas dos fatores de forma para as zonas intermediárias, envolvendo interações com as superfícies das zonas anterior e posterior;
- IV. estimativas dos fatores de forma para a última zona, envolvendo interações com o pós-combustor e com superfícies da zona anterior.

Caso 1: Primeira zona:

Neste caso, a primeira zona interage com a parede do queimador e a zona posterior. Assim sendo, pode-se estabelecer as seguintes relações, válidas para superfícies côncavas, e que relacionam todos os fatores de forma:

$$F_{jq}^{(1)} + F_{jpp}^{(1)} + F_{jsp}^{(1)} + F_{jp}^{(1)} + F_{js}^{(1)} = 1 \quad (F.20)$$

$$F_{pq}^{(1)} + F_{ppp}^{(1)} + F_{psp}^{(1)} + F_{pjp}^{(1)} + F_{pj}^{(1)} + F_{ps}^{(1)} + F_{pp}^{(1)} = 1 \quad (F.21)$$

$$F_{sq}^{(1)} + F_{spp}^{(1)} + F_{sjp}^{(1)} + F_{sp}^{(1)} + F_{sj}^{(1)} = 1 \quad (F.22)$$

Estas equações podem ser escritas como:

$$F_{jq}^{(1)} + F_{jpp}^{(1)} + F_{jsp}^{(1)} = 1 - F_{jp}^{(1)} - F_{js}^{(1)} \quad (F.23)$$

$$F_{pq}^{(1)} + F_{ppp}^{(1)} + F_{psp}^{(1)} + F_{pjp}^{(1)} = 1 - F_{pj}^{(1)} - F_{ps}^{(1)} - F_{pp}^{(1)} \quad (F.24)$$

$$F_{sq}^{(1)} + F_{spp}^{(1)} + F_{sjp}^{(1)} = 1 - F_{sp}^{(1)} - F_{sj}^{(1)} \quad (F.25)$$

O lado direito de cada uma das três equações acima é constituído de fatores de forma cujas expressões algébricas foram apresentadas anteriormente.

À estas três equações acima, acrescenta-se outras relações baseadas na seguinte hipótese:

A relação entre fatores de forma da mesma zona é a mesma entre os fatores de forma que relacionam às mesmas superfícies com as superfícies equivalentes na zona adjacente, ou seja:

$$\frac{F_{A_1 A_2}^{adjac}}{F_{A_1 A_3}^{adjac}} = \frac{F_{A_1 A_2}}{F_{A_1 A_3}} \quad (F.26)$$

Aplicando-se ao casos específicos, obtém-se:

$$F_{ppp}^i = \frac{F_{pp}}{F_{ps}} F_{psp}^i \quad (F.27)$$

$$F_{pjp}^i = \frac{F_{pj}}{F_{ps}} F_{psp}^i \quad (F.28)$$

$$F_{jpp}^i = \frac{F_{jp}}{F_{js}} F_{jsp}^i \quad (F.29)$$

$$F_{spp}^i = \frac{F_{sp}}{F_{sj}} F_{sjp}^i \quad (F.30)$$

Adicionalmente, admite-se que a fração de energia, por unidade de área, que deixa uma determinada superfície e atinge superfícies da zona anterior está relacionada com aquela que atinge superfícies da zona posterior, por meio da razão direta entre as áreas de incidências. Em termos de equações algébricas obtém-se:

$$Fjq^{(1)} \left(\frac{Ap^{(2)} + As^{(2)}}{Aq} \right) = Fjpp^{(1)} + Fjsp^{(1)} \quad (F.31)$$

$$Fpq^{(1)} \left(\frac{Aj^{(2)} + Ap^{(2)} + As^{(2)}}{Aq} \right) = Fppp^{(1)} + Fpsp^{(1)} + Fpjp^{(1)} \quad (F.32)$$

$$Fs q^{(1)} \left(\frac{Ap^{(2)} + Aj^{(2)}}{Aq} \right) = Fspp^{(1)} + Fsjp^{(1)} \quad (F.33)$$

Substituindo a equação F.32 na equação F.24 e rearranjando obtém-se:

$$Fpq^{(1)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(2)} + As^{(2)} + Aj^{(2)}} (1 - Fpj^{(1)} - Fps^{(1)} - Fpp^{(1)}) \quad (F.34)$$

Substituindo ainda, as equações F.27 e F.28 na equação F.32, obtém-se:

$$Fpsp^{(1)} = \frac{\left(\frac{Aj^{(2)} + Ap^{(2)} + As^{(2)}}{Aq} \right)}{\left(1 + \frac{Fpp^{(1)}}{Fps^{(1)}} + \frac{Fpj^{(1)}}{Fps^{(1)}} \right)} Fpq^{(1)} \quad (F.35)$$

Portanto, a partir do valor de $Fpq^{(1)}$ calculado pela equação F.34 acima, calcula-se os valores de $Fpsp^{(1)}$, $Fppp^{(1)}$ e $Fpjp^{(1)}$ por meio das equações F.35, F.27 e F.28 respectivamente.

Da mesma forma, substituindo a equação F.31 na equação F.23 e rearranjando obtém-se:

$$Fjq^{(1)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(2)} + As^{(2)}} (1 - Fjs^{(1)} - Fjp^{(1)}) \quad (F.36)$$

Substituindo ainda, as equação F.29 na equação F.31, obtém-se:

$$Fjsp^{(1)} = \frac{\left(\frac{Ap^{(2)} + As^{(2)}}{Aq} \right)}{\left(1 + \frac{Fjp^{(1)}}{Fjs^{(1)}} \right)} Fjq^{(1)} \quad (F.37)$$

Similarmente ao caso anterior, a partir do valor de $Fjq^{(1)}$ calculado pela equação F.36 acima, calcula-se os valores de $Fjsp^{(1)}$ e $Fjpp^{(1)}$ por meio das equações F.37 e F.29 respectivamente.

Analogamente, substituindo a equação F.33 na equação F.25 e rearranjando obtém-se:

$$Fsq^{(1)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(2)} + Aj^{(2)}} (1 - Fsp^{(1)} - Fsj^{(1)}) \quad (F.38)$$

Substituindo ainda, as equação F.30 na equação F.33, obtém-se:

$$Fsjp^{(1)} = \frac{\left(\frac{Ap^{(2)} + Aj^{(2)}}{Aq} \right)}{\left(1 + \frac{Fsp^{(1)}}{Fsj^{(1)}} \right)} Fsq^{(1)} \quad (F.39)$$

Assim sendo, a partir do valor de $Fsq^{(1)}$ calculado pela equação F.38 acima, calcula-se os valores de $Fsjp^{(1)}$ e $Fsp^{(1)}$ através das equações F.39 e F.30 respectivamente.

Caso 2: Zonas intermediárias

Inicialmente, pode-se escrever as relações válidas para superfícies côncavas:

$$Fjpa' + Fjsa' + Fjpp' + Fjsp' + Fjp' + Fjs' = 1 \quad (F.40)$$

$$Fppa' + Fpsa' + Fpja' + Fppp' + Fpsp' + Fpjp' + Fpj' + Fps' + Fpp' = 1 \quad (F.41)$$

$$Fspa' + Fsja' + Fsp' + Fsjp' + Fsp' + Fsj' = 1 \quad (F.42)$$

Admite-se, para as zonas intermediárias, que a soma dos fatores de forma relativos à zona anterior é a mesma que para a soma daqueles relativos à zona posterior, ou seja:

$$Fjpp' + Fjsp' = Fjpa' + Fjsa' \quad (F.43)$$

$$Fppp' + Fpsp' + Fpjp' = Fppa' + Fpsa' - Fpja' \quad (F.44)$$

$$Fsp' + Fsjp' = Fspa' + Fsja' \quad (F.45)$$

Substituindo as equações F.43 a F.45 nas equações F.40 a F.42, respectivamente, obtém-se:

$$Fjpp' + Fjsp' = \frac{(1 - Fjp' - Fjs')}{2} \quad (F.46)$$

$$Fppp' + Fpsp' + Fpjp' = \frac{(1 - Fpj' - Fps' - Fpp')}{2} \quad (F.47)$$

$$Fsp' + Fsjp' = \frac{(1 - Fsp' - Fsj')}{2} \quad (F.48)$$

A exemplo do caso 1, admite-se que relação entre fatores de forma da mesma zona é a mesma entre os fatores de forma que relacionam às mesmas superfícies com as superfícies equivalentes na zona adjacente, resultando no seguinte conjunto de equações:

$$F_{jsp}^{(i)} = \frac{F_{js}^{(i)}}{F_{js}^{(i)} + F_{jp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{jp}^{(i)} - F_{js}^{(i)})}{2} \quad (F.49)$$

$$F_{jpp}^{(i)} = \frac{F_{jp}^{(i)}}{F_{js}^{(i)} + F_{jp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{jp}^{(i)} - F_{js}^{(i)})}{2} \quad (F.50)$$

$$F_{psp}^{(i)} = \frac{F_{ps}^{(i)}}{F_{ps}^{(i)} + F_{pj}^{(i)} + F_{pp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{pj}^{(i)} - F_{ps}^{(i)} - F_{pp}^{(i)})}{2} \quad (F.51)$$

$$F_{pjp}^{(i)} = \frac{F_{pj}^{(i)}}{F_{ps}^{(i)} + F_{pj}^{(i)} + F_{pp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{pj}^{(i)} - F_{ps}^{(i)} - F_{pp}^{(i)})}{2} \quad (F.52)$$

$$F_{ppp}^{(i)} = \frac{F_{pp}^{(i)}}{F_{ps}^{(i)} + F_{pj}^{(i)} + F_{pp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{pj}^{(i)} - F_{ps}^{(i)} - F_{pp}^{(i)})}{2} \quad (F.53)$$

$$F_{sjp}^{(i)} = \frac{F_{sj}^{(i)}}{F_{sj}^{(i)} + F_{sp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{sp}^{(i)} - F_{sj}^{(i)})}{2} \quad (F.54)$$

$$F_{spp}^{(i)} = \frac{F_{sp}^{(i)}}{F_{sj}^{(i)} + F_{sp}^{(i)}} \frac{(1 - F_{sp}^{(i)} - F_{sj}^{(i)})}{2} \quad (F.55)$$

Caso 3: Segunda Zona - início da chama

Neste caso, considera-se as interações radiativas entre as superfícies desta zona e a parede do queimador. Portanto, o conjunto das equações para a segunda zona é similar àquelas desenvolvidas para as zonas intermediárias com a inclusão dos termos $F_{jq}^{(2)}$, $F_{pq}^{(2)}$ e $F_{sq}^{(2)}$ nas equações F.40, F.41 e F.42 respectivamente.

$$F_{jq}^{(2)} + F_{jpp}^{(2)} + F_{jsp}^{(2)} = 1 - F_{jp}^{(2)} - F_{js}^{(2)} - F_{jpa}^{(2)} - F_{jsa}^{(2)} \quad (F.56)$$

$$F_{pq}^{(2)} + F_{ppp}^{(2)} + F_{psp}^{(2)} + F_{pjp}^{(2)} = 1 - F_{pj}^{(2)} - F_{ps}^{(2)} - F_{pp}^{(2)} - F_{ppa}^{(2)} - F_{psa}^{(2)} - F_{pja}^{(2)} \quad (F.57)$$

$$F_{sq}^{(2)} + F_{spp}^{(2)} + F_{sjp}^{(2)} = 1 - F_{spa}^{(2)} - F_{sja}^{(2)} - F_{sp}^{(2)} - F_{sj}^{(2)} \quad (F.58)$$

Através de um desenvolvimento algébrico similar ao realizado para o caso 2, obtem as seguintes expressões matemáticas para os fatores de forma que envolvem superfícies de zonas posteriores:

$$Fjsp^{(2)} = \frac{Fjs^{(2)}}{Fjs^{(2)} + Fjp^{(2)}} \frac{(1 - Fjp^{(2)} - Fjs^{(2)} - Fjq^{(2)})}{2} \quad (F.59)$$

$$Fjpp^{(2)} = \frac{Fjp^{(2)}}{Fjs^{(2)} + Fjp^{(2)}} \frac{(1 - Fjp^{(2)} - Fjs^{(2)} - Fjq^{(2)})}{2} \quad (F.60)$$

$$Fpsp^{(2)} = \frac{Fps^{(2)}}{Fps^{(2)} + Fpj^{(2)} + Fpp^{(2)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fps^{(2)} - Fpp^{(2)} + Fpq^{(2)})}{2} \quad (F.61)$$

$$Fpjp^{(2)} = \frac{Fpj^{(2)}}{Fps^{(2)} + Fpj^{(2)} + Fpp^{(2)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fps^{(2)} - Fpp^{(2)} - Fpq^{(2)})}{2} \quad (F.62)$$

$$Fppp^{(2)} = \frac{Fpp^{(2)}}{Fps^{(2)} + Fpj^{(2)} + Fpp^{(2)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fps^{(2)} - Fpp^{(2)} - Fpq^{(2)})}{2} \quad (F.63)$$

$$Fsjp^{(2)} = \frac{Fsjs^{(2)}}{Fsjs^{(2)} + Fsp^{(2)}} \frac{(1 - Fsp^{(2)} - Fsjs^{(2)} - Fsq^{(2)})}{2} \quad (F.64)$$

$$Fsp^{(2)} = \frac{Fsp^{(2)}}{Fsjs^{(2)} + Fsp^{(2)}} \frac{(1 - Fsp^{(2)} - Fsjs^{(2)} - Fsq^{(2)})}{2} \quad (F.65)$$

Os fatores de forma envolvendo as superfícies da zona 2 e a parede do queimador, são estimados admitindo-se que as frações de energia que deixam as superfícies desta zona e atingem a primeira zona e a parede do queimador, estão distribuídas proporcionalmente às áreas de incidência, ou seja:

$$Fpq^{(2)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(1)} + As^{(1)} + Aj^{(1)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fps^{(2)} - Fpp^{(2)})}{2} \quad (F.66)$$

$$Fjq^{(2)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(1)} + As^{(1)}} \frac{(1 - Fjs^{(2)} - Fjp^{(2)})}{2} \quad (F.67)$$

$$Fsqs^{(2)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(1)} + Aj^{(1)}} \frac{(1 - Fsp^{(2)} - Fsjs^{(2)})}{2} \quad (F.68)$$

Caso 4 Última zona:

Para a última zona, os fatores de forma referente à interação com a zona posterior é substituída pelos fatores de forma que representam as interações das superfícies da última zona com o pós-combustor . Ou seja:

$$Fjpa'' + Fjsa'' + Fjpc + Fjp'' + Fjs'' = 1 \quad (F.69)$$

$$Fppa' + Fpsa'' + Fpja'' + Fppc + Fpj'' + Fps'' + Fpp'' = 1 \quad (F.70)$$

$$Fspa'' + Fsja'' + Fspc + Fsp'' + Fsj'' = 1 \quad (F.71)$$

De forma análoga aos casos 2 e 3, referentes às zona intermediárias, admite-se a igualdade das somatórias dos fatores de forma, como apresentado a seguir:

$$Fjpa'' + Fjsa'' = Fjpc \quad (F.72)$$

$$Fppa' + Fpsa'' + Fpja'' = Fppc \quad (F.73)$$

$$Fspa'' + Fsja'' = Fspc \quad (F.74)$$

Combinando as equações de F.66 a F.71, obtem-se:

$$Fjpc = \frac{1}{2}(1 - Fjp' - Fjs') \quad (F.75)$$

$$Fppc = \frac{1}{2}(1 - Fpj' - Fps' - Fpp') \quad (F.76)$$

$$Fspc = \frac{1}{2}(1 - Fsp' + Fsj') \quad (F.77)$$

4. Procedimento para estimativas dos fatores de forma que envolvem superfícies de zonas adjacentes, na ausência de sólidos.

Para os casos onde não há a presença de sólidos, ou a quantidade deste é tão pequena que assim pode ser considerado, os fatores de forma que envolvem superfície de zonas adjacentes são calculados de forma similar ao apresentado no item 3, com a simples exclusão dos termos relacionados com as superfícies do sólido. Portanto, neste caso, as expressões algébricas resultantes podem ser escritas como:

Caso 1: Primeira Zona:

$$Fpq^{(1)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(2)} + Aj^{(2)}}(1 - Fpj^{(1)} - Fpp^{(1)}) \quad (F.78)$$

$$Fjq^{(1)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(2)}}(1 - Fjp^{(1)}) \quad (F.79)$$

$$Fjpp^{(1)} = 1 - Fjp^{(1)} - Fjq^{(1)} \quad (F.80)$$

$$Fpjp^{(1)} = \frac{Fpj^{(1)}}{Fpj^{(1)} + Fpp^{(1)}} \left(1 - Fpj^{(1)} - Fpp^{(1)} - Fpq^{(1)} \right) \quad (F.81)$$

$$Fppp^{(1)} = \frac{Fpp^{(1)}}{Fpj^{(1)} + Fpp^{(1)}} \left(1 - Fpj^{(1)} - Fpp^{(1)} - Fpq^{(1)} \right) \quad (F.82)$$

Caso 2: Zonas intermediárias

$$Fjpp^{(i)} = \frac{(1 - Fjp^{(i)})}{2} \quad (F.83)$$

$$Fpjp^{(i)} = \frac{Fpj^{(i)}}{Fpj^{(i)} + Fpp^{(i)}} \frac{(1 - Fpj^{(i)} - Fpp^{(i)})}{2} \quad (F.84)$$

$$Fppp^{(i)} = \frac{Fpp^{(i)}}{Fpj^{(i)} + Fpp^{(i)}} \frac{(1 - Fpj^{(i)} - Fpp^{(i)})}{2} \quad (F.85)$$

Caso 3: Segunda Zona - início da chama

$$Fpq^{(2)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(1)} + Aj^{(1)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fpp^{(2)})}{2} \quad (F.86)$$

$$Fjq^{(2)} = \frac{Aq}{Aq + Ap^{(1)}} \frac{(1 - Fjp^{(2)})}{2} \quad (F.87)$$

$$Fjpp^{(2)} = \frac{(1 - Fjp^{(2)} - Fjq^{(2)})}{2} \quad (F.88)$$

$$Fpjp^{(2)} = \frac{Fpj^{(2)}}{Fpj^{(2)} + Fpp^{(2)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fpp^{(2)} - Fpq^{(2)})}{2} \quad (F.89)$$

$$Fppp^{(2)} = \frac{Fpp^{(2)}}{Fpj^{(2)} + Fpp^{(2)}} \frac{(1 - Fpj^{(2)} - Fpp^{(2)} - Fpq^{(2)})}{2} \quad (F.90)$$

Caso 4 Última zona:

$$Fjpc = \frac{1}{2}(1 - Fjp') \quad (\text{F.91})$$

$$Fppc = \frac{1}{2}(1 - Fpj' - Fpp') \quad (\text{F.92})$$

APÊNDICE G: CÓDIGO FORTRAN DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

APÊNDICE G: CÓDIGO FORTRAN DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

1. Introdução:

Para executar os procedimentos de cálculos desenvolvidos neste trabalho, foi elaborado um código computacional empregando-se a linguagem FORTRAN. Neste apêndice, são apresentados fluxogramas simplificados do programa principal e de algumas das principais sub-rotinas, referentes ao código de simulação numérica do incinerador em estado estacionário, conforme pode ser verificado por meio das figuras G.1 a G.5. São apresentados também, breves descrições sobre as principais sub-rotinas integrantes do código.

2. Descrições das sub-rotinas:

- **sub-rotinas BMBE e BMBESCC**

Objetivo: Cálculo das temperaturas, vazões mássicas e composições de todas as correntes dentro do incinerador, a partir dos balanços de massa e energia, aplicados em cada zona, em estado estacionário e não-estacionário.

Argumentos: temperaturas, vazões, composições e entalpia das correntes que entram na zona, propriedades físicas e taxas de transferência de calor, estas obtidas por meio da sub-rotina RAD.

Tarefas: definição do procedimento em função da quantidade relativa de sólido; cálculo da taxa de queima de combustível e de voláteis oriundos do resíduo em função da disponibilidade de oxigênio; cálculo da taxa de evaporação da umidade associada ao sólido; cálculo da vazão mássica de voláteis não oxidados na zona em questão; cálculo das temperaturas, vazões mássicas e composições de todas as correntes dentro do incinerador, na zona em questão, unificação das correntes de gás anular e jato, a partir da zona onde termina a chama.

Observações: A sub-rotina rotulada por BMBE refere-se à câmara de combustão primária e a rotulada com BMBESCC refere-se à câmara secundária. Para o caso do estado não-estacionário, as temperaturas são obtidas pela integração das equações transientes de balanço de energia pelo método de Euler. As figuras G.3 e G.4 apresentam os fluxogramas simplificados para estas sub-rotinas.

- **Sub-rotina SPARROW:**

Objetivos: Cálculo dos fatores de forma entre as superfícies dentro de cada zona.

Argumentos: Dimensões e áreas superficiais calculadas pela sub-rotina AREA.

Tarefas: Cálculos dos fatores de forma mediante equações algébricas e integrações numéricas.

- **Sub-rotinas FORMAB E FORMABNS:**

Objetivos: Estimar os fatores de forma que relaciona superfícies de uma dada zona com superfícies de zonas adjacentes.

Argumentos: Dimensões e áreas superficiais calculadas pela sub-rotina AREA e fatores de forma calculados na sub-rotina SPARROW.

Tarefas: Cálculos dos fatores de forma mediante solução de sistema equações algébricas utilizando o método de eliminação de Gauss.

Observações: A subrotina rotulada por FORMAB refere-se à situações em que há a presença de sólidos, e a rotulada por FORMABNS refere-se àquelas na ausência de sólidos.

- **Sub-rotinas RESIST:**

Objetivos: Calcular as resistências à transferência de calor.

Argumentos: Fatores de forma, propriedades físicas e de transporte, dimensões e áreas superficiais, vazões mássicas e temperaturas.

Tarefas: Cálculo dos coeficientes de transferência de calor convectivo, os mesmos coeficientes análogos e cálculos das resistências.

- **Sub-rotina RAD:**

Objetivos: Calcular os fluxos de calor entre os nodos do circuito análogo e as temperaturas das paredes do forno e do queimador, interna e externamente, em estado estacionário.

Argumentos: Resistências à transferência de calor, potenciais térmicos conhecidos e estimados, estimativas das temperaturas das paredes e áreas superficiais.

Tarefas: Cálculo das temperaturas e dos potenciais mediante processo iterativo de convergência; cálculo do fluxo de calor entre o sólido, jato, gás anular e as paredes do forno, utilizando a lei de Kirchhoff para circuitos elétricos; e estimativa do calor trocado pelo sólido para baixas vazões mássicas de sólido.

Observações: A parede do queimador só é considerada na primeira e na segunda zonas. A figura G.5 apresenta o fluxograma simplificado para esta sub-rotina.

- **Sub-rotina RADIN:**

Objetivos: Calcular os fluxos de calor entre os nodos do circuito análogo e as temperaturas das superfícies internas das paredes do forno e do queimador, em estado não estacionário.

Argumentos: Resistências à transferência de calor, potenciais térmicos conhecidos e estimados, estimativas das temperaturas das paredes e áreas superficiais.

Tarefas: Cálculo das temperaturas e dos potenciais mediante processo iterativo de convergência; cálculo do fluxo de calor entre o sólido, jato, gás anular e as paredes do forno, utilizando a lei de Kirchhoff para circuitos elétricos; e estimativa do calor trocado pelo sólido para baixas vazões mássicas de sólido.

Observações: A parede do queimador só é considerada na primeira e na segunda zonas. A figura G.5 apresenta o fluxograma simplificado para esta sub-rotina. A temperatura da superfície externa da parede do forno, no caso do estado não-estacionário, é calculada pela subrotina CALCTPE, que leva em conta o transiente na transferência de calor através da parede.

- **Sub-rotina CALCTPE:**

Objetivos: Calcular as temperaturas da superfície externa da parede do forno, em estado não-estacionário.

Argumentos: Resistências à transferência de calor, potenciais térmicos conhecidos e estimados, estimativas das temperaturas das paredes e características geométricas e de transporte da parede do forno.

Tarefas: Cálculo da temperatura da superfície externa mediante a integração da equação de balanço de energia transiente na parede do forno, utilizando o método de Euler..

Observações: A solução numérica para a temperatura da parede externa é iterativa e calculada simultaneamente com os fluxos de calor na sub-rotina RAD.

- **Sub-rotinas POTCS e POTSS:**

Objetivos: Calcular os potenciais radiativos desconhecidos

Argumentos: Resistências à transferência de calor e potenciais conhecidos

Tarefas: Cálculo dos potenciais empregando o método de eliminação de Gauss nos sistemas de equações algébricas resultantes.

Observações: A sub-rotina rotulada por POTCS refere-se às situações onde há a presença de sólido e a rotulada por POTSS refere-se às situações onde o sólido é desconsiderado.

- **Sub-rotina FGPC:**

Objetivos: Cálculo do *fator de geração dos produtos de combustão*, e da razão estequiométrica oxigênio/combustível ou oxigênio/resíduo.

Argumentos: Pesos moleculares dos componentes.

Tarefas: Cálculo da estequiometria de uma reação de combustão genérica.

- **Sub-rotina CONDMI:**

Objetivos: Estimativas da viscosidade e da condutividade térmica dos gases em função da composição e da temperatura.

Argumentos: Pesos moleculares dos produtos de combustão, composição dos gases e temperatura.

Tarefas: Cálculo das propriedades individuais em função da temperatura e estimativas das propriedades em função da composição, utilizando uma regra de mistura.

- **Sub-rotina ROCP:**

Objetivos: Estimativas da capacidade calorífica e da massa específica dos gases em função da composição e da temperatura.

Argumentos: Pesos moleculares dos produtos de combustão, composição dos gases e temperatura.

Tarefas: Cálculo das propriedades individuais em função da temperatura e estimativas das propriedades em função da composição, utilizando uma regra de mistura.

- **Sub-rotina AREA:**

Objetivos: Cálculos das áreas de transferência de calor.

Argumentos: Dimensões do forno e tempo de residência do sólido.

Tarefas: Cálculo da altura do leito de sólido, mediante processo iterativo empregando-se o método de Newton-Raphson, teste para verificar se há sobreposição do jato em relação ao sólido, cálculos das áreas de trocas térmicas.

• **Sub-rotinas DISPO2P e DISPO2S:**

- Objetivos: Cálculo da demanda e da disponibilidade de oxigênio nas câmaras de combustão, assim como a fração mássica de oxigênio esperada na saída do incinerador.
- Argumentos: Vazões mássicas, fatores de geração de produtos de combustão e composições das correntes de ar de combustão.
- Tarefas: Cálculo da demanda e de disponibilidade de oxigênio, da fração mássica de oxigênio na saída do incinerador, e interação com o usuário para corrigir déficit de oxigênio, permitindo fixar o excesso ou alterar outras vazões de alimentações, através das sub-rotinas FIXAO2P e FIXAO2S.
- Observações: DISPO2P refere-se à câmara primária e DISPO2S à secundária.

• **Sub-rotinas FIXAO2P e FIXAO2S:**

- Objetivos: Fixar a fração mássica de oxigênio na saída da câmara primária ou secundária, recalculando as vazões mássicas de ar primário e secundário.
- Argumentos: Vazões mássicas, fatores de geração de produtos de combustão e composições das correntes de ar de combustão
- Tarefas: Cálculo da vazão mássica de ar primário requerida uma vez fixadas a vazão mássica de ar secundário e fração de oxigênio na saída da câmara; ou, de acordo com a opção do usuário, cálculo da vazão mássica de ar secundário requerida uma vez fixadas a vazão mássica de ar primário e fração de oxigênio na saída da câmara.

• **Sub-rotina ALTREFP e ALTREFS:**

- Objetivos: Alteração dos dados de referência de entrada da câmara primária ALTREFP e da câmara secundária. ALTREFS.

• **Sub-rotina DADOS:**

- Objetivos: Entrada de dados para a simulação de referência.

• **Sub-rotina INICIO:**

- Objetivos: Divisão das câmaras em zonas e cálculo dos comprimentos de cada uma delas.

• **Sub-rotina SOLIDO:**

- Objetivos: Cálculo da fração que representa vazão mássica de sólido em relação à vazão mássica global no forno e definição do procedimento de cálculo.
- Observações: Se o sólido representar menos do que 2% da vazão mássica total, o sólido não é considerado no balanço de energia, e a sua temperatura é estimada.

• **Sub-rotina ENTRADA:**

- Objetivos: Cálculos das composições, vazões mássicas, temperaturas,

- **Sub-rotina GAUSSJ**

Objetivos: Solução de sistema de equações algébricas pelo método de eliminação de Gauss.

- **Sub-rotina TESCON:**

Objetivos: Teste de convergência das temperaturas, composições e vazões mássicas de todas as zonas e cálculo das novas estimativas pela média aritmética.

- **Subrotina STORE:**

Objetivos: Armazenamentos das variáveis para teste de convergência.

- **Subrotina ESTIMA:**

Objetivos: Cálculo das estimativas iniciais para vazões mássicas e temperaturas.

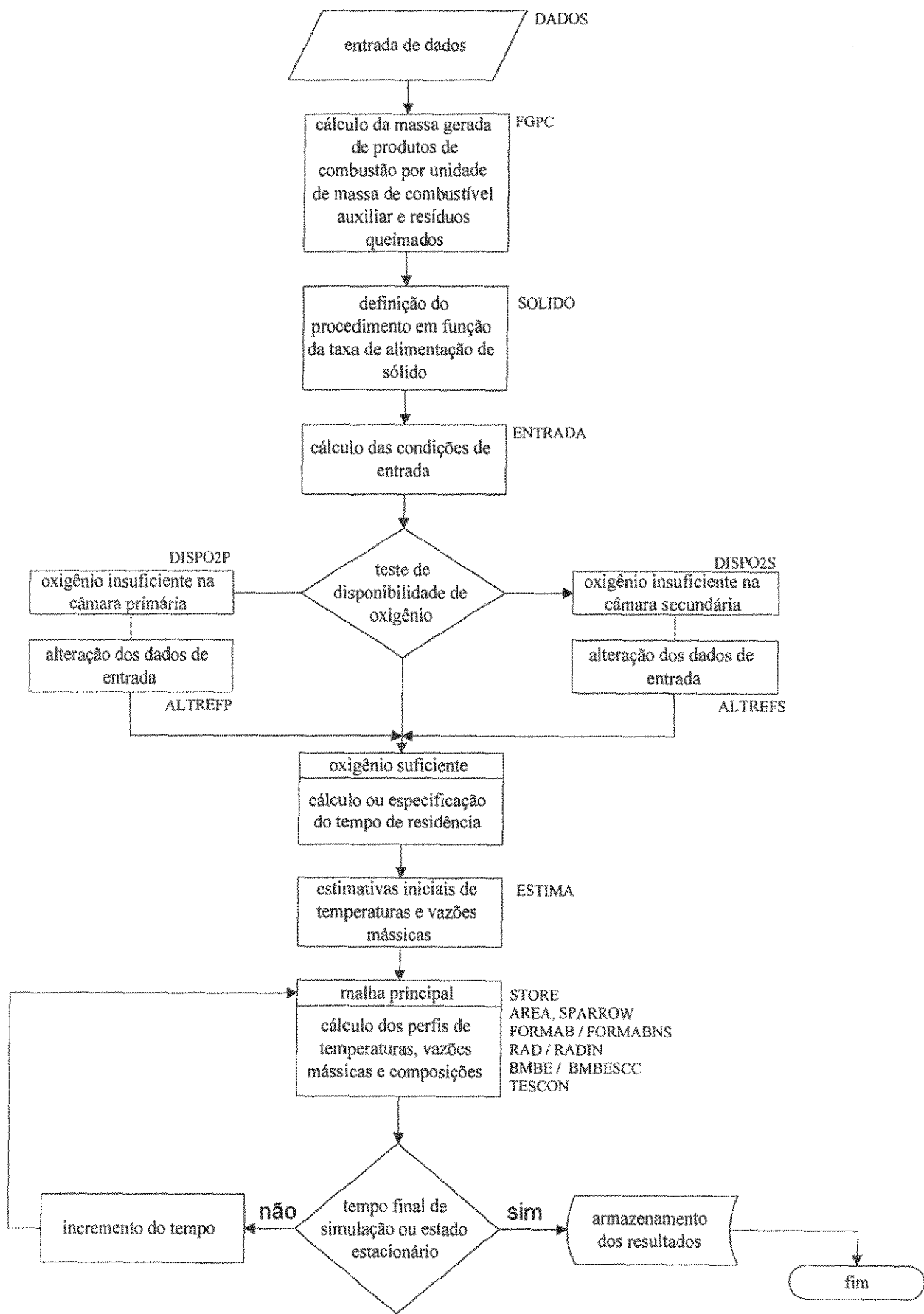


Figura G.1: Fluxograma simplificado do programa principal.

Malha principal

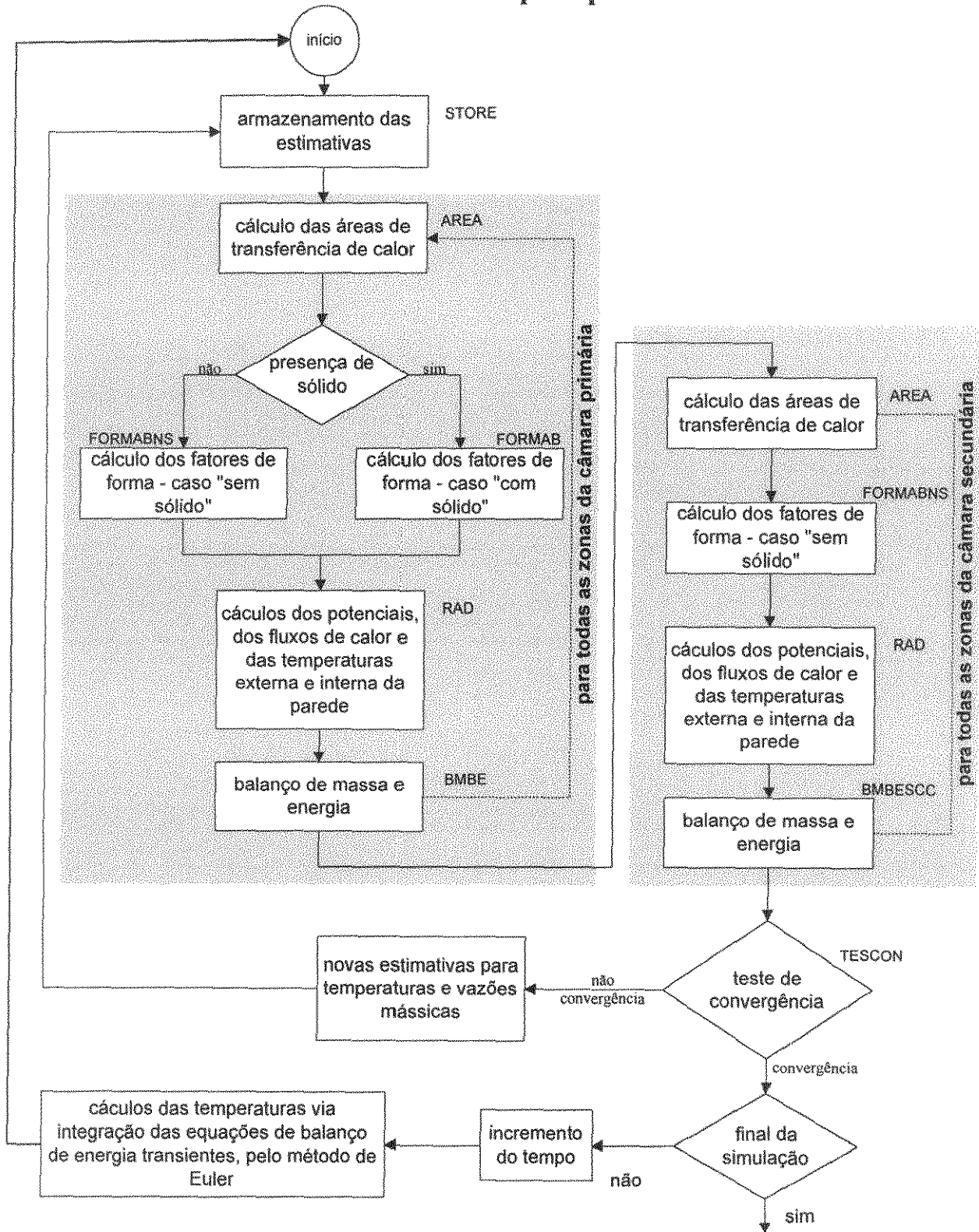


Figura G.2: Detalhe do programa principal: fluxograma simplificado da malha principal

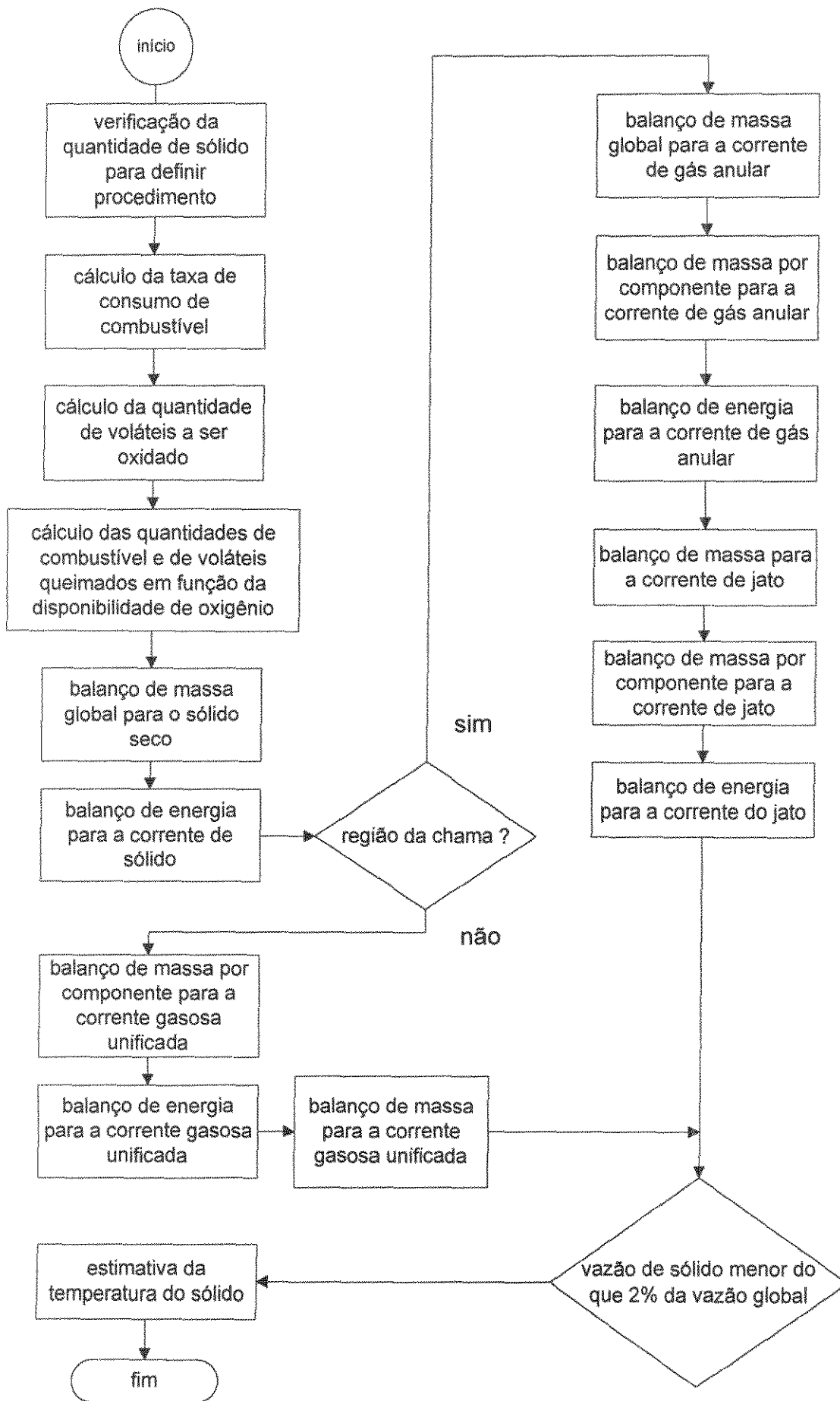


Figura G.3 : Fluxograma simplificado da sub-rotina BMBE.

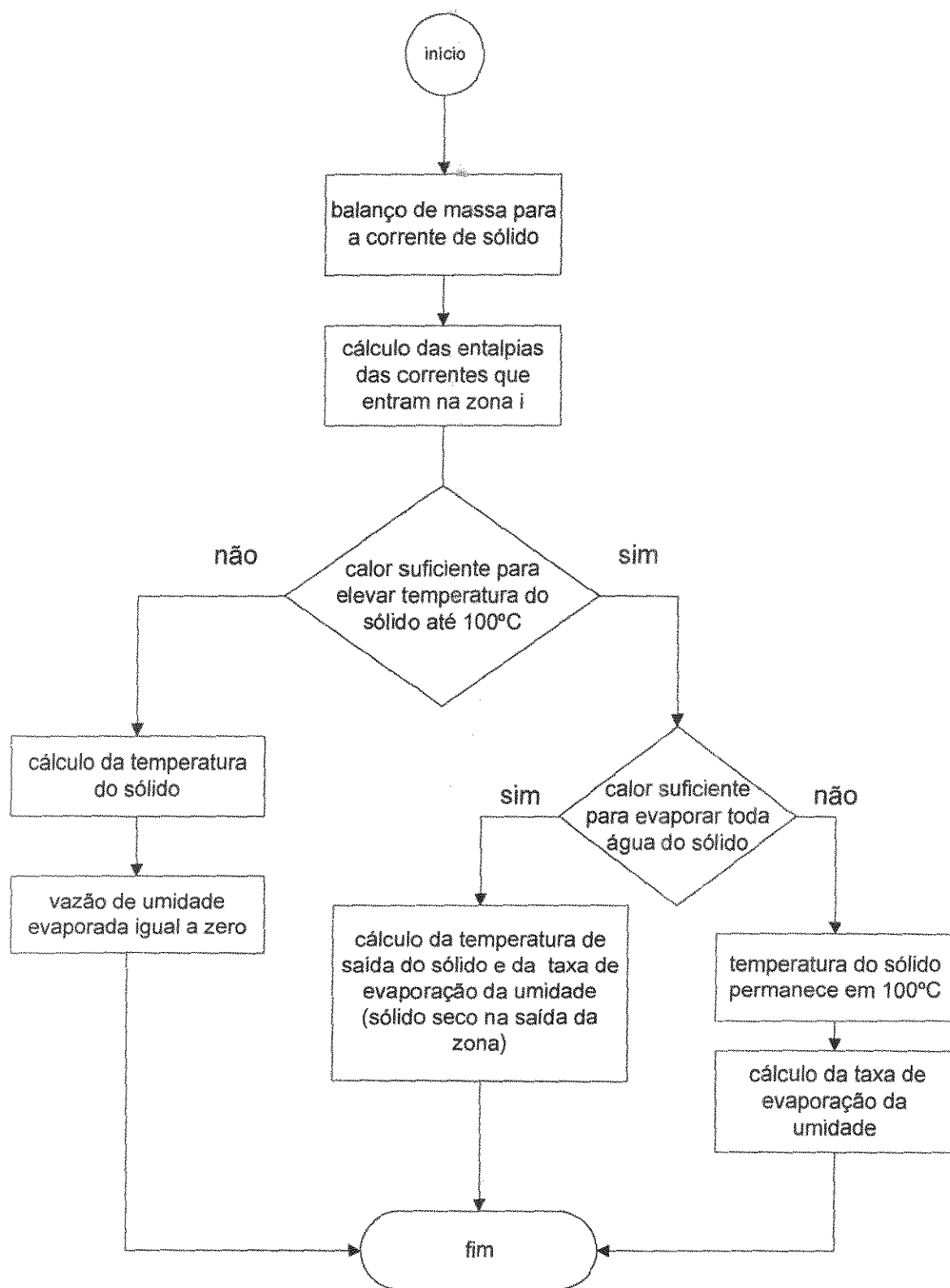


Figura G.4 : Detalhe da sub-rotina BMBE: fluxograma simplificado do balanço de massa e energia para o sólido

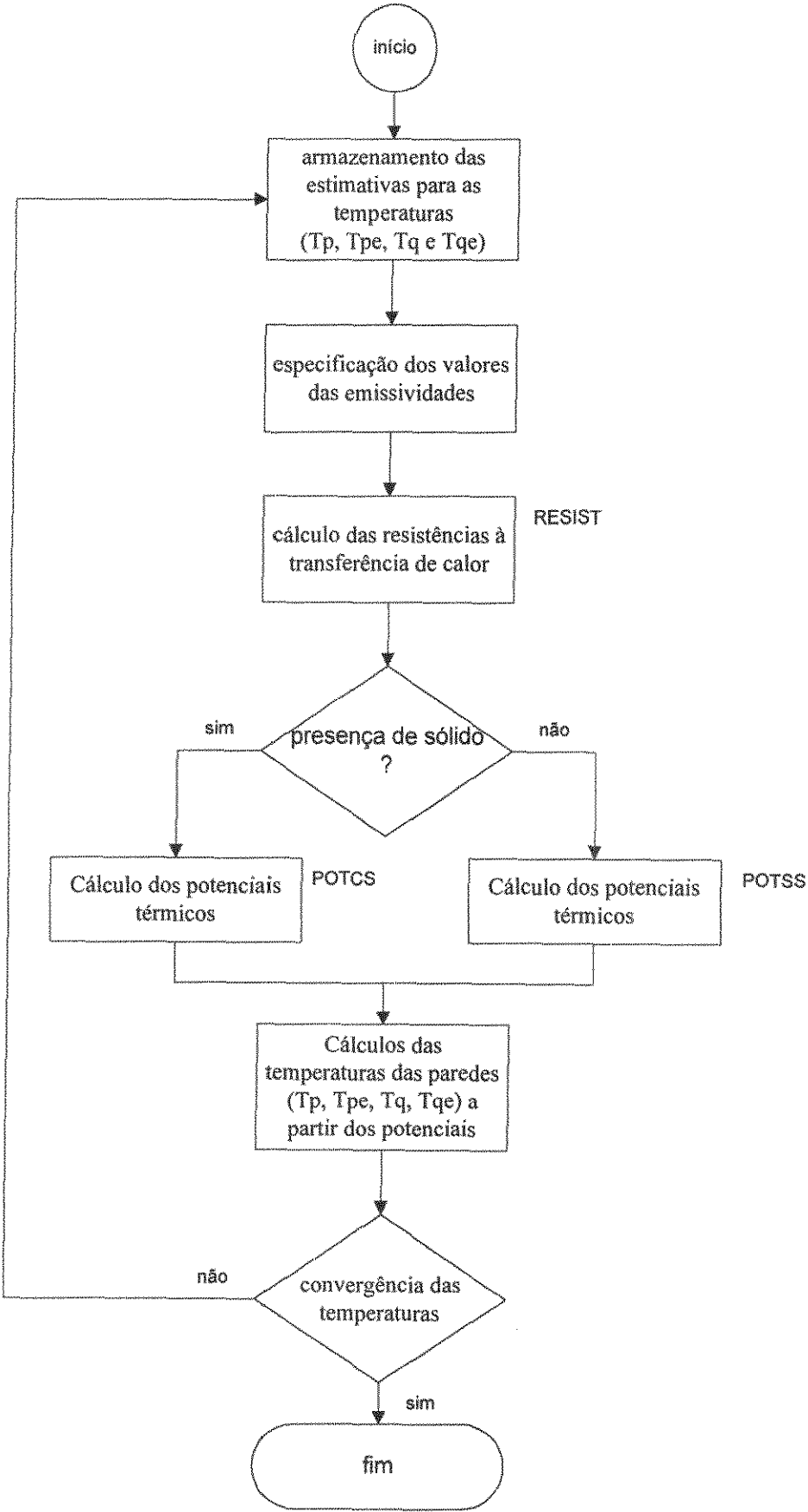


Figura G.5 : Fluxograma simplificado da sub-rotina RAD.

3. Código FORTRAN para simulação numérica de incineradores de resíduos sólidos industriais composto de forno rotativo e pós-combustor, em estado estacionário e não estacionário

```

$debug
CÓDIGO FORTRAN PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE INCINERADORES DE
RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS COMPOSTO DE FORNO ROTATIVO E
PÓS-COMBUSTOR, EM ESTADO ESTACIONÁRIO E NÃO ESTACIONÁRIO
CHH =ihp : zona de início da região pós-chama na câmara primária
CHH =ihs : zona de início da região pós-chama na câmara secundária
CHH =igh : zona de mudança de procedimento devido à baixa vazão de sólido
CHH =inj : zona de injeção de resíduo sólido líquido na câmara secundária
CHH =inj : zona de injeção de combustível na câmara secundária
CHH =nsp : última seção transversal da câmara primária
CHH =nsp : zona de interligação entre as câmaras primária e secundária
CHH =ns : última seção transversal da câmara secundária
CHH nsp-1 : número de zonas na câmara primária
CHH ns-1 : número total de zonas, incluindo a interligação
CHH isol=0 : sólido abaixo do valor limite embora alimentação acima
CHH isol=1 : sólido acima do valor limite
CHH jsol=1 : alimentação de sólido acima do valor limite
CHH jsol=0 : alimentação de sólido abaixo do valor limite
CHH jr=1 : refere-se à câmara de combustão primária
CHH jr=2 : refere-se à câmara de combustão secundária

```

```

c
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,conv,nsp
parameter(nt=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8,erro=1.D-8)
REAL*8 Jp,Js,Jpe,jq,jqe

common/FF/Fp(j),Fjp(nt),Fsj(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(j),Fppj(nt),Fppp(nt),Fppp(j),Fppp(j),Fppp(j)
common/FF/Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j),Fp(j)
common/RR/Rp,Rs,Rq,Rq,Rps,Rpe,Rpea,Rqea,Rp(j),Rs(j),Rpp,Rpc,Rsp
common/RR/Rjp,Rjs,Rjq(2),Rjpc,Rcps,Rcpj,Rcsg,Rcppe,Rcpea,Rcqj
common/RR/Rpp(j),Rppp(j),Rppp(j),Rcpj,Rcpj,Rcpj,Rcpj
common/EE/Ep(j),Es(nt),Epe(nt),Eg(nt),Ej(nt),Ea,Epc,Eq,Eqe
common/J/Jp(j),Js(nt),Jpe(nt),Jq,jqe
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tp,Tp(2),Tas(2),Tcb(2),Trl
common/TT/Tn,Tn(nt),Tgn(nt),Tjn(nt),Tpn(nt),Tpen(nt),Tqn,Tqen
common/TT/TTs(nt,120),TTg(nt,120),TTj(nt,120),TTP(nt,120),
#TTpe(nt,120)
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Ms(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMs,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/DM/DMag(nt),DMss(nt),DMen(nt),DMcb(nt)
common/FISA/cps, cpa, cpj(nt), cpj(nt),DHva,Cprl,Cpsv
common/FISB/conds,condg(nt),condq,condp(nt),difs,epsip,epsis,
# epsipe,epsij(nt),talg,epscha,epsnch
common/FISC/mig(nt),Pr
common/FISD/fros
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/GEOA/rin(3),rext(3),rj(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/LAM/PCic,PCir(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/XMM/XMg(nt),XMj(nt),XMss(nt),XMag(nt)
common/XTT/XTs(nt),XTg(nt),XTj(nt),XTp(nt)
common/Xyy/Xyg(nt,11),Xyj(nt,11)
common/QQ/qg(nt),qj(nt),qg(nt)
common/RAIO/reap,riap,ref,rf
common/HH/Hss(nt),Hag(nt),Hva(nt),Hsv(nt),Hj(nt),Hen(nt),
# Qger(nt),Hg(nt),DHrp(nt)
common/CTC/hgs(nt),hps(nt),hext(nt),hgp(nt)
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/contr/ihp,ihp,igh,icp,isol,jsol,ns,nsp,inq,imp
common/separ/csp(25)
common/din/dt,ropar, cpar, time(120)
common/trans/fjhp,Hgihp,cpjhp,cpghp,Hjihs,Hgihs,cpjihs,cpgihs

```

PROGRAMA PRINCIPAL

```

C-1 : ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA
call SENPAR

C-2 : ENTRADA DE DADOS ( pode ser substituído por um arquivo de dados):
call DADOS

C-3 : CÁLCULO DA MASSA GERADA DE PRODUTOS DE COMBUSTÃO por
unidade de massa
c de combustível queimado e de resíduo
call FGPC

C-4 : NÚMERO DE ZONAS, comprimento, zona de injeção de combustível, etc...
call INICIO

C-5 : ALTERAÇÕES DOS VALORES DE REFERÊNCIA ( vazões mássicas, raio do
jato,...)
c a.câmara de combustão primária

```

```

call ALTREFF
epscha = epscha*csp(16) ! sensibilidade paramétrica
epsnch = epsnch*csp(17) ! sensibilidade paramétrica
c b.câmara de combustão secundária
if (ns.ne.nsp) then
call ALTREFS
endif

C-6 : DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO (função da taxa alimentação de sólido )
call SOLIDO

C-7 : CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DE ENTRADA:
call ENTRADA

C-8 : TESTE DE DISPONIBILIDADE DE OXIGÊNIO e correção dos valores
c a.câmara de combustão primária:
call DISPO2P

c b.câmara de combustão secundária:
if (ns.ne.nsp) then
call DISPO2S
endif

c definição se a simulação é somente estacionária ou dinâmica também
print* ' '
print* '*****REGIME DA SIMULACAO: ESTADO ESTACIONARIO OU
#NAO ESTACIONARIO*****
write(*,101)
read(*,102)tfinal

C-9 : INICIO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA:
print* ' '
print* '***** AGUARDE : EXECUTANDO SIMULACAO EM ESTADO EST
#ACIONARIO*****

c a.Cálculo do tempo de residência do sólido:
tres = DZ(1)/(2*pi*tan(alfa)*rot*rin(1)) ! correlacao Rhodia
tres = 180.d0*csp(21) ! valor típico e de norma

c b.Estimativas iniciais
do i=1,ns-1
call estima(i+1)
end do
t=0. !D inicio tempo
kir = 0 !D contador de iterações para registro de dados
jr = 1 !D indice da matriz de registro de dados
kdin = 0 !D senha para subrotina: 0=estacionário e 1=dinâmico
ropar =1490.
cpar =900.
conv=1
ite = 0

SIMULAÇÃO EM ESTADO ESTACIONÁRIO
C.....início do loop principal
do while (conv.eq.1)
conv=0
C c. Armazenamento das estimativas iniciais para teste de convergência:
do i=2,ns
call store(i)
end do
c d. Cálculos das temperaturas, vazões mássicas e composições:
ihp = ns +1 !valor inicial - inatingível
ite = ite + 1 !contador de iteração p/ flexibilizar converg.
call area(1,tres,1)

c e.*****CÂMARA DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA***
do i=1,nsp-1
c início da região gasosa única : o 2nd argumento é para que
c a instrução seja executada uma única vez dentro do "do"
if (i.gt.2) then
if ((Mcb(i).eq.0.).and.(i.lt.ihp)) then
ihp=i+1 ! ihp identifica início da pós-chama
endif
endif

if (i.ne.nsp-1) then ! calcula áreas de trocas calor
call AREA(i+1,tres,1)
endif
c admite-se a possibilidade de ausência de sólido (isol=0):
if (isol.eq.1) then
call FormaB(i) ! calcula fatores de forma
else
call Formabns(i,1) ! fatores formas sem solido
endif
call RAD(i,1) ! calcula fluxos de calor estacionário
call BMBE(i,kdin) ! balanço de massa e energia
end do

C f.*****CÂMARA DE COMBUSTÃO SECUNDÁRIA***

```

```

if (ns.ne.nsp) then      ! ns=nsp: simula cam. prim. somente
  ihs = ns              ! valor inicial inatingível
  call AREA(nsp,tres,3) ! câmara de interligação
  do i=nsp,ns-1
    início da região gasosa única : o 2nd argumento é para que
    a instrução seja executada uma única vez dentro do "do"
    if (i.ge.inj) then
      if ((Mcb(i).eq.0.) .and. (i.lt.ihs)) then
        ihs=i+1 ! ihs identifica início da pós-chama
      endif
    endif
    call AREA(i+1,tres,2)
    call Formabns(i,2)
    if (i.eq.nsp) then ! câmara de interligação
      call RAD(i,3)
    else
      call RAD(i,2) ! câmara secundária
    endif
    call BMBESCC(i,kdin)
  enddo
endif
C *****
c g.  Teste de convergência:
      do i=2,ns
        call tescon(i,ite,conv)
      end do

c h.  impressões intermediárias
      if (ite.eq.200) then
        imp = 200 ! após 200 iterações impressões intermediárias
      endif
      if (imp.ne.0) then
        ip = ip + 1
        if (ip.eq.imp) then
          print *, 'impressao intermediaria ', ite
          call WTMY
          ip = 0
        endif
      endif
      end do

c .....fim do loop principal

c i: Impressões estado estacionário inicial
      write(*,9)ite
      if (igh.lt.(nsp-1)) then
        write(*,10)igh
      else
        write(*,11)
      endif
      write(*,12)ihp
      if (ns.ne.nsp) then
        write(*,13)ihs
      endif
      print*, ''
      call WTMY
      Tpc=(Epc/sigma)**0.25DO-273.
      write(*,8)Tpc

```

SIMULAÇÃO EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

```

c
acum = 0.
c perturbações no estado estacionário:
call perturb ! introduz perturbações
kdin = 1 ! senha para dinamica nas subrotinas
c incremento de tempo:
dt = 0.1 ! segundo
dreg = tfinal/20. ! 20= número de registros
c Cálculo do intervalo de registro:
c ir = int(dreg/dt) + 1 ! "+1" p/ qdo dreg/dt<1
ir = 20
kir=ir-1 ! para imprimir o valor de est. estacion. como o primeiro
do while (t.le.tfinal)

c e. *****CÂMARA DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA - NÃO
ESTACIONÁRIO***
      do i=1,nsp-1
        início da região gasosa única : o 2nd argumento é para que
        a instrução seja executada uma única vez dentro do "do"
        if (i.gt.2) then
          if ((Mcb(i).eq.0.) .and. (i.lt.ihp)) then
            ihp=i+1 ! ihp identifica início da pós-chama
          endif
        endif

        if (i.ne.nsp-1) then ! calcula áreas de trocas calor
          call AREA(i+1,tres,1)
        endif
        admite-se a possibilidade de ausência de sólido (isol=0):
        if (isol.eq.1) then
          call FormaB(i) ! calcula fatores de forma
        else
          call Formabns(i,1) ! fatores formas sem solido
        endif
        call RESIST(i,1) ! câmara primária
        call calctpe(i,1)
        call RADIN(i) ! calcula fluxos de calor não estacionário

```

```

      call BMBE(i,1) ! balanço de massa e energia
      end do

C (. *****CÂMARA DE COMBUSTÃO SECUNDÁRIA - NÃO
ESTACIONÁRIO ***
      if (ns.ne.nsp) then ! ns=nsp: simula cam. prim. somente
        ihs = ns ! valor inicial inatingível
        call AREA(nsp,tres,3) ! câmara de interligação
        do i=nsp,ns-1
          início da região gasosa única : o 2nd argumento é para que
          a instrução seja executada uma única vez dentro do "do"
          if (i.ge.inj) then
            if ((Mcb(i).eq.0.) .and. (i.lt.ihs)) then
              ihs=i+1 ! ihs identifica início da pós-chama
            endif
          endif
          call AREA(i+1,tres,2) ! 2 indica cam secund
          call Formabns(i,2)
          if (i.eq.nsp) then ! câmara de interligação
            call RESIST(i,3)
            call calctpe(i,3)
          else
            call RESIST(i,2) ! câmara secundária
            call calctpe(i,2)
          endif
          call RADIN(i)
          call BMBESCC(i,1) ! 1 indica não estacionário
        enddo
      endif
C *****
      t = t + dt
      if (tfinal.ne.0.) then
        kir = kir + 1
        do i=1, ns-1
          acum = acum + abs(Tgn(i+1)-Tg(i+1))
        enddo
        do i=1, ns-1
          Ts(i+1) = Tsn(i+1)
          Tj(i+1) = Tjn(i+1)
          Tg(i+1) = Tgn(i+1)
          Tpe(i) = Tpen(i)
        enddo
        Tqe = Tqen
        Tq = Tqn
        if ((kir.eq.ir).or.(acum.ge.50.)) then
          acum = 0.
          if (kir.eq.ir) then
            print *, 'tempo = ', t
            call REGIST (jr)
            time(jr) = t
            kir = 0
            jr = jr + 1 ! incrementa índice do registro
          endif
          end if
          write(*,222)Tj(4),Tj(11),Ts(5),Ts(11),Tp(4),Tpe(4)

        enddo ! fim da simulação dinâmica
        if (tfinal.ne.0) then
          print*, ' 1 - transferir para arquivo de dados '
          print*, ' 0 - imprimir na tela somente '
          read(*,5)iarq
          if (iarq.eq.1) then
            write (15,20) jr,(time(ji),ji=1,jr)
            write (16,20) jr,(time(ji),ji=1,jr)
            write (17,20) jr,(time(ji),ji=1,jr)
            write (18,20) jr,(time(ji),ji=1,jr)
            write (19,20) jr,(time(ji),ji=1,jr)
            do i=1,ns
              Write (15,20) i,(Ts(i,ji),ji=1,jr)
              Write (16,20) i,(Tj(i,ji),ji=1,jr)
              Write (17,20) i,(Ttg(i,ji),ji=1,jr)
              Write (18,20) i,(Ttp(i,ji),ji=1,jr)
              Write (19,20) i,(Tpe(i,ji),ji=1,jr)
            enddo
          endif
          end if
          5 format(I2)
          8 format(7x,'temperatura final ( pos-combustor) ',F8.3)
          9 format(7x,'numero de iteracoes totais ',I3)
          10 format(7x,'solido desconsiderado no circuito a partir da zona',I2)
          11 format(7x,'solido considerado em toda extensao do forno ')
          12 format(7x,'inicio da regio pos-chama na camara primaria ',I2)
          13 format(7x,'inicio da regio pos-chama na camara secundaria ',I2)
          20 format(I2,90('1x,F10.3))
          101 format(7x,'simulacao em estado estacionario: digite 0',7x,
            #simulacao NAO estacionaria: entre com o tempo de simulacao')
          102 format(F10.5)
          222 format(6(1x,F10.2))
        end

```

BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA PARA CÂMARA PRIMÁRIA

SUBROUTINE BMBE (i,kdin)
C-1 DECLARACOES:
implicit double precision (a-h,i-z)

```

integer ns,nt,nsnp
parameter(nt=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8,erro=1.D-8)

common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tt1
common/TTn/Tsn(nt),Tgn(nt),Tjn(nt),Tpn(nt),Tpen(nt),Tqn,Tqen
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/DM/DMag(nt),DMss(nt),DMen(nt),DMcb(nt)
common/FISA/cpps, cpa, cpg(nt), cpj(nt),DHva,Cpri,Cpsv
common/FISC/mig(nt),Pr
common/FISD/ros
common/GEOA/rin(3),rext(3),qj(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GEOB/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/y/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/FLAM/PClc,PCIr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/Q/Qs(nt),qj(nt),qg(nt)
common/HH/Hss(nt),Hag(nt),Hva(nt),Hsv(nt),Hj(nt),Hen(nt),
# Qger(nt),Hg(nt),DHP(nt)
common/teste/chk(nt,4)
common/contr/ihp,ihp,igh,icp,isol,jol,ns,nsnp,inj,imp
common/separ/csp(25)
common/din/dt,ropar, cpar, time(120)
common/trans/Hjhp,Hjhp,cpjihp,cpjihp,Hjhs,Hgihp,cpjihp,cpjihp
C-2 verificação da quantidade de sólido na zona para definir procedimento:
rel = (Mss(i)+Mag(i))/(Mss(1)+Mag(1)+Mg(1)+Mj(1))
if (rel.lt.0.02) then
C quantidade de sólido abaixo do limite - mudança de procedimento
iso:=0 ! desconsidera a presença de sólido
else
iso:=1 ! considera a presença de sólido
igh = i ! igh identifica a zona de mudança de procedimento
endif

C-3 taxa de consumo de combustível: reagente limite é o oxigênio
if ((i.eq.1).or.(Mcb(i).eq.0.D0)) then
DMcb(i)=0.D0 ! para a 1a. zona e região pós-chama
else
DMcb(i)=(DMen(i)*Yg(i,10)+Mjc(i,10))/(FM(10,1))
endif

if ((Mcb(i)-DMcb(i)).lt.0.) then ! fim da chama
DMcb(i)=Mcb(i) ! correção de DMcb(i)
endif

C-4 gaseificação do sólido e oxidação dos voláteis
a. cinética da redução de massa do sólido (estabelecida inicialmente
c na subrotina "entrada"):
if ((Mas(i)-DMss(i)).le.Mss(1)*tcin(1)) then
* limite de gaseificação em função do teor de cinzas
DMss(i) = Mss(i)-Mss(1)*tcin(1)
endif

b. quantidade de voláteis oriundos do sólido na zona i, a ser oxidada:
DMsvc = Msv(i) + DMss(i)

C-5 disponibilidade de oxigênio:
if (i.lt.ihp) then
a. cálculo das quantidades de resíduo e combustível queimados le-
vando em conta a disponibilidade de oxigênio:
* para as zonas com duas regiões gasosas:
Mgc(i+1,10) = (Mg(i)-DMen(i)-Msv(i))*yg(i,10) + FM(10,2)*DMsvc
Mjc(i+1,10) = Mjc(i,10) + DMen(i)*yg(i,10) + FM(10,1)*DMcb(i)
if (Mgc(i+1,10).lt.0.) then
quantidade de voláteis que sofrerá combustão de fato:
DMsvc = -(Mg(i)-DMen(i)-Msv(i))*yg(i,10)/FM(10,2)

disponibilidade de oxigênio no jato:
elseif (Mjc(i+1,10).lt.0.) then
quantidade de combustível queimado de fato:
DMcb(i) = -(Mjc(i,10)+DMen(i)*yg(i,10))/FM(10,1)
endif
else
* para as zonas com única região gasosa:
oxigenio disponível e demandado:
oxdema = -(FM(10,2)*DMsvc+FM(10,1)*DMcb(i))
oxdisp = (Mg(i)-Msv(i))*yg(i,10)+Mj(i,10)
if (oxdisp.lt.oxdema) then
calcula das quantidades queimadas compatível com o
oxigenio disponível
fator = oxdisp/oxdema
DMsvc = DMsvc*fator
DMcb(i) = DMcb(i)*fator
endif
endif
endif

```

[illegible]

[illegible]

```

IF (Hj(i-1).ne.0.D0) then
    call rocp(i,yj,Tj(i),ro,cpj(i))
    cpj(i)=cpj(i)*csp(5) ! sensibilidade parametrica
    Hj(i) = Mj(i)*cpj(i)*(Tj(i) - Tref)
c   preservação dos valores antes da mistura
    Hjihp = Hj(i)
    Hgihp = Hg(i)
    cpjihp = cpj(i)
    cpjihp = cpj(i)
c   para o cálculo da derivada correta

do j=1,10 ! composição homogênea
    yg(i,j)=(yg(i,j)*(Mg(i)-Msv(i))+y(j,i)*Mj(i))/
    # (Mg(i)+Mj(i)-Msv(i))
    Yj(i,j)=yg(i,j)
    enddo
    Mg(i) = Mg(i)+Mj(i) ! vazão mássica gás+jato
    Hg(i) = Hg(i) + Hj(i) ! energia total fase gas
    do j=1,ns
        Hj(i) = 0.D0 ! execução expres lógica
        Mj(j) = 0.D0
    enddo
enddo
endif

c b. Balanço de massa global:
Mg(i+1) = Mg(i) + DMss(i) + DMag(i)

c c. Balanço de massa por componente:
Syg = 0.
do j=1,10 ! não entra o combustível
    Mgc(i+1,j)=(Mg(i)-Msv(i))*yg(i,j)+FM(j,2)*DMsvc
    if (j.eq.2) then
        Mgc(i+1,j)=Mgc(i+1,j)+DMag(i) !acrescenta-se a umidade
    endif
    yg(i+1,j)=Mgc(i+1,j)/(Mg(i+1)-Msv(i+1))
    yj(i+1,j)=yg(i+1,j)
    Syg = Syg + yg(i+1,j)
enddo
if (abs(Syg-1.d0).gt.1e-8) then
    print *,'B.M. p/ comp. p/ o gas anular nao fecha',i,Syg
endif

c d. Balanço de energia nos gases:
Hva(i) = DMag(i)*cpa*( 373 - Tref) + DHva)
Hsv(i) = DMss(i)*cpsv*(Ts(i) - Tref)
DHrp(i) = DMsvc*PClr(i)
call rocp(i,yg,Tg(i),ro,cpg(i))
call rocp(i+1,yg,Tg(i+1),rog,cpg(i+1))
cpg(i)=cpg(i)*csp(4) ! sensibilidade parametrica
cpg(i+1)=cpg(i+1)*csp(4) ! sensibilidade parametrica

c e. Cálculo da temperatura dos gases que saem da zona i :

if (kdin.eq.Q) then
    Tg(i+1)=(Hg(i) +Hva(i) + Hsv(i) + DHrp(i) + Qger(i)+
    # qg(i)+qj(i))/(Mg(i+1)*cpg(i+1)) + Tref
    Tj(i+1) = Tg(i+1)
else
    Vg = pi*rin(1)**2.d0*DZ(1)-Ah*DZ(1)
    rovcpg =rog*Vg*cpg(i+1)
    Hg(i+1) = Mg(i+1) * cpg(i+1) *(Tg(i+1) - Tref)
    dTdt = (Hg(i) +Hva(i) + Hsv(i) + DHrp(i) + Qger(i) +
    # qg(i) + qj(i) - Hg(i+1))/rovcpg !mg(i+1)*Cpg(i+1))
    Tgn(i+1) = Tg(i+1) + dTdt*dt
    Tjn(i+1) = Tgn(i+1)
    dTg = dTdt*dt
endif

endif

endif

c .....
c estimativa da temperatura do sólido para os casos de baixas vazões
c mesmo desde a alimentação ( Mss(1) representando menos de 2% de
if (jsol.eq.0) then
    if (Mss(1).ne.0.) then
        Ts(i+1) = (Tg(i+1)+Tp(i))/2. ! alimentação baixa e não nula
    else
        Ts(i+1) = 273. ! alimentação nula de sólido
    endif
endif
endif
print *,i,dTs,dTj,dTg
c rovcppar = (pi*(rest(i)**2.d0*rin(1)**2.d0)*dz(1))*ropar*Cppar
c print*,rovcpg,rovcpg
return
end

```

BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA PARA A CÂMARA SECUNDÁRIA

```

subroutine BM8ESC (l,kdin)
C-1  DECLARACOES:
      implicit double precision (a-h,i-z)
      integer ns,nt,nsp

      parameter(nt=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8,erro=1.D-8)

      common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqs,Ta,Tref
      common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Trl
      common/TT/Trn,Tsn(nt),Tsn(nb),Tjn(nt),Tjn(nb),Tpn(nt),Tpn(nb),Tqn

```

```

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MBB/Msa(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMrl,lcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/DM/DMag(nt),DMss(nt),DMen(nt),DMcb(nt)
common/FISA/cps, cpa, cpg(nt), cpj(nt),DHva,Cprl,Cpsv
common/FISA/mig(nt),Pr
common/FISD/ros
common/GEOA/rin(3),rex(3),rij(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/y/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/FLAM/PClc, PClr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/QQ/qe(nt),qj(nt),qg(nt)
common/HH/Hss(nt),Hag(nt),Hva(nt),Hsv(nt),Hj(nt),Hen(nt),
# Qger(nt),Hg(nt),DHrp(nt)
common/teste/chk(nt,4)
common/contr/ihp, ihs, igh, icp, isol,isol,ns, nsp, inj, imp
common/separ/csp(25)
common/par/alfa, rocb, umid(2), cpcb
common/din/dt, ropar, cpar, time(120)
common/trans/Hjhp, Hgihp, cpjihp, cpjihp, Hjihs, Hgihs, cpjihp, cpjihp

```

dimension y(1,11)

C-2 condições especiais na zona de injeção da câmara de combustão secundária:

if (i.eq.inj) then

c a. vazões mássicas e composições: para o balanço de massa

c a.1 reformação do jato na câmara secundária:

```

Mcb(i) = Fcb(2) ! alimentação da combustível
Mj(i) = Map(2) + Mcb(i) ! entrada de ar primário no jato
Mjc(i,10) = yoxp(2) * Map(2) ! oxigênio no jato
Mjc(i,4) = (1 - yoxp(2)) * Map(2) ! nitrogênio no jato
Yj(i,10) = Mjc(i,10) / Mj(i) ! oxigênio no jato
Yj(i,4) = Mjc(i,4) / Mj(i) ! nitrogênio no jato
Yj(i,11) = Mcb(i) / Mj(i) ! combustível no jato

```

c a.2 efeito da entrada do ar secundário na câmara secundária:

```

Mg(i) = Mg(i) + Mas(2) ! entrada de ar secundário no gás anular
Mgc(i,10) = yoxs(2) * Mas(2) + Mgc(i,10) ! oxigênio no gás anular
Mgc(i,4) = (1 - yoxs(2)) * Mas(2) + Mgc(i,4) ! nitrogênio no gás anular
do j=1,10
    yg(i,j) = Mgc(i,j) / (Mg(i) - Msv(i)) ! recálculo da composição (diluição)
enddo

```

c a.3 evaporação completa da água na zona de injeção do resíduo líquido
DMag(i) = Mliq * umid(2)

c a.4 evaporação completa do resíduo líquido na zona de injeção:

c (exclui-se cinzas e umidade que é considerada à parte)
DMliq = Mliq * (1 - umid(2) - lcin(2))

c b. entalpias: para o balanço de energia

c b.1 cálculos das capacidades caloríficas:

```

do jy=1,11
    y(1,jy) = 0.d0
enddo

```

c ...ar primário:

```

y(1,10) = yoxp(2) ! duas dimensões para compatibilizar sub
y(1,4) = 1 - yoxp(2)
call rocp(1,yg,Tap(2),ro,cpap)

```

c ...ar secundário:

```

y(1,10) = yoxs(2) ! duas dimensões para compatibilizar sub
y(1,4) = 1 - yoxs(2)
call rocp(1,yg,Tas(2),ro,cpas)

```

c b.2 entalpia da água associada ao resíduo líquido:

c ...energia necessária para aquecer e vaporizar a água, proveniente
do gás anular. É um termo de débito no balanço de energia.
Haqvap = DMag(i) * cpa * (373 - Ta) + DHva

c ...entalpia da água c/ o débito da energia p/ aquece-la e vaporiza-la
Hva(i) = DMag(i) * cpa * (Ta - Tref) + Haqvap

c b.3 entalpia do ar primário:
Hap = Map(2) * Cpap * (Tap(2) - Tref)

c b.4 entalpia do ar secundário:
Has = Mas(2) * Cpas * (Tas(2) - Tref)

c b.5 entalpia do combustível:
Hcb = Fcb(2) * Cpcb * (Tcb(2) - Tref)

c b.6 entalpia das substâncias voláteis:
Hsv(i) = DMliq * cprl * (Ta - Tref)

c (está sendo considerado, a priori, que há energia suficiente para eva-
porar a umidade, o resíduo líquido, independentemente se há ou não o-
xigênio para a oxidação dos voláteis)

else

c para as demais zonas no SCC, não há evaporação de água ou res. líq
DMag(i) = 0.d0
DMliq = 0.d0

```

Mag(i) = 0.d0
DMss(i) = 0.d0
Hva(i) = 0.d0
Hsv(i) = 0.d0
Has = 0.d0
Hap = 0.d0
Hcb = 0.d0

```

end if

C-3 quantidade de voláteis disponíveis para oxidação na zona i:
DMsv = Msv(i) + DMliq

C-4 taxa de consumo de combustível: reagente limite é o oxigênio

```

if ((i.lt.inj) .or. (Mcb(i).eq.0.D0)) then
    DMcb(i) = 0.D0 ! para zonas sem chama
else
    DMcb(i) = (DMen(i) * Yg(i,10) + Mjc(i,10)) / (FM(10,1))
endif

```

```

if ((Mcb(i) - DMcb(i)).lt.0.) then ! fim da chama
    DMcb(i) = Mcb(i) ! correção de DMcb(i)
endif

```

C-5 disponibilidade de oxigênio:

if (i.lt.ihs) then ! ihs: final da chama na cam. sec.
c a. cálculo das quantidades de resíduo e combustível queimados le-
vando em conta a disponibilidade de oxigênio:

c a.1 para as zonas com duas regiões gasosas:

```

Mgc(i+1,10) = (Mg(i) - DMen(i) - Msv(i)) * yg(i,10) + FM(10,3) * DMsv
Mjc(i+1,10) = Mjc(i,10) + DMen(i) * yg(i,10) + FM(10,1) * DMcb(i)
if (Mgc(i+1,10).lt.0.) then

```

c ...quantidade de voláteis que sofrerá combustão de fato:
DMsv = -(Mg(i) - DMen(i) - Msv(i)) * yg(i,10) / FM(10,3)

c ...disponibilidade de oxigênio no jato:
elseif (Mjc(i+1,10).lt.0.) then

```

c ...quantidade de combustível queimado de fato:
DMcb(i) = -(Mjc(i,10) + DMen(i) * yg(i,10)) / FM(10,1)
endif
else

```

c a.2 para as zonas com única região gasosa:

c ...oxigênio disponível e demandado:
oxdema = -(FM(10,3) * DMsv + FM(10,1) * DMcb(i))
oxdisp = (Mg(i) - Msv(i)) * yg(i,10) + Mj(i) * yj(i,10)
if (oxdisp.lt.oxdema) then

```

c ...cálculo das quantidades queimadas compatível com o
c oxigênio disponível
fator = oxdisp / oxdema
DMsv = DMsv * fator
DMcb(i) = DMcb(i) * fator
endif
endif

```

C-6 gerações de energia devido à combustão dos voláteis:
DHrp(i) = DMsv * PClr(2)

C-7 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NO GÁS ANULAR NA ZONA i:

c a. voláteis não oxidados que deixam a zona i:

Msv(i+1) = Msv(i) + DMliq - DMsv

if ((i.lt.ihs) .and. (i.ge.inj)) then

c região com duas regiões gasosas - gás anular e jato

c b. Balanço de massa global:

c (a taxa de entrada de gás no jato é estabelecido na sub entrada)

c ...alimentação de resíduo líquido

Mg(i+1) = Mg(i) + DMliq - DMen(i) + DMag(i)

c c. Balanço de massa por componente:

```

Syg = 0
do j=1,10 ! não entra o combustível
    Mgc(i+1,j) = (Mg(i) - DMen(i) - Msv(i)) * yg(i,j) + FM(j,3) * DMsv
    if (j.eq.2) then ! 2 refere-se à água
        Mgc(i+1,j) = Mgc(i+1,j) + DMag(i) ! acrescenta-se a umidade
    endif
    yg(i+1,j) = Mgc(i+1,j) / (Mg(i+1) - Msv(i+1))
    Syg = Syg + yg(i+1,j)
enddo
if (abs(Syg - 1.d0).gt.1e-8) then
    print *, "B.M. p/ comp. p/ o gás anular não fecha", i, Syg
endif

```

c d. Balanço de energia no gás anular:

```

call rocp(i,yg,Tg(i),ro,cpg(i))
call rocp(i+1,yg,Tg(i+1),rog,cpg(i+1))
if (icp.eq.1) then
    cpg(i) = 1230.D0
    cpg(i+1) = 1230.D0

```

```

endif
cpg(i) = cpg(i)*csp(4)      ! sensibilidade parametrica
cpg(i+1) = cpg(i+1)*csp(4)  ! sensibilidade parametrica

Hg(i) = Mg(i) * cpg(i) * (Tg(i) - Tref)
Hen(i) = DMen(i) * cpg(i) * (Tg(i) - Tref)

c e. Cálculo da temperatura do gás que sai da zona i : secundária/interligação
qtot=Hg(i) + Hva(i) + Hsv(i) + DHrp(i) - Hen(i) + Has + qg(i)
if (kdin.eq.0) then
  Tg(i+1) = qtot/(Mg(i+1)*cpg(i+1)) + Tref
else
  if (i.eq.nsp) then
    Vg = pi*(rin(3)**2.d0-rj(i)**2.d0)*DZ(3)      ! interligação
  else
    Vg = pi*(rin(2)**2.d0-rj(i)**2.d0)*DZ(2)      ! secundária
  endif
  if (i.eq.ihl-1) then
    Hgpos = Hgihs
    rovcpg = rog*Vg*cpghs
  else
    Hgpos = Mg(i+1)*cpg(i+1)*(Tg(i+1) - Tref)
    rovcpg = rog*Vg*cpg(i+1)
  endif
  dTdt = (qtot- Hgpos)/rovcpg
  Tgn(i+1) = Tg(i+1) + dTdt*dt
endif

```

C-7 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NO JATO ZONA i :

c a. Balanço de massa global para o jato:

$Mj(i+1) = Mj(i) + DMen(i)$

c b. Balanço de massa por componente:

$Mcb(i+1) = Mcb(i) - DMcb(i)$

```

do j=1,10      ! é onze pois inclui o combustível.
  Mjc(i+1,j)=Mjc(i,j)+DMen(i)*yg(i,j)+FM(j,1)*DMcb(i)
  yj(i+1,j)=Mjc(i+1,j)/Mj(i+1)
  SMjc=SMjc+Mjc(i+1,j)
end do
yj(i+1,11)=Mcb(i+1)/Mj(i+1)

```

c c. Balanço de energia para o jato:

```

qger(i) = DMcb(i)*PCic*(1-H)
call rocp(i,yj,Tj(i),roj,cpj(i))
call rocp(i+1,yj,Tj(i+1),roj,cpj(i+1))
cpj(i)=cpj(i)*csp(5)      ! sensibilidade parametrica
Hj(i) = Mj(i)*cpj(i)*(Tj(i) - Tref)

```

c d. Cálculo da temperatura do jato:

```

if (kdin.eq.0) then
  Tj(i+1)=(Hj(i)+Hen(i)+Qger(i)+qj(i))/(Mj(i+1)*cpj(i+1))
  +Tref
else
  if (i.eq.nsp) then
    Vj = pi*rj(i)**2.d0*DZ(3)      ! interligação
  else
    Vj = pi*rj(i)**2.d0*DZ(2)      ! secundária
  endif
  resgate de Hj(i+1)
  if (i.eq.ihl-1) then      lantes da mistura
    Hjpos = Hjihs
    rovcpj = roj*Vj*cpjihs
  else
    Hjpos = Mj(i+1)*cpj(i+1)*(Tj(i+1) - Tref)
    rovcpj = roj*Vj*cpj(i+1)
  endif
  dTdt=(Hj(i)+Hen(i)+Qger(i)+qj(i)-Hjpos)/rovcpj
  Tjn(i+1) = Tj(i+1) + dTdt*dt
endif
else

```

cmudança de procedimento

C-8 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA A MISTURA GASOSA

C zonas com uma única região gasosa

c a. Unificações das vazões, composições e energias (transição)

```

call rocp(i ,yg,Tg(i) ,rog,cpg(i) )
call rocp(i+1,yg,Tg(i+1),rog,cpg(i+1))
cpg(i) = cpg(i) *csp(4)      ! sensibilidade parametrica
cpg(i+1) = cpg(i+1)*csp(4)  ! sensibilidade parametrica
Hg(i) = Mg(i) * cpg(i) * (Tg(i) - Tref)

```

IF (Hj(i-1).ne.0.D0) then ! zona de transição

call rocp(i,yj,Tj(i),roj,cpj(i))

cpj(i)=cpj(i)*csp(5) ! sensibilidade parametrica

Hj(i) = Mj(i)*cpj(i)*(Tj(i) - Tref)

c preservação dos valores antes da mistura

Hjihs = Hj(i)

Hgihs = Hg(i)

cpjihs = cpj(i)

cpgihs = cpg(i)

c para o cálculo da derivada correta

do j=1,10 ! composição homogênea

```

yg(i,j)=(yg(i,j)*(Mg(i)-Msv(i))+yj(i,j)*Mj(i))/
(Mg(i)+Mj(i)-Msv(i))
Yj(i,j)=yg(i,j)
enddo
Mg(i) = Mg(i)+Mj(i)      ! vazão mássica gás+jato
Hg(i) = Hg(i) + Hj(i)    ! energia total fase gas
do j=1,ns
  Hj(j) = 0.D0      ! execução expres lógica
  Mj(j) = 0.D0
enddo
endif

c b. Balanço de massa global:
Mg(i+1) = Mg(i) + DMliq + DMag(i)

c c. Balanço de massa por componente:
Syg = 0.
do j=1,10      ! não entra o combustível
  Mgc(i+1,j)=(Mg(i)-Msv(i))*yg(i,j)+FM(j,3)*DMsv
  if (j.eq.2) then
    Mgc(i+1,j)=Mgc(i+1,j)+DMag(i) !acrescenta-se a umidade
  endif
  yg(i+1,j)=Mgc(i+1,j)/(Mg(i+1)-Msv(i+1))
  yj(i+1,j)=yg(i+1,j)
  Syg = Syg + yg(i+1,j)
end do
if (abs(Syg-1.d0).gt.1e-8) then
  print *, 'B.M. p/ comp. p/ o gas anular nao fecha',i,Syg
endif

```

c d. Balanço de energia nos gases:

c e. Cálculo da temperatura dos gases que saem da zona i :

```

if (kdin.eq.0) then
  Tg(i+1)=(Hg(i) + Hva(i) + Hsv(i) + DHrp(i) + Qger(i)+
  # qg(i)+qj(i) + Has)/(Mg(i+1)*cpg(i+1)) + Tref
  Tj(i+1) = Tg(i+1)
else
  Vg = pi*rin(2)**2.d0*DZ(2)-Ah*DZ(2)
  rovcpg = rog*Vg*cpg(i+1)
  Hg(i+1) = Mg(i+1) * cpg(i+1) * (Tg(i+1) - Tref)
  dTdt = (Hg(i) + Hva(i) + Hsv(i) + DHrp(i) + Qger(i) +
  # Has + qg(i) + qj(i) - Hg(i+1))/rovcpg
  Tgn(i+1) = Tg(i+1) + dTdt*dt
  Tjn(i+1) = Tgn(i+1)
endif
endif
return
end

```

C PERTURB - INTRODUZ PERTURBAÇÕES NO SISTEMA

SUBROUTINE PERTURB

c DECLARAÇÕES:

implicit double precision (a-h,i-z)

integer ns,nt,nsp

parameter(nt=25)

common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref

common/TT/TPc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Trl

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)

common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)

common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq

common/FISA/cps, cps, cpg(nt), cpj(nt),DHva,Cprl,Cpsv

common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah

common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)

common/contr/ihp,ihl,igh,icp,isol,jsoi,ns,nsp,inj,imp

common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb

common/separ/csp(25)

common/FLAM/PCic,PClr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC

C-1 câmara de combustão primária

call ALTREFP

C-2 câmara de combustão secundária

if (ns.ne.nsp) then

call ALTREFS

endif

C-3 definição do procedimento (função da taxa de alimentação de sólido)

call SOLIDO

C-4 cálculo das condições de entrada:

call ENTRADA

C-5 teste de disponibilidade de oxigênio e correção dos valores

c a. câmara de combustão primária:

call DISPO2P

c b. câmara de combustão secundária:

if (ns.ne.nsp) then

call DISPO2S

endif

print *,

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

print *

```

implicit double precision (a-h,i-z)
integer N,nt,ns,nsp
parameter (pi=3.14159265359,nt=25)
real*8 int
common/FF/Fpj(nt),Fjp(nt),Fsj(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt),Fppj(nt),Fppp(nt),Fpppj(nt),Fppp(2),Fppp(2)
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
# Aq,Aj(nt)
common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp

if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
C-1 Cálculo do fator de forma de um cilindro para um plano paralelo específico
c para os casos onde a quantidade de sólido é superior
c a. Integração Numérica Utilizando a Fórmula de Simpson
N=30
X = (rin(1)-H)/nj(i)
Y = 2.D0*dsqrt(2.D0*rin(1)-H**2.D0)/nj(i)
Z = DZ(1)/nj(i)
sub = Y/2.D0/N
do j=0,N
csi=j*sub
AA = z**2.D0+x**2.D0+csi**2.D0-1.D0
BB = z**2.D0-x**2.D0-csi**2.D0+1.D0
Fcsi = X/(X**2.D0+csi**2.D0)-(X/(pi*(X**2.D0+csi**2.D0)))
# dacos(BB/AA) - (0.5D0/Z)*dsqrt(AA**2.D0+4.D0*Z**2.D0)
# dacos(BB/AA*dsqrt(X**2.D0+csi**2.D0))
# BB*dasin(1.D0/dsqrt(X**2.D0+csi**2.D0)) - pi*AA/2.D0))
if (j.eq.0) then
int=Fcsi
kx=2
elseif (j.eq.N) then
int = int + Fcsi
kx=1
! não é necessário
elseif (kx.eq.2) then
int = int + 4.D0*Fcsi
kx=1
else
int = int + 2.D0*Fcsi
kx=2
endif
end do
Fsj(i) = (2.D0*sub/3.D0)*int/Y
Fjs(i) = As(i)*Fsj(i)/Aj(i) ! reciprocidade
endif

C-2 Cálculo do fator de forma entre dois cilindros concêntricos:
c ... alteração no raio do jato visando contornar problemas de mudança de
c diâmetro da câmara na mudança da primária para a secundária.
if (rij(i).gt.0.9*rin(rj)) then
rij(i) = 0.9*rij(i)
endif
X = rin(rj)/rij(i)
Y = DZ(rj)/rij(i)
AA = Y**2.D0 + X**2.D0-1.D0
BB = Y**2.D0 - X**2.D0+1.D0

Fpj(i) = 1.D0/X - (1.D0/(pi*X))*(dacos(BB/AA)-(0.5D0/Y)*
# (dsqrt((AA+2.D0)**2.D0-4.D0*X**2.D0)*dacos(BB/(X*AA)))+
# BB*dasin(1.D0/X)-pi*AA/2.D0))
Fpj(i) = (1.D0 - beta/(2.D0*pi))*Fpj(i)
Fjp(i) = Ap(i)*Fpj(i)/Aj(i) ! reciprocidade

C-3 Cálculo do fator de forma da parede de um cilindro para a própria
c parede, segundo o trabalho de Sparrow e Cass.
f1 = (dsqrt(4.D0*X**2.D0 + Y**2.D0) / Y)*
# dasin((4.D0*(X**2.D0-1.D0) + (Y**2.D0/X**2.D0)
# *(X**2.D0 - 2.D0)) / (Y**2.D0 + 4.D0
# *(X**2.D0-1.D0)))
f2 = - dasin((X**2.D0-2.D0) / X**2.D0)
# + (pi/2.D0)*(dsqrt(4.D0*X**2.D0 + Y**2.D0) / Y - 1.D0)
Fpp(i) = - (Y/(2.D0*pi*X))*(f1 + f2) +
# 1.D0 - 1.D0/X + (2.D0/(pi*X))
# *datan(2.D0*dsqrt(X**2.D0-1.D0) / Y)
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
Fps(i) = (beta/(2.D0*pi))*Fpp(i)
Fpp(i) = Fpp(i)*(1.D0 - beta/(2.D0*pi))
Fsp(i) = Ap(i)*Fps(i)/As(i) ! reciprocidade
endif
return
end

ESTIMATIVAS DOS FATORES DE FORMA ENTRE ZONAS ADJACENTES
(NA PRESENÇA DE SÓLIDO)
SUBROUTINE FORMAB(i,j)
C-1: declarações:
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt,ns,nsp
parameter (pi=3.14159265359,nt=25)

common/FF/Fpj(nt),Fjp(nt),Fsj(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt),Fppj(nt),Fppp(nt),Fppp(2),Fppp(2)
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
# Aq,Aj(nt)
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp

call sparrow(i,j)

if (i.eq.1) then
C-2 Fatores de forma da primeira zona
Fpq(1) = (1.D0-Fpj(1) - Fps(1) - Fpp(1))
#
* Aq/(Aq+Ap(2)+As(2)+Aj(2))
Fjq(1) = (1.D0 - Fjp(1) - Fjs(1))*Aq/(Aq+Ap(2)+As(2))
Fsq(1) = (1.D0 - Fsj(1) - Fsp(1))*Aq/(Aq+Ap(2)+Aj(2))
Fpp(1) = Fpq(1)/(Fpp(1)/Fps(1) + Fpj(1)/Fps(1) + 1.D0)
#
* (Aj(2)+Ap(2)+As(2))/Aq
Fppp(1) = Fpp(1)/Fps(1)*Fpp(1)
Fppj(1) = Fpj(1)/Fps(1)*Fpp(1)
Fjsp(1) = Fjq(1)/(1.D0 + Fjp(1)/Fjs(1))
#
* (Ap(2)+As(2))/Aq
Fjpp(1) = Fjp(1)/Fjs(1)*Fjsp(1)
Fsjp(1) = Fsq(1)/(Fsp(1)/Fsj(1) + 1.D0)
#
* (Aj(2)+Ap(2))/Aq
Fssp(1) = Fsp(1)/Fsj(1)*Fsjp(1)
call sparrow(2,1)
Fjq(2) = Aq/(Ap(1)+As(1)+Aj(1)+Aq)*(1.D0 - Fjp(2) - Fjs(2))/2.
Fsq(2) = Aq/(Ap(1)+Aj(1)+Aq)*(1.D0 - Fsp(2) - Fsj(2))/2.
Fpq(2) = Aq/(As(1)+Aj(1)+Ap(1)+Aq)*
# (1.D0-Fpj(1)-Fps(1)-Fpp(1))/2.
elseif (i.eq.2) then
C-3: fatores de forma para a segunda zona:
Fppp(2) = Fpp(2)/(Fps(2)+Fpj(2)+Fpp(2))*
# ((1.D0-Fpj(2)-Fps(2)-Fpp(2)-Fpq(2))/2.
Fppj(2) = Fpj(2)/(Fps(2)+Fpj(2)+Fpp(2))*
# ((1.D0-Fpj(2)-Fps(2)-Fpp(2)-Fpq(2))/2.
Fpsp(2) = Fps(2)/(Fps(2)+Fpj(2)+Fpp(2))*
# ((1.D0-Fpj(2)-Fps(2)-Fpp(2)-Fpq(2))/2.
Fjsp(2) = Fjs(2)/(Fjs(2)+Fjp(2))*
# ((1.D0-Fjp(2)-Fjs(2)-Fjq(2))/2.
Fjpp(2) = Fjp(2)/(Fjs(2)+Fjp(2))*
# ((1.D0-Fjp(2)-Fjs(2)-Fjq(2))/2.
Fsjp(2) = Fsj(2)/(Fsj(2)+Fsp(2))*
# ((1.D0-Fsp(2)-Fsj(2)-Fsq(2))/2.
Fssp(2) = Fsp(2)/(Fsj(2)+Fsp(2))*
# ((1.D0-Fsp(2)-Fsj(2)-Fsq(2))/2.
elseif (i.eq.(ns-1)) then
C-4: fatores de forma para a última zona:
Fjpc = (1.D0 - Fjp(i) - Fjs(i))/2.
Fppc = (1.D0 - Fpj(i) - Fps(i) - Fpp(i))/2.
Fpsc = (1.D0 - Fsp(i) - Fsj(i))/2.
return
else
C-5: fatores de forma para as demais zonas:
SFp = Fps(i) + Fpp(i) + Fpj(i)
SFs = Fsp(i) + Fsj(i)
SFj = Fjp(i) + Fjs(i)
Fpsp(i) = Fps(i)*(1.-SFp)/2./SFp
Fppp(i) = Fpp(i)*(1.-SFp)/2./SFp
Fppj(i) = Fpj(i)*(1.-SFp)/2./SFp
Fjsp(i) = Fjs(i)*(1.-SFj)/2./SFj
Fjpp(i) = Fjp(i)*(1.-SFj)/2./SFj
Fsjp(i) = Fsj(i)*(1.-SFs)/2./SFs
Fssp(i) = Fsp(i)*(1.-SFs)/2./SFs
endif
return
end

```

```

common/FF/Fpj(nt),Fjp(nt),Fsj(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt),Fppj(nt),Fppp(nt),Fppp(2),Fppp(2)
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
# Aq,Aj(nt)
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp

call sparrow(i,1)

if (i.eq.1) then

```

C-2 Fatores de forma da primeira zona

```

Fpq(1) = (1.D0-Fpj(1) - Fps(1) - Fpp(1))
#
* Aq/(Aq+Ap(2)+As(2)+Aj(2))
Fjq(1) = (1.D0 - Fjp(1) - Fjs(1))*Aq/(Aq+Ap(2)+As(2))
Fsq(1) = (1.D0 - Fsj(1) - Fsp(1))*Aq/(Aq+Ap(2)+Aj(2))
Fpp(1) = Fpq(1)/(Fpp(1)/Fps(1) + Fpj(1)/Fps(1) + 1.D0)
#
* (Aj(2)+Ap(2)+As(2))/Aq
Fppp(1) = Fpp(1)/Fps(1)*Fpp(1)
Fppj(1) = Fpj(1)/Fps(1)*Fpp(1)
Fjsp(1) = Fjq(1)/(1.D0 + Fjp(1)/Fjs(1))
#
* (Ap(2)+As(2))/Aq
Fjpp(1) = Fjp(1)/Fjs(1)*Fjsp(1)
Fsjp(1) = Fsq(1)/(Fsp(1)/Fsj(1) + 1.D0)
#
* (Aj(2)+Ap(2))/Aq
Fssp(1) = Fsp(1)/Fsj(1)*Fsjp(1)
call sparrow(2,1)
Fjq(2) = Aq/(Ap(1)+As(1)+Aj(1)+Aq)*(1.D0 - Fjp(2) - Fjs(2))/2.
Fsq(2) = Aq/(Ap(1)+Aj(1)+Aq)*(1.D0 - Fsp(2) - Fsj(2))/2.
Fpq(2) = Aq/(As(1)+Aj(1)+Ap(1)+Aq)*
# (1.D0-Fpj(1)-Fps(1)-Fpp(1))/2.
elseif (i.eq.2) then

```

C-3: fatores de forma para a segunda zona:

```

Fppp(2) = Fpp(2)/(Fps(2)+Fpj(2)+Fpp(2))*
# ((1.D0-Fpj(2)-Fps(2)-Fpp(2)-Fpq(2))/2.
Fppj(2) = Fpj(2)/(Fps(2)+Fpj(2)+Fpp(2))*
# ((1.D0-Fpj(2)-Fps(2)-Fpp(2)-Fpq(2))/2.
Fpsp(2) = Fps(2)/(Fps(2)+Fpj(2)+Fpp(2))*
# ((1.D0-Fpj(2)-Fps(2)-Fpp(2)-Fpq(2))/2.
Fjsp(2) = Fjs(2)/(Fjs(2)+Fjp(2))*
# ((1.D0-Fjp(2)-Fjs(2)-Fjq(2))/2.
Fjpp(2) = Fjp(2)/(Fjs(2)+Fjp(2))*
# ((1.D0-Fjp(2)-Fjs(2)-Fjq(2))/2.
Fsjp(2) = Fsj(2)/(Fsj(2)+Fsp(2))*
# ((1.D0-Fsp(2)-Fsj(2)-Fsq(2))/2.
Fssp(2) = Fsp(2)/(Fsj(2)+Fsp(2))*
# ((1.D0-Fsp(2)-Fsj(2)-Fsq(2))/2.

```

elseif (i.eq.(ns-1)) then

C-4: fatores de forma para a última zona:

```

Fjpc = (1.D0 - Fjp(i) - Fjs(i))/2.
Fppc = (1.D0 - Fpj(i) - Fps(i) - Fpp(i))/2.
Fpsc = (1.D0 - Fsp(i) - Fsj(i))/2.
return
else

```

C-5: fatores de forma para as demais zonas:

```

SFp = Fps(i) + Fpp(i) + Fpj(i)
SFs = Fsp(i) + Fsj(i)
SFj = Fjp(i) + Fjs(i)
Fpsp(i) = Fps(i)*(1.-SFp)/2./SFp
Fppp(i) = Fpp(i)*(1.-SFp)/2./SFp
Fppj(i) = Fpj(i)*(1.-SFp)/2./SFp
Fjsp(i) = Fjs(i)*(1.-SFj)/2./SFj
Fjpp(i) = Fjp(i)*(1.-SFj)/2./SFj
Fsjp(i) = Fsj(i)*(1.-SFs)/2./SFs
Fssp(i) = Fsp(i)*(1.-SFs)/2./SFs

```

ESTIMATIVAS DOS FATORES DE FORMA ENTRE ZONAS ADJACENTES (NA AUSÊNCIA DE SÓLIDO)

SUBROUTINE FORMABNS(i,j)

C-1: Declarações

```

implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (pi=3.14159265359,nt=25)

```

```

common/FF/Fpj(nt),Fjp(nt),Fsj(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt),Fppj(nt),Fppp(nt),Fppp(2),Fppp(2)
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa,Fpsa
# Aq,Aj(nt)
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp

```

call sparrow(i,j)

if (i.eq.1) then

C-2 Fatores de forma da primeira zona

```

Fpq(1) = (1.D0-Fpj(1) - Fpp(1))

```



```

#      *Aq/(Aq+Ap(2)+A(2))
Fjq(1) = (1.D0 - Fjp(1)) * Aq/(Aq+Ap(2))
Fppp(1) = Fpp(1)/(Fpp(1)+Fjp(1)) * (1.D0 - Fjp(1) - Fpp(1) - Fpq(1))
Fjp(1) = Fjp(1)/(Fpp(1)+Fjp(1)) * (1.D0 - Fjp(1) - Fpp(1) - Fpq(1))
Fpp(1) = 1.D0 - Fjp(1) - Fjq(1)

Fjq(2) = Aq/(Ap(1)+Aq) * (1.D0 - Fjp(2)) / 2.
Fpq(2) = Aq/(A(1)+Ap(1)+Aq) * (1.D0 - Fjp(1) - Fpp(1)) / 2.

elseif (i.eq.2) then

C-3:      Fatores de forma para a segunda zona
Fjq(2) = Aq/(Ap(1)+Aq) * (1.D0 - Fjp(2)) / 2.
Fpq(2) = Aq/(A(1)+Ap(1)+Aq) * (1.D0 - Fjp(1) - Fpp(1)) / 2.

Fppp(2) = Fpp(2)/(Fjp(2) + Fpp(2)) *
(1.D0 - Fjp(2) - Fpp(2) - Fpq(2)) / 2.
Fjp(2) = Fjp(2)/(Fjp(2) + Fpp(2)) *
(1.D0 - Fjp(2) - Fpp(2) - Fpq(2)) / 2.
Fpp(2) = (1.D0 - Fjp(2) - Fjq(2)) / 2.

elseif (i.eq.(ns-1)) then

C-4:      Fatores de forma para a última zona:
Fjpc = (1.D0 - Fjp(i)) / 2.
Fppc = (1.D0 - Fjp(i) - Fpp(i)) / 2.
return
else

C-5:      Fatores de forma para as demais zonas:
SFp = Fpp(i) + Fjp(i)
SFj = Fjp(i)

Fppp(i) = Fpp(i) * (1. - SFp) / 2. / SFp
Fjp(i) = Fjp(i) * (1. - SFp) / 2. / SFp
Fpp(i) = Fjp(i) * (1. - SFj) / 2. / SFj

endif
return
end

```

CÁLCULOS DAS RESISTÊNCIAS À TRANSFERÊNCIA DE CALOR

```

SUBROUTINE RESIST(I,ic)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8,erro=1.D-8)
common/FF/Fjp(nt),Fjp(nt),Fsj(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt),Fpp(nt),Fppp(nt),Fsp(nt),Fjs(nt),Fjp(nt)
common/FF/Fps(nt),Fps(nt),Fppp(nt),Fpq(2),Fjq(2),Fsq(2)
common/FF/Fpja,Fpja,Fjsa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fppa,Fppa,Fppc,Fjpc,Fspc
common/RR/Rp,Rs,Rq,Rqe,Rps,Rpe,Rpea,Rqea,Rpq(2),Rsq(2),Rppc,Rpsc
common/RR/Rjp,Rjs,Rjq(2),Rjpc,Rcps,Rcpq,Rcsg,Rcppe,Rcpea,Rcqqa
common/RR/Rjpp(nt),Rjpp(nt),Rjap(nt),Rsjp(nt)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Trl
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Mav(nt),TRMss,tcin(2)
common/FISA/cps, cps, cpg(nt), cpi(nt), Dhva,CpI,Cpsv
common/FISB/conds,condg(nt),condq,condp(nt),difs,epsip,epsis,
# epsipe,epsij(nt),talg,epscha,epsnch
common/FISC/mig(nt),Pr
common/GE OA/rin(3),rext(3),rj(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GE OB/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/yf/yf(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/CTG/ngs(nt),hps(nt),hext(nt),hgg(nt)
common/contr/tp,ins,igh,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp
common/separ/csp(25)

```

C CÁLCULO DOS COEFICIENTES CONVECTIVOS ANALOGOS NECESSARIOS PARA CÁLCULO

C DAS RESISTÊNCIAS NA SUBROTINA "RESIST"

C-1: Cálculos dos coeficientes de transferência de calor convectivo:

```

if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
c a. Entre o gás e o sólido:
Gg=(Mg(i)+Mj(i))/(pi*rin(ic)**2)*3600.D0 ! kg/m2/h
hgs(i) = 0.4D0*(Gg**0.62D0)
c b. Entre o sólido e a parede:
c
hps(i)=11.6D0*(conds/beta*rin(ic))**
# ((rot*rin(ic)**2.D0)*beta/difs)**0.3D0)
hps(i) = 123. ! o valor calculado é muito baixo
endif
c c. Entre a parede externa e a atmosfera:
c
if (Tpe(i).lt.Ta) then
hext(i) = 6.D0
else
hext(i) = 1.24D0*(Tpe(i) - Ta)**(1.D0/3.D0))
endif
c d. Entre o gás e a parede:

call condmi(i,yg,Tg(i),mig(i),condg(i))
call condmi(i+1,yg,Tg(i+1),mig(i+1),condg(i+1))
call rocp (i,yg,Tg(i),ro ,cpg(i))

```

```
call rocp (i+1,yg,Tg(i+1),ro ,cpg(i+1))
```

```

mig(i) = mig(i) *csp(7) ! sensibilidade parametrica
mig(i+1) = mig(i+1) *csp(7) ! sensibilidade parametrica
condg(i) = condg(i) *csp(3) ! sensibilidade parametrica
condg(i+1) = condg(i+1) *csp(3) ! sensibilidade parametrica
cpg(i) = cpg(i) *csp(4) ! sensibilidade parametrica
cpg(i+1) = cpg(i+1) *csp(4) ! sensibilidade parametrica

```

```

visc = (mig(i) + mig(i+1)) / 2.D0
capcal = (cpg(i) + cpg(i+1)) / 2.D0
condut = (condg(i) + condg(i+1)) / 2.D0

```

```
Pr=visc*capcal/condut
```

```
Rey = 2.D0*(mg(i)+mj(i))/(pi*visc*rin(ic))
```

```

hgp(i)=0.036D0*(condut/(2.D0*rin(ic)))*(Rey**0.8D0)*
# (Pr**0.33D0)*(2.D0*rin(ic)/L(ic))**0.055D0)

```

c Valores adotados por outros autores

```

if (icp.eq.1) then
cpg(i) = 1230.D0*csp(4) ! sensibilidade parametrica
condg(i) = 0.0495D0*csp(3) ! sensibilidade parametrica
hgp(i) = 2.D0
hext(i) = 6.D0
hps(i) = 123.D0
hgs(i) = 27.D0
endif

```

```

hgs(i) = hgs(i) *csp(12)
hps(i) = hps(i) *csp(13)
hext(i) = hext(i) *csp(14)
hgp(i) = hgp(i) *csp(15)

```

C-2: Cálculos dos coeficientes convectivos análogos:

```

Tgm =(Tg(i)+ Tg(i+1))/2.D0
Tjm =(Tj(i)+ Tj(i+1))/2.D0
Tpm =(Tp(i)+ Tp(i+1))/2.D0
Tpe=(Tpe(i)+ Tpe(i+1))/2.D0
condx = condp(i)/(sigma*(Tpm + Tpe)*(Tpm**2.D0 + Tpe**2.D0))
hgp = hgp(i) / (sigma*(Tpm + Tgm)*(Tpm**2.D0 + Tgm**2.D0))
hpea = hext(i) / (sigma*(Tpe + Ta)*(Tpe**2.D0 + Ta**2.D0))
condqx = condq / (sigma*(Tq + Tqe)*(Tq**2.D0 + Tqe**2.D0))
hqe = hext(i) / (sigma*(Tqe + Ta)*(Tqe**2.D0 + Ta**2.D0))
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
Tsm =(Ts(i)+ Ts(i+1))/2.D0 ! Ts(i+1)
hpsx = hps(i)/(sigma*(Tpm + Tsm)*(Tpm**2.D0 + Tsm**2.D0))
hgsx = hgs(i)/(sigma*(Tsm + Tgm)*(Tsm**2.D0 + Tgm**2.D0))
endif

```

C-3: Cálculos das resistências à transferência de calor:

c a.interações com a parede do queimador:

```

if (i.eq.1) then
c b.interações da primeira zona com a parede do queimador:
Rq = (1.D0 - epsip) / (Aq*epsip) ! epsip=epsip (verificar)
Rjq(1) = 1.D0 / (epsij(i)*A(1)*Fjq(1))
Rqp(1) = 1.D0 / (talg*Ap(1)*Fpq(1))
Rqea = 1.D0 / Aq
Rqe = (1.D0 - epsipe) / (epsipe*Aq)
Rcqqa = hq / (Aq*condqx)
Rqea = 1.D0 / (Aq*hqea)
Rjq(2) = 1.D0 / (epsij(i)*A(2)*Fjq(2))
Rqp(2) = 1.D0 / (talg*Ap(2)*Fpq(2))
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
Rsq(2) = 1.D0 / (talg*As(2)*Fsq(2))
Rsq(1) = 1.D0 / (talg*As(1)*Fsq(1))
endif
endif

```

c b.interações dentro da propria zona

```

Rp = (1.D0 - epsip) / (epsip*Ap(i))
Rjp = 1.D0 / (epsij(i)*A(i)*Fjp(i))
Rcpq = 1.D0 / (Ap(i)*hgp)
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
Rcsg = 1.D0 / (As(i)*hgsx)
Rs = (1.D0 - epsis) / (epsis*As(i))
Rps = 1.D0 / (talg*As(i)*Fsp(i))
Rjs = 1.D0 / (epsij(i)*A(i)*Fjs(i))
Rcps = 1.D0 / (Asp*hpsx)
endif

```

c c.interações com o meio externo:

```

Rpe = (1.D0 - epsipe) / (epsipe*Ap(i))
Rpea = 1.D0 / Ape
Rcppe = log(rext(1)/rin(1)) / (2.D0*pi*DZ(1)*condx)
Rcpea = 1.D0 / (Ape*hpea)

```

c d.interação com a zona posterior:

```

if (i.eq.(ns-1)) then
Rjpc = 1.D0 / (epsij(i)*A(i)*Fjpc)
Rppc = 1.D0 / (talg*Ap(i)*Fppc)
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
Rpsc = 1.D0 / (talg*As(i)*Fpsc)
endif
else
Rjpp(i)=1.D0/(epsij(i)*A(i)*Fjpp(i))

```

```

Rppj(i)=1.D0/(epsip*Ap(i)*Fppj(i))
Rppp(i)=1.D0/(taLg *Ap(i)*Fppp(i))
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
  Rspj(i)=1.D0/(epsij(i)*Aj(i)*Fspj(i))
  Rsjp(i)=1.D0/(epsis*As(i)*Fsjp(i))
  Rpsp(i)=1.D0/(taLg *Ap(i)*Fpsp(i))
  Rssp(i)=1.D0/(taLg *As(i)*Fssp(i))
endif
endif
return
end

```

CÁLCULOS DAS TEMPERATURAS DAS PAREDES E FLUXOS DE CALOR (ESTADO ESTACIONÁRIO)

```

SUBROUTINE RAD(I,IC)
implicit double precision (a-h,l-z)
integer ns,nt, teste,nsp
parameter (nt=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8)
REAL*8 Jp,Js,Jpe,Jq,Jqe
common/F/Fp,Jp(nt),Fjp(nt),Fsj(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/F/Fpp,Jpp(nt),Fjpp(nt),Fsjp(nt),Fsjp(nt)
common/F/Fpsp,Jpsp(nt),Fpspp(nt),Fpsp(2),Fjq(2),Fsq(2)
common/F/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fppa,Fppa,Fjpc,Fjpc,Fspc
common/RR/Rp,Rs,Rq,Rqe,Rps,Rpe,Rpea,Rqea,Rpq(2),Rsq(2),Rppc,Rspc
common/RR/Rjp,Rjs,Rjq(2),Rjpc,Rcps,Rcpj,Rcsg,Rcppe,Rcppea,Rcqce
common/RR/Rpsp,Rspj,Rspj,Rspj,Rspj,Rspj,Rspj,Rspj
common/RR/Rjpp,Rjpp,Rjpp,Rjpp,Rjpp,Rjpp,Rjpp,Rjpp
common/EE/Ep(nt),Es(nt),Epe(nt),Eg(nt),Ej(nt),Ea,Epc,Eq,Eqe
common/J/Jp(nt),Js(nt),Jpe(nt),Jq,Jqe
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Ttr
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,1),Mjc(nt,1)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,icn(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mlk
common/DM/DMag(nt),DMss(nt),DMen(nt),DMcb(nt)
common/FISA/cps,cpa,cpj(nt),cpj(nt),Dhva,Cpr,Cpsv
common/FISB/conds,condg(nt),condq,condp(nt),difs,epsip,epsis,
# epsipe,epsij(nt),talg,epscha,epsnch
common/FISC/mig(nt),Pr
common/FISD/roa
common/GEOA/rin(3),rext(3),n(nt),beta,Ap(nt),As,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/Q/Q/qi(nt),qj(nt),qg(nt)
common/contr/lhp,ih,igh,icp,isol,isol,ns,nsp,ini,imp
common/separ/csp(25)
common/dl/dl,ropar, cpar, time(120)

```

C-1 Especificação do valor da emissividade do jato:

```

if (i.eq.1) then
  epsij(i)=epsnch ! estabelecimento do jato
  elseif (Mcb(i).lt.1E-8) then
  epsij(i)=epsnch ! região pós chama
  else
  epsij(i)=epscha ! região da chama
endif

```

erro = 1.D-10

teste=1

ite = 0

do while (teste.eq.1)

ite = ite + 1

C ...flexibilização do critério de convergência acima de 50 iterações

if (ite.eq.100) then

erro = 1.D-9

print*, ' critério de convergência alterado p/ 1.E-9'

elseif (ite.eq.200) then

erro = 1.D-8

print*, ' critério de convergência alterado p/ 1.E-8'

elseif (ite.eq.400) then

erro = 1.D-7

print*, ' critério de converg. alterado p/ 1.E-7'

endif

C-2 Cálculo das resistências à transferência de calor e dos potenciais

call RESIST(i,ic)

if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then

call POTCS(i)

else

call POTSS(i)

endif

Jpe(i) = (Epe(i)/Rpe + Ea/Rpea)/(1./Rpe+1./Rpea)

S4 = 1/Rcppe + 1/Rcpea + 1/Rpe

S5 = 1/Rpe + 1/Rpea

Epe(i) = (Ep(i)/Rcppe+Ea/Rcpea+Ea/(Rpe*S5*Rpea))/

(S4-1./Rpe**2.*S5)

C-3 Cálculo das temperaturas das paredes (estimadas inicialmente) a

partir dos potenciais calculados pela sub POTEJ

if (i.eq.1) then

print *, ' eq = ', Eq

XTq=(Eq/sigma)**0.25D0

XTqe=(Eq/sigma)**0.25D0

end if

XTpe=(Epe(i)/sigma)**0.25D0

XTp=(Ep(i)/sigma)**0.25D0

C-4 Verificação da convergência das temperaturas Tp, Tpe, Tq e Tqe:

if (i.eq.1) then

if (ABS(XTq-Tq).gt.erro) then

teste=1

elseif (ABS(XTqe-Tqe).gt.erro) then

teste=1

else

teste = 0

endif

endif

if (ABS(XTp-Tp(i)).gt.erro) then

teste=1

elseif (ABS(XTpe-Tpe(i)).gt.erro) then

teste=1

else

teste=0

endif

C-5 Armazenamento das novas estimativas no caso da não convergência.

if (i.eq.1) then

Tq=(Xtq+Tq)/2.D0

Tqe=(XTqe+Tqe)/2.D0

endif

if (teste.eq.1) then ! incluído em 10/09/97 *****

Tp(i)=(XTp+Tp(i))/2.D0

Tpe(i) = (XTpe+Tpe(i))/2.D0

endif

end do

c if (i.le.5) then

c print *,Js(i),Es(i),Eg(i),Ep(i),i

c endif

C-6a8 Cálculo dos fluxos de calor entre o sólido, gas anular, jatos e as

c as paredes do forno, utilizando a Lei de Kirchhoff aplicado no circuito

c elétrico análogo

c

if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then ! caso onde a massa de sólido é considerada

C-6 fluxo de calor total trocado pelo sólido

if (i.eq.2) then

qs(i)=(Js(i) - Es(i))/Rs + (Eg(i) - Es(i))/Rcsg +

(Ep(i) - Es(i))/Rcps + (Jq - Js(2))/Rsq(2)

else

qs(i)=(Js(i) - Es(i))/Rs + (Eg(i) - Es(i))/Rcsg +

(Ep(i) - Es(i))/Rcps

endif

C-7 fluxo de calor total trocado pelo jato:

if (i.eq.1) then

qi(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +

(Jq - Ej(i))/Rjq(1) + (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) +

(Js(i+1) - Ej(i))/Rjsp(i)

elseif (i.eq.2) then

qi(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +

(Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Js(i-1) - Ej(i))/Rjsp(i-1) +

(Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) + (Js(i+1) - Ej(i))/Rjsp(i) +

(Jq - Ej(i))/Rjq(2)

elseif (i.eq.(ns-1)) then

qi(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +

(Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Js(i-1) - Ej(i))/Rjsp(i-1) +

(Epc - Ej(i))/Rjpc

else

qi(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +

(Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Js(i-1) - Ej(i))/Rjsp(i-1) +

(Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) + (Js(i+1) - Ej(i))/Rjsp(i)

endif

C-8 fluxo de calor total trocado pelo gás:

qg(i) = (Ep(i) - Eg(i))/Rcpj + (Es(i) - Eg(i))/Rcsg

c

else ! desconsidera-se a massa de sólido p/ calculo radiação

C-9 fluxo de calor total trocado pelo jato:

if (i.eq.1) then

qi(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp + (Jq - Ej(i))/Rjq(1)

+ (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i)

elseif (i.eq.2) then

qi(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp + (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) +

(Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) + (Jq - Ej(i))/Rjq(2)

elseif (i.eq.(ns-1)) then

qi(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +

(Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Epc - Ej(i))/Rjpc

else

qi(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +

(Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) +

(Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i)

endif

C-10 fluxo de calor total trocado pelo gás:

qg(i) = (Ep(i) - Eg(i))/Rcpj

C-11 fluxo de calor total trocado pelo sólido (estimativa):

if (Mss(i).ne.0.) then

qp= (Epe(i)-Ep(i))/Rcppe+(Eg(i)-Ep(i))/Rcpj

+ (Jp(i)-Ep(i))/Rjpc

Apb=beta*(rext(1)**2.d0-rin(1)**2.d0)/2.d0

qs(i) = qp*Ah*(Ah+Apb)

endif

endif

c fim da subrotina

return

```

end

CÁLCULOS DAS TEMPERATURAS DAS PAREDES E FLUXOS DE CALOR
( ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO )

SUBROUTINE RADIN(i)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt, teste, nsp
parameter (nt=25, pi=3.14159265359, sigma=5.669D-8)
REAL*8 Jp, Js, Jpe, Jq, Jqe
common/FF/Fp(nt), Fpj(nt), Fsj(nt), Fjs(nt), Fps(nt), Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt), Fppj(nt), Fppp(nt), Fppp(nt), Fppp(nt)
common/FF/Fpsp(nt), Fpspp(nt), Fpspp(nt), Fpsq(2), Fsq(2), Fsq(2)
common/FF/Fpja, Fjpa, Fjsa, Fjsa, Fpsa, Fpsa, Fppa, Fppa, Fppc, Fppc, Fpspc
common/RR/Rp, Rs, Rq, Rqe, Rps, Rpe, Rpea, Rqea, Rpq(2), Rsq(2), Rppc, Rppc
common/RR/Rjp, Rjs, Rjq(2), Rjpc, Rcps, Rcpj, Rcpj, Rcppe, Rcppe, Rcppe, Rcppe
common/RR/Rppp(nt), Rppp(nt), Rppp(nt), Rqea
common/RR/Rjpp(nt), Rjpp(nt), Rjpp(nt), Rjpp(nt)
common/EE/Ep(nt), Es(nt), Epe(nt), Ejs(nt), Ejs(nt), Ea, Epc, Eq, Eqs
common/JP/Jp(nt), Js(nt), Jpe(nt), Jq, Jqe
common/TT/Ts(nt), Tg(nt), Tj(nt), Tp(nt), Tpe(nt), Tq, Tqe, Ta, Tref
common/TT/Tpc, Tqp(2), Tas(2), Tcb(2), Trl
common/TT/Tsn(nt), Tgn(nt), Tjn(nt), Tpn(nt), Tpen(nt), Tqn, Tqen
common/MMA/Mg(nt), Mj(nt), Mgc(nt, 1), Mjc(nt, 1)
common/MMB/Mss(nt), Mag(nt), Msv(nt), TRMss, tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt), Map(2), Mas(2), Fcb(2), Mliq
common/DM/DMag(nt), DMss(nt), DMen(nt), DMcb(nt)
common/FISA/cps, cpa, cpg(nt), cpj(nt), DHva, Cprl, Cpsv
common/FISB/conds, condg(nt), condq, condp(nt), difs, epsip, epsis,
# epsipe, epsij(nt), talg, epscha, epsnch
common/FISC/mig(nt), Pr
common/FISD/icos
common/GEQA/rin(3), rext(3), rj(nt), beta, Ap(nt), Asp, As(nt), Ape,
# Aq, Aj(nt)
common/GEOL/L(3), rot, hq, DZ(3), H, Ah
common/QQ/qs(nt), qj(nt), qg(nt)
common/contr/ihp, ihs, igh, icp, isol, isol, ns, nsp, inj, imp
common/separ/csp(25)
common/din/dt, ropar, cpar, time(120)

C-1 Especificação do valor da emissividade do jato:
if (i.eq.1) then
    epsij(i)=epsnch ! estabelecimento do jato
    elseif (Mcb(i).lt.1E-8) then
        epsij(i)=epsnch ! região pós chama
    else
        epsij(i)=epscha ! região da chama
end if
erro = 1D-8
teste=1
ite=0
do while (teste.eq.1)
    ite = ite + 1
    ... flexibilização do critério de convergência acima de 50 iterações
    if (ite.eq.50) then
        erro = 1.D-9
        print*, ' critério de convergência alterado para 0.1'
    elseif (ite.eq.100) then
        erro = 1.D-8
        print*, ' critério de convergência alterado para 1.'
    endif
end if

C Cálculos dos potenciais Jp, Js, Ep, Jq, Eq, Eqs, Jpe e Epc a partir dos
c potenciais conhecidos Es, Eg, Ej, Ea e Epe, avaliados no tempo t+dt:
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then
    call POTCS(i) ! dinâmico com sólido
else
    call POTSS(i) ! dinâmico sem sólido
endif

C-3 Cálculo das temperaturas das paredes ( estimadas inicialmente ) a
c partir dos potenciais calculados pela sub POTEJ
if (i.eq.1) then
    XTq=(Eq/sigma)**0.25D0
    XTqe=(Eqs/sigma)**0.25D0
end if
XTp=(Ep(i)/sigma)**0.25D0

C-4 Verificação da convergência das temperaturas Tp, Tpe, Tq e Tqe:
if (i.eq.1) then
    if (ABS(XTq-Tq).gt.erro) then
        teste=1
        elseif (ABS(XTqe-Tqe).gt.erro) then
            teste=1
        else
            teste = 0
        endif
    endif
    if (ABS(XTp-Tp(i)).gt.erro) then
        teste=1
    else
        teste=0
    endif
endif

C-5 Armazenamento das novas estimativas no caso da não convergência.
if (i.eq.1) then
    Tq=(XTq+Tq)/2.D0

```

```

    Tqe=(XTqe+Tqe)/2.D0
endif
if (teste.eq.1) then
    Tp(i)=(XTp+Tp(i))/2.D0
endif
end do
c+++++

C-6a8 Cálculo dos fluxos de calor entre o sólido, gas anular, jatos e as
c as paredes do forno, utilizando a Lei de Kirchoff aplicado no circuito
c elétrico análogo
c.....
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then ! caso onde a massa de sólido é considerada
C-6 fluxo de calor total trocado pelo sólido
if (i.eq.2) then
    qs(i)=(Js(i) - Es(i))/Rs + (Eg(i) - Es(i))/Rcsg +
    # (Ep(i) - Es(i))/Rcps + (Jq - Js(2))/Rsq(2)
    else
        qs(i)=(Js(i) - Es(i))/Rs + (Eg(i) - Es(i))/Rcsg +
        # (Ep(i) - Es(i))/Rcps
    endif
C-7 fluxo de calor total trocado pelo jato:
if (i.eq.1) then
    qj(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +
    # (Jq - Ej(i))/Rjq(1) + (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) +
    # (Js(i+1) - Ej(i))/Rjsp(i)
    elseif (i.eq.2) then
        qj(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +
        # (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Js(i-1) - Ej(i))/Rjsp(i-1) +
        # (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) + (Js(i+1) - Ej(i))/Rjsp(i) +
        # (Jq - Ej(i))/Rjq(2)
        elseif (i.eq.(ns-1)) then
            qj(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +
            # (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Js(i-1) - Ej(i))/Rjsp(i-1) +
            # (Epc - Ej(i))/Rjpc
            else
                qj(i) = (Js(i) - Ej(i))/Rjs + (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +
                # (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Js(i-1) - Ej(i))/Rjsp(i-1) +
                # (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) + (Js(i+1) - Ej(i))/Rjsp(i)
            endif
C-8 fluxo de calor total trocado pelo gás:
    qg(i) = (Ep(i) - Eg(i))/Rcpj + (Es(i) - Eg(i))/Rcsg
c.....
else ! desconsidera-se a massa de sólido p/ calculo radiação
C-9 fluxo de calor total trocado pelo jato:
if (i.eq.1) then
    qj(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp + (Jq - Ej(i))/Rjq(1)
    # + (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i)
    elseif (i.eq.2) then
        qj(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp + (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) +
        # (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i) + (Jq - Ej(i))/Rjq(2)
        elseif (i.eq.(ns-1)) then
            qj(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +
            # (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) + (Epc - Ej(i))/Rjpc
            else
                qj(i) = (Jp(i) - Ej(i))/Rjp +
                # (Jp(i-1) - Ej(i))/Rjpp(i-1) +
                # (Jp(i+1) - Ej(i))/Rjpp(i)
            endif
C-10 fluxo de calor total trocado pelo gás:
    qg(i) = (Ep(i) - Eg(i))/Rcpj
C-11 fluxo de calor total trocado pelo sólido ( estimativa ):
    if ( Mss(i).ne.0.) then
        qp= (Epe(i)-Ep(i))/Rcppe+(Eg(i)-Ep(i))/Rcpj
        # + (Jp(i)-Ej(i))/Rjp
        Apb=beta*(rext(1)**2.d0-rin(1)**2.d0)/2.d0
        qs(i) = qp*Ah/(Ah+Apb)
    endif
endif
c fim da subrotina
return
end

```

CÁLCULOS DOS POTENCIAIS RADIATIVOS POR MEIO CIRCUITO ANALÓGICO (NA PRESENÇA DE SÓLIDO)

```

SUBROUTINE POTCS(i)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,N,M,nsp
parameter (nt=25, pi=3.14159265359, sigma=5.669D-8, erro=1.D-8)
REAL*8 Jp, Js, Jpe, Jq, Jqe
common/RR/Rp, Rs, Rq, Rqe, Rps, Rpe, Rpea, Rqea, Rpq(2), Rsq(2), Rppc, Rppc
common/RR/Rjp, Rjs, Rjq(2), Rjpc, Rcps, Rcpj, Rcpj, Rcppe, Rcppe, Rcppe, Rcppe
common/RR/Rppp(nt), Rppp(nt), Rppp(nt), Rqea
common/RR/Rjpp(nt), Rjpp(nt), Rjpp(nt), Rjpp(nt)
common/EE/Ep(nt), Es(nt), Epe(nt), Ejs(nt), Ejs(nt), Ea, Epc, Eq, Eqs
common/JP/Jp(nt), Js(nt), Jpe(nt), Jq, Jqe
common/TT/Ts(nt), Tg(nt), Tj(nt), Tp(nt), Tpe(nt), Tq, Tqe, Ta, Tref
common/TT/Tpc, Tqp(2), Tas(2), Tcb(2), Trl
common/TT/Tsn(nt), Tgn(nt), Tjn(nt), Tpn(nt), Tpen(nt), Tqn, Tqen
common/contr/ihp, ihs, igh, icp, isol, isol, ns, nsp, inj, imp
common/din/dt, ropar, cpar, time(120)
common/GEQA/rin(3), rext(3), rj(nt), beta, Ap(nt), Asp, As(nt), Ape,

```

```
# Aq,Aj(nt)
common/GEOBL(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
dimension A(20,20), B(20,1)

C-1 PREPARANDO ARGUMENTOS DA SUBROTINA GAUSSJ

C-2 Zerando a matriz input
do ia=1,9
  do ja=1,9
    A(ia,ja) = 0.D0
  end do
end do

C-3 Cálculo dos potenciais conhecidos:
Es(i) = sigma*((Ts(i)+Ts(i+1))/2)**4.D0 ! as temperaturas ...
Eg(i) = sigma*((Tg(i)+Tg(i+1))/2)**4.D0
Ej(i) = sigma*((Tj(i)+Tj(i+1))/2)**4.D0 ! são conhecidas
Epe(i) = sigma*Tpe(i)**4.d0
Ep (i) = sigma*Tp(i)**4.d0
Ea = sigma*Ta **4.D0
Epc = sigma*Tpc**4.D0

C-4 calculo dos elementos da matriz:
M=1
A(1,2) = 1/Rps
A(1,3) = 1/Rp
A(2,1) = 1/Rps
A(3,1) = 1/Rp
A(3,3) = -(1/Rp + 1/Rcppe + 1/Rcpq + 1/Rcps)
B(3,1) = -(Eg(i)/Rcpq + Es(i)/Rcps + Epe(i)/Rcppe)

if (i.eq.1) then
  N=7
  A(1,4) = 1/Rpq(1)
  A(2,4) = 1/Rsq(1)
  A(4,1) = 1/Rpq(1)
  A(4,2) = 1/Rsq(1)
  A(4,4) = -(1/Rq + 1/Rpq(1) + 1/Rjq(1) + 1/Rsq(1) +
    # 1/Rpq(2) + 1/Rjq(2) + 1/Rsq(2))
  A(4,5) = 1/Rq
  A(5,4) = 1/Rq
  A(5,5) = -(1/Rq + 1/Rcqpe)
  A(5,6) = 1/Rcqpe
  A(6,5) = 1/Rcqpe
  A(6,6) = -(1/Rcqpe + 1/Rqe + 1/Rcqe)
  A(6,7) = 1/Rqe
  A(7,6) = 1/Rqe
  A(7,7) = -(1/Rqe + 1/Rqea)
  A(1,1) = -(1/Rps + 1/Rp + 1/Rjp + 1/Rppc + 1/Rppp(i) + 1/Rppp(i)
    # + 1/Rpjp(i))
  A(2,2) = -(1/Rps + 1/Rsq(1) + 1/Rs + 1/Rjs + 1/Rsjp(i)
    # + 1/Rspp(i))
  B(4,1) = -Ej(1)/Rjq(1) - Ej(2)/Rjq(2) - Jp(2)/Rpq(2) - Js(2)/Rsq(2)
  B(5,1) = 0.D0
  B(6,1) = -Ea/Rcqe
  B(7,1) = -Ea/Rqea
  B(1,1) = -(Ej(i)/Rjp + Js(2)/Rpsp(i) + Jp(2)/Rppp(i)
    # + Ej(2)/Rppp(i))
  B(2,1) = -(Es(i)/Rs + Ej(i)/Rjs + Ej(2)/Rsjp(i)
    # + Jp(2)/Rppp(i))

  elseif (i.eq.ns-1) then
    N=4 !p/ calcular Epc
    A(1,1) = -(1/Rps + 1/Rp + 1/Rjp + 1/Rppc + 1/Rppp(i-1)
      # + 1/Rpsp(i-1) + 1/Rpjp(i) + 1/Rpsp(i) + 1/Rppp(i))
    A(2,2) = -(1/Rps + 1/Rs + 1/Rjs + 1/Rsjp
      # + 1/Rsjp(i-1) + 1/Rspp(i-1))
    A(4,1) = 1.d0/Rppc
    A(4,2) = 1.d0/Rspc
    A(1,4) = 1.d0/Rppc
    A(2,4) = 1.d0/Rspc
    A(4,4) = -(1/Rppc + 1/Rspc + 1/Rjpc)
    B(1,1) = -(Ej(i)/Rjp + Ej(i-1)/Rjp(i-1)
      # + Js(i-1)/Rpsp(i-1) + Jp(i-1)/Rppp(i-1))
    B(2,1) = -(Es(i)/Rs + Ej(i)/Rjs + Ej(i-1)/Rsjp(i-1)
      # + Jp(i-1)/Rppp(i-1))
    B(4,1) = -Ej(i)/Rjpc

  else
    N=3
    A(1,1) = -(1/Rps + 1/Rp + 1/Rjp + 1/Rppc + 1/Rppp(i-1)
      # + 1/Rpsp(i-1) + 1/Rpjp(i) + 1/Rpsp(i) + 1/Rppp(i))
    A(2,2) = -(1/Rps + 1/Rs + 1/Rjs + 1/Rsjp(i-1)
      # + 1/Rspp(i-1) + 1/Rsjp(i-1) + 1/Rspp(i-1))
    B(1,1) = -(Ej(i)/Rjp + Ej(i-1)/Rjp(i-1)
      # + Js(i-1)/Rpsp(i-1) + Jp(i-1)/Rppp(i-1))
    B(2,1) = -(Es(i)/Rs + Ej(i)/Rjs + Ej(i-1)/Rsjp(i-1)
      # + Jp(i-1)/Rppp(i-1))
    B(4,1) = -Ej(i)/Rjpc

  end if

  if (i.eq.2) then
    A(1,1) = A(1,1) - 1/Rpq(2)
    A(2,2) = A(2,2) - 1/Rsq(2)
    B(1,1) = B(1,1) - Jq/Rpq(2)
```

```
B(2,1) = B(2,1) - Jq/Rsq(2)
endif

C-5 Solução do sistema de equações lineares pelo método de Gauss-Jordan:
call gaussj(A,N,B,M)

C-6 Conversão dos resultados:
Jp(i) = B(1,1)
Js(i) = B(2,1)
Ep(i) = B(3,1)

if (i.eq.(ns-1)) then
  Epc = B(4,1)
elseif (i.eq.1) then
  Jq = B(4,1)
  Eq = B(5,1)
  Eqe = B(6,1)
  Jqe = B(7,1)
endif

return
end
```

CÁLCULOS DOS POTENCIAIS RADIATIVOS POR MEIO CIRCUITO ANALÓGICO (NA AUSÊNCIA DE SÓLIDO)

```
SUBROUTINE POTSS (i)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,N,M,nspp
parameter(nt=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8,erro=1.D-8)
REAL*8 Jp,Js,Jpe,jq,jqe
common/RR/Rp,Rs,Rq,Rqe,Rps,Rpe,Rpea,Rqea,Rpq(2),Rsq(2),Rppc,Rspc
common/RR/Rjp,Rjs,Rjq(2),Rjpc,Rcps,Rcpq,Rcsg,Rcppe,Rcpea,Rcqqa
common/RR/Rpsp(nt),Rppp(nt),Rppp(nt),Rcqe
common/RR/Rjpj(nt),Rppj(nt),Rjppj(nt),Rsjp(nt)
common/EE/Ep(nt),Es(nt),Epe(nt),Eg(nt),Ej(nt),Ea,Epc,Eq,Eqe
common/J/Jp(nt),Js(nt),Jpe(nt),jq,jqe
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Trl
common/TT/Tsn(nt),Tgn(nt),Tjn(nt),Tpn(nt),Tpen(nt),Tqn,Tqen
common/contr/lhp,lhs,igh,icp,isol,ns,nsp,lnj,imp
common/din/dl,ropar, cpar, time(120)
common/GEOA/rin(3),rext(3),rj(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GEOBL(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah

dimension A(20,20), B(20,1)
```

C-1 PREPARANDO ARGUMENTOS DA SUBROTINA GAUSSJ

```
C-2 Zerando a matriz input
do ia=1,9
  do ja=1,9
    A(ia,ja) = 0.D0
  end do
end do

C-3 Cálculo dos potenciais conhecidos:
Eg(i) = sigma*((Tg(i)+Tg(i+1))/2)**4.D0
Ej(i) = sigma*((Tj(i)+Tj(i+1))/2)**4.D0
Epe(i) = sigma*Tpe(i)**4.d0
Ep (i) = sigma*Tp(i)**4.d0
Ea = sigma*Ta **4.D0
Epc = sigma*Tpc**4.D0

C-4 calculo dos elementos da matriz:
M=1
A(1,2) = 1/Rp
A(2,1) = 1/Rp
A(2,2) = -(1/Rp + 1/Rcppe + 1/Rcpq )
B(2,1) = -(Eg(i)/Rcpq + Epe(i)/Rcppe)

if (i.eq.1) then
  N=6
  A(1,3) = 1/Rpq(1)
  A(3,1) = 1/Rpq(1)
  A(3,3) = -(1/Rq + 1/Rpq(1) + 1/Rjq(1) + 1/Rpq(2) + 1/Rjq(2)) !-S6
  A(3,4) = 1/Rq
  A(4,3) = 1/Rq
  A(4,4) = -(1/Rq + 1/Rcqpe) !(-S7)
  A(4,5) = 1/Rcqpe
  A(5,4) = 1/Rcqpe
  A(5,5) = -(1/Rcqpe + 1/Rqe + 1/Rcqe) !(-S8)
  A(6,5) = 1/Rqe
  A(6,6) = -(1/Rqe + 1/Rqea) !(-S9)
  A(1,1) = -(1/Rp + 1/Rjp + 1/Rppc + 1/Rppp(i) + 1/Rppp(i)
    # + 1/Rpjp(i)) !(-S1)
  B(3,1) = -Ej(1)/Rjq(1) - Ej(2)/Rjq(2) - Jp(2)/Rpq(2)
  B(4,1) = 0.D0
  B(5,1) = -Ea/Rcqe
  B(6,1) = -Ea/Rqea
  B(1,1) = -(Ej(i)/Rjp + Jp(2)/Rppp(i) + Ej(2)/Rppp(i)
    # + Ej(2)/Rppp(i))

  elseif (i.eq.ns-1) then
```

```

N=3      1p/ calcular Epc
A(1,1) = -(1/Rp + 1/Rjp + 1/Rppc + 1/Rpjp(i-1) + 1/Rppp(i-1))
A(3,1) = 1.d0/Rppc
A(1,3) = 1.d0/Rppc
A(3,3) = -(1/Rppc + 1/Rjpc)      ! (-S10)
B(1,1) = -(Ej(i)/Rjp + Ej(i-1)/Rjp(i-1) + Jp(i-1)/Rppp(i-1))
B(3,1) = -Ej(i)/Rjpc

else      ! para zonas intermediárias
  N=2
  A(1,1) = -(1/Rp + 1/Rjp + 1/Rpjp(i-1) + 1/Rppp(i-1) +
#          1/Rpjp(i) + 1/Rppp(i))
  B(1,1) = -(Ej(i)/Rjp      + Ej(i-1)/Rjp(i-1)
#          + Jp(i-1)/Rppp(i-1) + Jp(i+1)/Rppp(i)
#          + Ej(i+1)/Rjpp(i))
  end if

if (i.eq.2) then
  A(1,1) = A(1,1) - 1/Rpq(2)
  B(1,1) = B(1,1) - Jq/Rpq(2)
endif

C-5 Solução do sistema de equações lineares pelo método de Gauss-Jordan:

call gauss(A,N,B,M)

C-6 Conversão dos resultados:
Jp(i) = B(1,1)
Ep(i) = B(2,1)

if (i.eq.(ns-1)) then
  Epc = B(3,1)
elseif (i.eq.1) then
  Jq = B(3,1)
  Eq = B(4,1)
  Eqp = B(5,1)
  Jqe = B(6,1)
endif
return
end

```

CÁLCULO DA TEMPERATURA DA PAREDE EXTERNA (NÃO ESTACIONÁRIO)

```

SUBROUTINE CALCTPE(I,ic)
implicit double precision (a-h,l-z)
integer ns,ni,nsp
parameter(ni=25,pi=3.14159265359,sigma=5.669D-8)
REAL*8 Jp,Js,Jpe,jq,jqe
common/RR/Rp,Rs,Rq,Rqe,Rps,Rpe,Rpae,Rqae,Rpq(2),Rs(2),Rppc,Rspc
common/RR/Rjp,Rjs,Rjq(2),Rjpc,Rjps,Rcpj,Rcsj, Rcppe,Rcpea,Rcqae
common/RR/Rksp(ni),Rksp(ni),Rkpp(ni),Rkpp(ni),Rkqae
common/RR/Rjpp(ni),Rjpp(ni),Rjps(ni),Rjps(ni)
common/VE/Ep(ni),Es(ni),Epe(ni),Eg(ni),Ej(ni),Ea,Epc,Eq,Eqe
common/fj/jp(ni),Js(ni),Jpe(ni),Jq,jqe
common/TT/Ts(ni),Tg(ni),Tj(ni),Tp(ni),Tpe(ni),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpcc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tcl
common/TT/Tsn(ni),Tgn(ni),Tjn(ni),Tpn(ni),Tpen(ni),Tqn,Tqen
common/GEOA/rin(3),rxt(3),rj(ni),beta,Ap(ni),Asp,As(ni),Ape,
# Aq,Aj(ni)
common/GEOB/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/control/ihp, ihs, igh, igh, isol, isol, ns, nsp, inp, imp
common/separ/csp(25)
common/din/dl,ropar, cappar, time(120)

```

c HIPÓTESE PRINCIPAL: a dinâmica da transferência de calor por radiação
c é instantânea. Portanto os potenciais são todos avaliados no tempo $t+dt$
c A partir do momento que o programa passar pelas subrotinas POTCS e
c POTSS os potenciais serão atualizados com os valores de $t + dt$!

c Cálculo do termo de acúmulo referente ao tempo t:

$$V = \pi \cdot (r_{ext}(ic)^2 \cdot d_0 - r_{in}(ic)^2 \cdot d_0) \cdot dz(ic)$$

$$dTdt = ((E_p(i) - E_{pe}(i)) / R_{cpe} - (E_p(i) - E_a) / R_{cpe} - (E_{pe}(i) - J_{pe}(i)) / R_{oe}) / (r_{opar} \cdot C_{ppar} \cdot V)$$

c Cálculo da temperatura da pare.ext. no tempo t+dt:
 $T_{pe}(i) = T_{pe}(i) + dT_{di} \cdot dt$

```
c  Cálculo dos potenciais conhecidos no tempo t+dt:
Epe(i) = sigma*Tpen(i)**4.d0
Jpe(i) = (Epe(i)/Rpe + Ea/Rpea)/((1./Rpe+1./Rpea)
RETURN
END
```

FATOR DE GERAÇÃO DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO

```
SUBROUTINE FGPC
implicit double precision (a-h,i-z)
dimension M(11),ME(10)
common/FLAM/PC1c,PC1r(2),HL,Le1,cc(11,3),FM(11,3),OC
```

C-1 Massas moleculares dos elementos presentes no resíduo do combustível:

ME(1)= 12.011D0	carbono
ME(2)= 1.008D0	hidrogênio
ME(3)= 32.064D0	enxofre
ME(4)= 14.007D0	nitrogênio
ME(5)= 30.974D0	fósforo

ME(6)= 35.453D0	! cloro
ME(7)= 18.998D0	! flúor
ME(8)= 79.909D0	! bromo
ME(9)=126.904D0	! iodo
ME(10)=15.999D0	! oxigênio

C-2 Massas moleculares dos produtos de combustão:

M(1) = ME(1)*2.D0+ME(10)	! dióxido de carbono
M(2) = ME(2)*2.D0+ME(10)	! água
M(3) = ME(3)+ME(10)*2.D0	! ácido de enxofre
M(4) = ME(4)*2.D0	! nitrogênio
M(5) = ME(5)*2.D0+ME(10)*5.D0	! pentóxido de fósforo
M(6) = ME(2)+ME(6)	! ácido clorídrico
M(7) = ME(2)+ME(7)	! ácido fluorídrico
M(8) = ME(8)*2.D0	! bromo
M(9) = ME(9)*2.D0	! iodo
M(10) = ME(10)*2.D0	! oxigênio

C-3 Cálculo dos fatores de geração dos produtos de combustão:

do k=1,3		
FM(1,k) = cc(1,k)*M(1)/ME(1)		! CO2
FM(2,k) = (cc(2,k)*ME(2)-cc(6,k))/ME(6)		
# -cc(7,k)/ME(7)*M(2)/2.D0		! H2O
FM(3,k) = cc(3,k)*M(3)/ME(3)		! SO2
FM(4,k) = cc(4,k)	! N2	
FM(5,k) = cc(5,k)*M(5)/ME(5)/2.D0		! P2O5
FM(6,k) = cc(6,k)*M(6)/ME(6)		! HCl
FM(7,k) = cc(7,k)*M(7)/ME(7)		! HF
FM(8,k) = cc(8,k)	! Br2	
FM(9,k) = cc(9,k)	! I2	

C-4 Cálculo da razão estequiométrica oxigênio/combustível:

$$OC = cc(1,k)*M(10)/ME(1) + (cc(2,k)/ME(2) - cc(6,k)/ME(6) - cc(7,k)/ME(7))*M(10)/4.D0 + cc(3,k)*M(10)/ME(3) + cc(5,k)*M(10)/ME(5)*5.D0/4.D0 - cc(10,k)$$

C-5 teste de consistência:

```

sfm=0.D0
SX=0.D0
do j=1,10
    sfm=sfm+FM(j,k)
    SX=SX+cc(j,k)
end do
if (abs(sfm-1.d0).gt.1.E-8) then
    print *, 'a somatória de FM(i,k) não é igual a 1'
    print *, sfm
end if
if (abs(sx-1.d0).gt.1.E-8)then
    print *, 'somatoria de cc(j,k) não consistente =',sx
endif
enddo
return
end

```

CONDUTIVIDADE TÉRMICA E VISCOSIDADE

```
SUBROUTINE CONDML(y,ym,Tgas,mim,condm)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt
parameter (nt=25)
dimension M(11),m(11), cond(11), y(nt,11), ym(nt,11)
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
```

```
P=1,D+5
R=8.314D0
if (Tgas.gt.1300.) then
  T= 1300.
elseif (Tgas.lt.500.) then
  T= 500.
else
  T=Tgas
endif
```

C-1 Pesos moleculares dos componentes:

M(1) = 44.010D0	! CO2
M(2) = 16.015D0	! H2O
M(3) = 64.063D0	! SO2
M(4) = 28.013D0	! N2
M(5) = 141.95D0	! P2O5
M(6) = 36.641D0	! HCl
M(7) = 20.006D0	! HF
M(8) = 159.818D0	! Br2
M(9) = 253.808D0	! I2
M(10) = 31.999D0	! O2

C-2 Viscosidade : influência da temperatura (Pa.s)

```

mi1(1) = (0.003358*T + 0.7877 )*1E-5      ! CO2
mi1(2) = (0.0041127*T - 0.317273)*1E-5     ! H2O
mi1(3) = (0.00418*T + 0.00863 )*1E-5       ! SO2
mi1(4) = (0.00311*T + 1.07428 )*1E-5       ! N2
mi1(5) = (0.00410*T + 0.96500 )*1E-5       ! P2O5
mi1(6) = (0.00436*T + 0.14631 )*1E-5       ! HCL
mi1(7) = (0.1121*T + 0.14631 )*1E-5       ! HF

```

```
mi(8) = (0.004258*T + 0.340435)*1E-5 ! Br2
mi(9) = (0.00408*T + 0.18168)*1E-5 ! I2
mi(10) = (0.00410*T + 0.965000)*1E-5 ! O2
mi(11) = 1.D-5 ! COMBUSTIVEL
```

C-3 condutividades térmicas ; influência da temperatura (w/mK)

```
cond(1) = -7.215E-3 + 8.015E-5*T + 5.477E-9*T**2 - 1.053E-11*T**3
cond(2) = +7.341E-3 - 1.013E-5*T + 1.801E-7*T**2 - 9.100E-11*T**3
cond(3) = -4.213E-4 + 3.302E-6*T
cond(4) = +3.919E-4 + 9.816E-5*T - 5.067E-8*T**2 + 1.504E-11*T**3
cond(5) = -3.273E-4 + 9.966E-5*T - 3.743E-8*T**2 + 9.732E-12*T**3
cond(6) = -1.089E-4 + 5.306E-5*T - 1.047E-8*T**2 + 6.700E-13*T**3
cond(7) = +3.857E-3 + 5.276E-5*T + 2.261E-8*T**2 - 9.841E-13*T**3
cond(8) = -6.700E-5 + 1.729E-5*T - 1.256E-9*T**2 - 3.769E-13*T**3
cond(9) = +2.638E-4 + 1.143E-5*T - 1.256E-9*T**2 + 6.281E-13*T**3
cond(10) = -3.273E-4 + 9.966E-5*T - 3.743E-8*T**2 + 9.732E-12*T**3
cond(11) = +0.05D0
```

C-4 Conversão das frações mássicas em frações molares:

```
sy=0.D0
min=0.D0
mid=0.D0
condn=0.D0
cond=0.D0
do j=1,10 ! excluindo-se o combustível
  sy = sy + ym(iy,j)/M(j)
end do
```

c cálculo das frações molares:
do j=1,10 ! excluindo-se o combustível
y(iy,j)=ym(iy,j)/M(j)/sy
end do

C-5 Cálculo das propriedades físicas da mistura:

c somatórios
do j=1,10 ! excluindo-se o combustível
mid = mid + y(iy,j)*M(j)**0.5
min = min + y(iy,j)*mi(j)**0.5
cond= cond + y(iy,j)*M(j)**(1/3)
condn = condn + y(iy,j)*cond(j)*M(j)**(1/3)
end do

c Cálculo das propriedades físicas da mistura:

```
mim = min/mid
condm = condn/cond
if (mim.le.0.) then
  print *, 'viscosidade calculada menor do que zero'
  print *, 'temperatura', T
endif
if (condm.lt.0.d0) then
  print *, 'condutividade térmica calculada menor do que zero'
  print *, 'temperatura', T
endif
```

c a contribuição do combustível nas propriedades da mistura é
c proporcional à fração mássica.
mim = ym(iy,11)*mi(11) + (1.-ym(iy,11))*mim
condm = ym(iy,11)*cond(11) + (1.-ym(iy,11))*condm

C Fim da subrotina
return
end

MASSA ESPECÍFICA E CAPACIDADE CALORÍFICA

```
SUBROUTINE ROCP(iy,ym,Tgas,rom,cpm)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt
parameter (nt=25)
dimension M(11), cp(11), y(nt,11), ym(nt,11)
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/separ/csp(25)
```

```
P=1.D+5
R=8.314D0
if (Tgas.gt.1300.) then
  T= 1300.
elseif (Tgas.lt.500.) then
  T= 500.
else
  T=Tgas
endif
```

C-1 Pesos moleculares dos componentes:

```
M(1) = 44.010D0 ! CO2
M(2) = 18.015D0 ! H2O
M(3) = 64.063D0 ! SO2
M(4) = 28.013D0 ! N2
M(5) = 141.95D0 ! P2O5
M(6) = 36.041D0 ! HCl
M(7) = 20.008D0 ! HF
M(8) = 159.818D0 ! Br2
M(9) = 253.808D0 ! I2
```

M(10)= 31.999D0 ! O2

C-2 Capacidades caloríficas: influência da temperatura (J/mol.K)

```
cp(1) = +1.980E+1 + 7.344E-2*T - 5.602E-5*T**2.D0 + 1.715E-8*T**3.D0
cp(2) = +3.224E+1 + 1.924E-3*T + 1.055E-5*T**2.D0 - 3.596E-9*T**3.D0
cp(3) = +2.385E+1 + 5.699E-2*T - 4.961E-5*T**2.D0 + 1.328E-8*T**3.D0
cp(4) = +3.115E+1 - 1.357E-2*T + 2.680E-5*T**2.D0 - 1.168E-8*T**3.D0
cp(5) = +2.080E+1
cp(6) = +2.85 E+1 + 3.77 E-3*T
cp(7) = +2.906E+1 + 6.611E-4*T - 2.032E-6*T**2.D0 + 2.504E-9*T**3.D0
cp(8) = +3.386E+1 + 1.125E-2*T - 1.192E-5*T**2.D0 + 4.534E-9*T**3.D0
cp(9) = +3.558E+1 + 6.515E-3*T - 6.988E-6*T**2.D0 + 2.834E-9*T**3.D0
cp(10)= +2.811E+1 - 3.680E-6*T + 1.746E-5*T**2.D0 - 1.065E-8*T**3.D0
cp(11)= cpcb ! considerando direto j/kg.k
```

c conversão de J/molK para J/kg.K
do j=1,10 ! 11 * excluindo o combustível
cp(j)=cp(j)*1000.D0/M(j)
end do

C-3 Conversão das frações mássicas em frações molares:

```
PMM=0.D0
CPM=0.D0
sy=0.D0
do j=1,10 ! 11 * excluindo o combustível
  sy = sy + ym(iy,j)/M(j)
end do
```

c cálculo das frações molares:
do j=1,10 ! 11 * excluindo o combustível
y(iy,j)=ym(iy,j)/M(j)/sy
end do

C-6 Cálculo das propriedades físicas da mistura:

c somatórios
do j=1,10 ! 11 * exclui-se o combustível
PMM = PMM + y(iy,j)*M(j)
CPM = CPM + y(iy,j)*cp(j)
end do

c a contribuição do combustível no Cp da mistura é proporcional à
c fração mássica.
cpm = ym(iy,11)*cp(11) + (1.-ym(iy,11))*cpm

c Cálculo das propriedades físicas da mistura:
rom = P*PMM/R/T/1000.

C Fim da subrotina
return
end

ESTIMATIVAS DAS ÁREAS DE TROCAS TÉRMICAS

```
SUBROUTINE AREA (i,tres,jr)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt,ns,nsp
parameter (nt=25,pi=3.14159265359,erro=1.D-8)

common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/FISD/ros
common/GEOA/rin(3),rxt(3),rj(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
# Aq,Aj(nt)
common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/contr/hp,lhs,igh,icp,isol,jso,ns,nsp,inj,imp
```

c jr = 1 - câmara de combustão primária
c jr = 2 - câmara de combustão secundária
c jr = 3 - zona de interligação entre as câmaras

C-1 Cálculo da altura do leito de sólido (H):

```
if (Mss(i).ne.0.) then
  Ah = tres*(Mss(i)+Mag(i)+Mss(i+1)+Mag(i+1))/2/(ros*DZ(jr))
  H=0.1D0*rin(1)
  HA=0.D0
  do while (abs(H-HA).gt.erro)
    HA=H
    FH=rin(1)**2.D0*dacos((rin(1)-H)/rin(1))-
# (rin(1)-H)*dsqrt(2.D0*rin(1)*H-H**2.D0) - Ah
    DFDH=2.D0*dsqrt(2.D0*rin(1)*H-H**2)
    H=H-FH/DFDH
  end do
```

C-2 Teste para verificar se o jato não está sobre o sólido:

```
if (rj(i).gt.(rin(1)-H)) then
  print *, 'sobreposicao do jato em relacao ao solido'
  print *, 'o simulador atualizarah o raio do jato para 99%
#da dimensao máxima possível'
  rjold=rj(i)
  rj(i) = 0.99*(rin(1)-H)
  print *, 'alterado de ',rjold,' para ', rj(i),i
endif
c ângulo correspondente à corda determinada pelo sólido:
beta = 2.D0*acos((rin(1) - H)/rin(1))
else
c ausência de sólido
H = 0.d0
Ah = 0.d0
endif
```

C-3 Cálculo das áreas de trocas térmicas que envolvem o sólido:
if ((isol.eq.1).and.(i.lt.nsp)) then

c a. área da parede cilíndrica coberta pelo sólido:
Asp = 2.D0*rin(1)*DZ(jr)*DACOS((rin(1) - H)/rin(1))

c b. área do sólido exposta à radiação:
As(i)= 2.D0*DZ(jr)*DSQRT(2.D0*rin(1)*H - H**2.D0)
endif

C-4 Cálculo das áreas de trocas térmicas exceto as referente ao sólido:

c a. área da parede cilíndrica interna exposta à radiação:
Ap(i) = 2.D0*rin(jr)*DZ(jr)*(pi - DACOS((rin(jr) - H)/rin(jr)))

c b. área da parede externa:
Ape = 2.D0*pi*ext(jr)*DZ(jr)

c c. área superficial do jato cilíndrico:
Aj(i) = 2.D0*pi*rj(i)*DZ(jr)

c d. área da parede do queimador:
if (i.eq.1) then
Aq = pi*rin(1)**2.D0
endif

C fim da subrotina
return
end

MÉTODO DE ELIMINAÇÃO DE GAUSS-JORDAN (NUMERICAL RECIPES)

```
SUBROUTINE GAUSSJ(A,N,B,M)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer N,M
PARAMETER (NMAX=20, NP=20, MP=1)
DIMENSION A(NP,NP),B(NP,MP),IPIV(NMAX),INDXR(NMAX),INDXC(NMAX)
do ja=1,N
if (A(ja,ja).eq.0.D0) then
print *, 'elemento da diagonal nulo - gaussj', ja
endif
enddo

DO J=1,N
IPIV(J)=0
end do
DO 22 I=1,N
BIG=0.
DO 13 J=1,N
IF(IPIV(J).NE.1)THEN
DO 12 K=1,N
IF (IPIV(K).EQ.0) THEN
IF (ABS(A(J,K)).GE.BIG)THEN
BIG=ABS(A(J,K))
IROW=J
ICOL=K
ENDIF
ELSE IF (IPIV(K).GT.1) THEN
PAUSE 'matriz singular'
ENDIF
ENDIF
CONTINUE
ENDIF
CONTINUE
IPIV(ICOL)=IPIV(ICOL)+1
IF (IROW.NE.ICOL) THEN
DO 14 L=1,N
DUM=A(IROW,L)
A(IROW,L)=A(ICOL,L)
A(ICOL,L)=DUM
CONTINUE
DO 15 L=1,M
DUM=B(IROW,L)
B(IROW,L)=B(ICOL,L)
B(ICOL,L)=DUM
CONTINUE
ENDIF
INDXR(I)=IROW
INDXC(I)=ICOL
IF (A(ICOL,ICOL).EQ.0.) PAUSE 'matriz singular'
PIVINV=1./A(ICOL,ICOL)
A(ICOL,ICOL)=1.
DO 16 L=1,N
A(ICOL,L)=A(ICOL,L)*PIVINV
CONTINUE
DO 17 L=1,M
B(ICOL,L)=B(ICOL,L)*PIVINV
CONTINUE
DO 21 LL=1,N
IF(LL.NE.ICOL)THEN
DUM=A(LL,ICOL)
A(LL,ICOL)=0.
DO 18 L=1,N
A(LL,L)=A(LL,L)-A(ICOL,L)*DUM
CONTINUE
DO 19 L=1,M
B(LL,L)=B(LL,L)-B(ICOL,L)*DUM
CONTINUE
```

```
ENDIF
21 CONTINUE
22 CONTINUE
DO 24 L=N,1,-1
IF(INDXR(L).NE.INDXC(L))THEN
DO 23 K=1,N
DUM=A(K,INDXR(L))
A(K,INDXR(L))=A(K,INDXC(L))
A(K,INDXC(L))=DUM
23 CONTINUE
ENDIF
24 CONTINUE

RETURN
END
```

TESTE DE CONVERGÊNCIA

```
SUBROUTINE TESCON(it,ite,conv)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer conv,nt,ns,nsp
parameter (nt=25,erroM=1.D-4,erroY=1.D-4)

common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tri
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/XMM/XMg(nt),XMj(nt),XMss(nt),XMag(nt)
common/XTT/XTs(nt),XTg(nt),XTj(nt)
common/Xyy/Xyg(nt,11),Xyj(nt,11)
common/contr/ihp,ihb,igh,icp,isol,jsoi,ns,nsp,inj,imp

dimension diff(9)
if (ite.gt.400) then
erroT = 1.D-4 !0.1d0
print *, ' Tescon - convergencia alterado para 1.E-4'
elseif(ite.gt.200) then
erroT = 1.D-5 !1.d0
print *, ' Tescon - convergencia alterado para 1.E-5'
elseif(ite.gt.100) then
erroT = 1.D-6 !2.d0
print *, ' Tescon - convergencia alterado para 1.E-6'
else
erroT=1.D-8
endif
diff(1) = ABS(XMss(it) - Mss(it))
diff(2) = ABS(XMag(it) - Mag(it))
diff(3) = ABS(XMj(it) - Mj(it))
diff(4) = ABS(XMg(it) - Mg(it))
diff(5) = ABS(XTs(it) - Ts(it))
diff(6) = ABS(XTg(it) - Tg(it))
diff(7) = ABS(XTj(it) - Tj(it))
if (it.ge.nsp) then
diff(5) = 0.d0 ! Ts(i)
diff(1) = 0.d0 ! Mss(i)
endif
do j=1,4
if (diff(j).gt.erroM) then
conv=1
endif
enddo
if (diff(5).gt.5.) then
conv=1
endif
do j=6,7
if (diff(j).gt.erroT) then
conv=1
endif
enddo
do j=1, 11
diff(8) = abs(xyg(it,j)-yg(it,j))
diff(9) = abs(xyj(it,j)-yj(it,j))
if (diff(8).gt.erroY) then
conv=1
endif
if (diff(9).gt.erroY) then
conv=1
endif
enddo
if (conv.eq.1) then
if (it.le.nsp) then
Mss(it) = (Mss(it) + XMss(it))/2.D0
Ts(it) = (Ts(it) + XTs(it))/2.D0
else
Mss(it) = 0.d0
Ts(it) = 273.
endif
Mag(it) = (Mag(it) + Xmag(it))/2.D0
Mj(it) = (Mj(it) + XMj(it))/2.D0
Mg(it) = (Mg(it) + XMg(it))/2.D0
Tg(it) = (Tg(it) + XTg(it))/2.D0
Tj(it) = (Tj(it) + XTj(it))/2.D0
do j=1,11
yg(it,j)=(yg(it,j) + xyg(it,j))/2.D0
yj(it,j)=(yj(it,j) + xyj(it,j))/2.D0
end do
```

```
endif
return
end
```

ARMAZENAMENTO DAS VARIÁVEIS PARA TESTE DE CONVERGÊNCIA

```
SUBROUTINE STORE(is)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt
parameter (nt=25)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tri
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/XMM/XMg(nt),XMj(nt),XMss(nt),XMag(nt)
common/XTT/XTs(nt),XTg(nt),XTj(nt)
common/Xyy/Xyg(nt,11),Xyj(nt,11)
XMss(is)= Mss(is)
XMag(is)= Mag(is)
XMj(is)= Mj(is)
XMg(is)= Mg(is)
XTs(is)= Ts(is)
XTg(is)= Tg(is)
XTj(is)= Tj(is)
do j=1,11
    Xyg(is,j)= yg(is,j)
    Xyj(is,j)= yj(is,j)
end do
return
end
```

ESTIMATIVAS INICIAIS

```
SUBROUTINE ESTIMA(ie)
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt,ns,nsp
parameter (nt=25)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tri
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp

Mj(ie)= Mj(ie-1)
Mg(ie)= Mg(ie-1)
Tg(ie)= Tg(ie-1)
Tj(ie)= Tj(ie-1)
Tp(ie)= Tp(ie-1)
Tpe(ie)= Tpe(ie-1)
do j=1,11
    yj(ie,j)= yj(ie-1,j)
    yg(ie,j)= yg(ie-1,j)
end do
if (ie.le.nsp) then
    Ts(ie)= Ts(ie-1)
    Mss(ie)= Mss(ie-1)
    Mag(ie)= Mag(ie-1)
else
    Ts(ie)= 273.d0 ! zero graus celsius
    Mss(ie)= 0.D0
    Mag(ie)= 0.d0
end if
RETURN
END
```

CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO NA SAÍDA DA CÂMARA PRIMÁRIA

```
SUBROUTINE DISPO2P
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25)

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/FLAM/PClc,PClr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp

print*,'*****TESTE DE DISPONIBILIDADE DE OXIGENIO *****'
#*****
print*,' a. camara de combustao primaria:'
C-1 CÂMARA DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA
c teste para verificar se há oxigênio suficiente para combustão completa
dos resíduos sólidos e do combustível.
oxdema = -(FM(10,2)*(1.-tcin(1))*Mss(1)+FM(10,1)*Mcb(1))
oxdisp = yoxp(1)*Map(1)+yoxs(1)*Mg(1)
if (oxdema.gt.oxdisp) then ! oxigênio insuficiente para a queima
    write(*,14)oxdema,oxdisp
    read(*,16) iopcao
    if (iopcao.eq.1) then
        call fixao2p
    elseif(iopcao.eq.2) then
        call ALTREFF
    end if
end if
```

```
endif
else
```

```
c previsão da composição de oxigênio na saída da PCC:
ygo2p=(oxdisp-oxdema)/(Mg(1)+Mj(1)+Mss(1)*(1.-tcin(1))
+Mag(1))*100.
write(*,15)ygo2p
endif

14 format(7x,'demanda de oxigenio:',F5.2,7x,'disponibilidade :',
#F5.2,/,7x,'oxigenio insuficiente para a combustao total do residuo
#o e/ou combustivel',/,
#7X,'0 - prosseguir sem fazer qualquer alteracao ou correcao',/,
#7X,'1 - alterar vazao massicas de ar primario e secundario',/,
#7X,'2 - alterar outros dados de entrada de vazoes massicas ')
15 format(7x,'teor de oxigenio na saida da camara primaria(previsao):
#F5.2,%,/,7x,'oxigenio suficiente para combustao do residuo e
#ou combustivel')
16 format(I2)
return
end
```

FIXA A CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO NA SAÍDA DA CÂMARA PRIMÁRIA

```
SUBROUTINE FIXAO2P
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25)

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/FLAM/PClc,PClr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/contr/ihp,ihg,icp,isol,isol,ns,nsp,inj,imp
```

C CÂMARA DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA

```
C-1 cálculo da demanda e da disponibilidade de oxigênio
oxdema = -(FM(10,2)*(1.-tcin(1))*Mss(1)+FM(10,1)*Mcb(1))
c oxdisp = yoxp(1)*Map(1)+yoxs(1)*Mg(1)
C-2 entrada de dados
write(*,17)
read(*,18)ygo2p ! fração desejada de oxigênio na saída
write(*,19)
read(*,16) im ! 1 - altera cam. prim. e 2- altera cam. sec.
Mx = Mcb(1) + Mss(1)*(1.-tcin(1)) + Mss(1)*umid(1)
negat = 1
C-3 cálculo da demanda em termos de ar primário e ar secundário:
demap = (ygo2p/100.*Mx+oxdema)/(yoxp(1)-ygo2p/100.)
demas = (ygo2p/100.*Mx+oxdema)/(yoxs(1)-ygo2p/100.)
write(*,27) demap,demas
do while (negat.eq.1)
C-4 cálculo da vazão de ar secundário (im=1):
if (im.eq.1) then
    x = Map(1)
    DMap = -FM(10,1)*Fcb(1)/yoxp(1)
    write(*,21)Map(1),DMap
    read(*,33)Map(1)
    if (Map(1).eq.0.) then
        Map(1) = x
    end if
    Mg(1) = (ygo2p/100.*Mx +oxdema - Map(1)*(yoxp(1)-ygo2p/
100.))/(yoxs(1) - ygo2p/100.)
#
C-5 cálculo da vazão de ar primário (im=2):
elseif(im.eq.2) then
    x = Mg(1)
    write(*,22)Mg(1)
    read(*,33)Mg(1)
    if (Mg(1).eq.0.) then
        Mg(1) = x
    end if
    Map(1) = (ygo2p/100.*Mx +oxdema - Mg(1)*(yoxs(1)-
ygo2p/100.))/(yoxp(1) - ygo2p/100.)
#
endif
endif
C-6 teste para validação dos resultados:
if (Map(1).lt.0.) then
    write(*,23)
    negat = 1
elseif(Mg(1).lt.0.) then
    negat = 1
    write(*,24)
    else
        negat = 0
    end if
end if
C-7 cálculo da fração de ar primário em relação à demanda na chama
write(*,20) Map(1),Mg(1)
DMap = -FM(10,1)*Mcb(1)/yoxp(1)
if (DMap.lt.Map(1)) then
    write(*,25)(Map(1)-DMap)
else
    write(*,26) Map(1)/DMap*100
end if
write(*,28)
15 format(I2)
17 format(7x,'fracao massica (%) de oxigenio desejada para camara pr
```



```

#imaria)
18 format(F4.1)
19 format(7x,'1- alterar ar primario',5x,'2- alterar ar secundario')
20 format(7x,'vazao massica de ar primario (kg/s) :',F5.3,
#/,7x, 'vazao massica de ar secundario (kg/s) :',F5.3)
21 format(7x,'vazao massica de ar primario (kg/s) (atual):',F5.3,
#/,7x,'demanda de ar primario na chama(kg/s):',8x,F5.3)
22 format(7x,'vazao massica de ar secundario (kg/s) (atual):',F5.3,)
23 format(7x,'vazao de ar secundario maior do que o total necessario
#para atingir',/,a condicao desejada - REDUZA ESTA VAZAO')
24 format(7x,'vazao de ar primario maior do que o total necessario pa
#ra atingir',/,7x,'a condicao desejada - REDUZA ESTA VAZAO')
25 format(7x,'ar primario excede a demanda na chama em ',F5.3,
#kg/s')
26 format(7x,'ar primario alimentado/demanda na chama: ',F5.1
#,'%')
27 format(7x,'demanda equivalente em termos de ar primario : ',F8.4
#/,7x,'demanda equivalente em termos de ar secundario: ',F8.4)
28 format(7x,'ATENCAO: a alteracao em qualquer vazao massica alterara
# a',/,16x,'fracao massica de oxigenio na saida do PCC')
33 format(F10.5)
return
end

```

CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO NA SAÍDA DA CÂMARA SECUNDÁRIA

```

SUBROUTINE DISPO2S
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25)

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/FLAM/PClc,PClr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/contr/lhp,lhs,igh,icp,isol,ns,nsp,lnj,imp
print*, ' '
print*, ' b. camara de combustao secundaria:'
c vazao mássica total:
Mx = Mg(1)+Mcb(1)+Map(1)+Mss(1)*(1.-tcin(1))+Mss(1)*umid(1)
#+Fcb(2)+ Mliq*(1.-tcin(2))
Mtotal = Mx + Mas(2) + Map(2)

c oxigênio remanescente da câmara de combustão primária:
oxdema = -(FM(10,2)*Mliq*(1.-tcin(1))+Mss(1)+FM(10,1)*Mcb(1))
Oxrem = yoxs(1)*Mg(1) + yoxp(1)*Map(1) - oxdema

c oxigênio disponível na câmara de combustão secundária:
oxdisp = yoxs(2)*Mas(2) + yoxp(2)*Map(2) + Oxrem

c oxigênio demandado na câmara de combustão secundária:
oxdema = -(FM(10,3)*Mliq*(1.-tcin(2)-umid(2))+FM(10,1)*Fcb(2))

if (oxdema.gt.oxdisp) then ! oxigênio insuficiente para a queima
write(*,14)oxdema,oxdisp
read(*,16) iopcao
if (iopcao.eq.1) then
call fixao2s
elseif(iopcao.eq.2) then
call ALTREFS
endif
else

c previsão da composição de oxigênio na saída da PCC:
ygo2s=(oxdisp-oxdema)/Mtotal*100.
write(*,15)ygo2s
endif

14 format(7x,'demanda de oxigenio:',F5.2,7x,'disponibilidade : '
#F5.2,/,7x,'oxigenio insuficiente para a combustao total do residuo
#o e/ou combustivel',/,
#7x,'0 - prosseguir sem fazer qualquer alteracao ou correcao',/,
#7x,'1 - alterar vazao ar prim. e corrigir automaticamente do ar se
#cund.',/,7x,'2 - alterar dados de entrada de vazoes massicas - cam
# sec.')
15 format(7x,'teor de oxigenio na saida da camara secundaria (previsa
#o): ',F5.2,'% ',7x,'oxigenio suficiente para combustao do residuo
# e/ou combustivel')
16 format(I2)
33 format(F10.5)
RETURN
END

```

FIXA A CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO NA SAÍDA DA CÂMARA SECUNDÁRIA

```

SUBROUTINE FIXAO2S
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25)

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/FLAM/PClc,PClr(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC

```

```

common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/contr/lhp,lhs,igh,icp,isol,ns,nsp,lnj,imp

```

C CÂMARA DE COMBUSTÃO SECUNDÁRIA

```

C-1 vazão mássica total:
Mx = Mg(1)+Mcb(1)+Map(1)+Mss(1)*(1.-tcin(1))+Mss(1)*umid(1)+
#Fcb(2) + Mliq*(1.-tcin(2))
Mtotal = Mx + Mas(2) + Map(2)

C-2 oxigênio remanescente da câmara de combustão primária:
oxdema = -(FM(10,2)*Mliq*(1.-tcin(1))+Mss(1)+FM(10,1)*Mcb(1))
Oxrem = yoxs(1)*Mg(1) + yoxp(1)*Map(1) - oxdema

C-3 oxigênio disponível na câmara de combustão secundária:
oxdisp = yoxs(2)*Mas(2) + yoxp(2)*Map(2) + Oxrem

C-4 oxigênio demandado na câmara de combustão secundária:
oxdema = -(FM(10,3)*Mliq*(1.-tcin(2)-umid(2))+FM(10,1)*Fcb(2))
C-5 entrada de dados: valor desejado para a fração de oxigênio
write(*,17)
read(*,18)ygo2s
C-6 demanda de oxigênio em termos de ar primário e secundário
dems = (ygo2s/100.*Mx + oxdema - Oxrem)/(yoxs(2) - ygo2s/100.)
demp = (ygo2s/100.*Mx + oxdema - Oxrem)/(yoxp(2) - ygo2s/100.)
write(*,25)demp,dems

C-7 opção de alteração o ar primário ou secundário
write(*,19)
read(*,16) im
negat = 1
do while (negat.eq.1)
C-8 cálculo da vazão de ar secundário (im=1):fixa-se oxig. e ar prim.
if (im.eq.1) then
x = Map(2)
DMap = -FM(10,2)*Fcb(2)/yoxp(2)
write(*,21)Map(2),DMap
read(*,33)Map(2)
if (Map(2).eq.0.) then
Map(2) = x
endif
Mas(2) = (ygo2s/100.*Mx + oxdema - Oxrem - Map(2)*
(yoxp(2)-ygo2s/100.))/(yoxs(2) - ygo2s/100.)
#
elseif(im.eq.2) then
cálculo da vazão de ar prim. (im=2):fixa-se oxig. e ar sec.
x = Mas(2)
write(*,22)Mas(2)
read(*,33)Mas(2)
if (Mas(2).eq.0.) then
Mas(2) = x
endif
Map(2) = (ygo2s/100.*Mx + oxdema - Oxrem - Mas(2)*
(yoxs(2)-ygo2s/100.))/(yoxp(2) - ygo2s/100.)
#
endif
C-10 teste para validação dos dados
if (Map(2).lt.0.) then
write(*,23)
negat = 1
elseif(Mas(2).lt.0.) then
negat = 1
write(*,24)
else
negat = 0
endif
enddo
write(*,20) Map(2),Mas(2)

16 format(I2)
17 format(7x,'fracao massica (%) de oxigenio desejada para camara se
#cundaria')
18 format(F4.1)
19 format(7x,'1- alterar ar primario',5x,'2- alterar ar secundario')
20 format(7x,'vazao massica de ar primario (kg/s) :',F5.3,/,
#7x, 'vazao massica de ar secundario (kg/s) :',F5.3,/,
#7x,'ATENCAO: a alteracao em qualquer vazao massica alterara a',/,
#7x,'fracao massica de oxigenio na saida do SCC')
21 format(7x,'vazao massica de ar primario (kg/s) - (valor atual: '
#F5.3,')',/,7x,'demanda ar primario na chama (kg/s):',17x,F5.3)
22 format(7x,'vazao massica de ar secundario (kg/s) - (valor atual: '
#F5.3,')')
23 format(7x,'vazao de ar secundario maior do que o total necessario
#para atingir',/,a condicao desejada - REDUZA ESTA VAZAO')
24 format(7x,'vazao de ar primario maior do que o total necessario pa
#ra atingir',/,7x,'a condicao desejada - REDUZA ESTA VAZAO')
25 format(7x,'demanda equivalente em termos de ar primario :',4x,
#F8.4,/,7x,'demanda equivalente em termos de ar secundario :',4x,
#F8.4)
33 format(F10.5)
return
end

```

ALTERAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DE VAZÕES DA CÂMARA PRIMÁRIA

```

SUBROUTINE ALTREFF
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25)

```

```

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tri
common/FLAM/PClC,PClR(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/contr/ihp,ihc,igh,icp,isol,isol,ns,ns,inp,imp

c observação: umidade = Mag(1)/(Mag(1)+Mss(1)) - usuário
c umid(1) = Mag(1)/Mss(1) - uso interno
c a.câmara de combustão primária
print*,***** ALTERACAO DOS DADOS DE ENTRADA DE REFERENCIA *****
#*****
print*, ' a. camara de combustao PRIMARIA: vazoes massicas,temp
#atura, oxigenio'
print*, ' 1 - alterar      0 - usar valores de referencia'
read(*,8)ix
iout = 14*ix ! para imprimir uma unica vez a tabela de opções
umidade = umid(1)/(1.+umid(1))
iout = 0 ! saída inicialmente desbloqueada
do while (iout.ne.0)
  if (iout.eq.14) then
    print*, ' 0 - usar valores de referencia para demais v
#ariaveis'
    print*, ' 1 - vazao massica de solido (0.200)'
    print*, ' 2 - vazao massica de combustivel (0.100)'
    print*, ' 3 - vazao massica de ar primario (0.850)'
    print*, ' 4 - vazao massica de ar secundario (2.650)'
    print*, ' 5 - fracao de umidade no solido (0.167)'
    print*, ' 6 - teor de cinzas no residuo (0.400)'
    print*, ' 7 - fr. mas. de oxigenio no ar pri (0.233)'
    print*, ' 8 - fr. mas. de oxigenio no ar sec.(0.233)'
    print*, ' 9 - pre-estabelecer oxig. na saída'
    print*, ' 10 - temperatura do ar primario (333.0)'
    print*, ' 11 - temperatura do ar secundario (333.0)'
    print*, ' 12 - temperatura do combustivel (363.0)'
    print*, ' 13 - poder calorif. do res. sol. (5000000.)'
    print*, ' 14 - PARA APARECER NOVAMENTE ESTA TABELA'
  endif
  if (iout.eq.0) then
    print*, ' entre com a opcao de 0 a 13, ou 14 para tab
#ela de opcoes'
    read(*,8)iout
  endif ! se iout=1, saída bloqueada e opção automática no erro
  if (iout.eq.1) then
    write(*,10) Mss(1)
    read(*,33) Mss(1)
  elseif (iout.eq.2) then
    write(*,11) Mcb(1)
    READ(*,33) Mcb(1)
  elseif (iout.eq.3) then
    DMap = -FM(10,1)*Fcb(1)/yoxp(1)
    write(*,12) Map(1),DMap
    READ(*,33) Map(1)
  elseif (iout.eq.4) then
    write(*,13) Mg(1)
    READ(*,33) Mg(1)
  elseif (iout.eq.5) then
    write(*,14) umidade
    read(*,33) umidade
  elseif (iout.eq.6) then
    write(*,15) tcin(1)
    read(*,33) tcin(1)
  elseif (iout.eq.7) then
    write(*,16) yoxp(1)
    read(*,33) yoxp(1)
  elseif (iout.eq.8) then
    write(*,17) yoxs(1)
    read(*,33) yoxs(1)
  elseif (iout.eq.9) then
    call fixao2p
  elseif (iout.eq.10) then
    write(*,18) Tap(1)
    read(*,33) Tap(1)
  elseif (iout.eq.11) then
    write(*,19) Tas(1)
    read(*,33) Tas(1)
  elseif (iout.eq.12) then
    write(*,20) Tcb(1)
    read(*,33) Tcb(1)
  elseif (iout.eq.13) then
    write(*,41) PClR(1)
    read(*,33) PClR(1)
  endif
  iout = 1 ! saída bloqueada antes do teste
  if (Mcb(1).lt.1.D-4) then ! 1.D-4: caso o input seja inteiro
    iout=2
    write(*,30)iout
  elseif (Map(1).lt.1.D-4) then
    iout = 3
    write(*,30)iout
  elseif (Mg(1).lt.1.D-4) then
    iout = 4
    write(*,30)iout
  elseif (yoxp(1).lt.1.D-4) then
    iout = 7
    write(*,30)iout
  elseif (yoxs(1).lt.1.D-4) then
    iout = 8
    write(*,30)iout
  elseif (Tap(1).lt.1.D-4) then
    iout = 10
    write(*,30)iout
  elseif (Tas(1).lt.1.D-4) then
    iout = 11
    write(*,30)iout
  elseif (Tcb(1).lt.1.D-4) then
    iout = 12
    write(*,30)iout
  else
    iout = 0 ! saída desbloqueada
  endif
  umid(1) = umidade/(1.-umidade)
enddo
DMap = -FM(10,1)*Mcb(1)/yoxp(1)
if (DMap.lt.Map(1)) then
  write(*,21)(Map(1)-DMap)
else
  write(*,22) Map(1)/DMap*100
endif
8 format(I2)
10 format(7x,'taxa de alimentacao de solido (atual:',F5.3,')')
11 format(7x,'vazao massica de combustivel (atual:',F5.3,')')
12 format(7x,'vazao massica de ar primario (atual:',F5.3,')')
13 format(7x,'vazao massica de ar secundario (atual:',F5.3,')')
14 format(7x,'fracao massica de umidade no residuo(atual:',F5.3,')')
15 format(7x,'teor de cinzas (residuo) (atual:',F5.3,')')
16 format(7x,'frac. mas. oxigenio no ar primario (atual:',F5.3,')')
17 format(7x,'frac. mas.oxigenio no ar secundario (atual:',F5.3,')')
18 format(7x,'temperatura do ar primario (atual:',F5.1,')')
19 format(7x,'temperatura do ar secundario (atual:',F5.1,')')
20 format(7x,'temperatura do combustivel (atual:',F5.1,')')
21 format(7x,'poder calorifico do combustivel (atual:',F9.1,')')
22 format(7x,'ar primario excede a demanda na chama em ',F5.3, '%')
23 format(7x,'ar primario alimentado/demanda na chama: ',F5.1, '%')
30 format(7x,'valor invalido ou nulo para a variavel opcao: ',I2,')
# 7x,'entre com um novo valor para a variavel')
33 format(F10.5)
return
end

```

```

elseif(yoxp(1).lt.1.D-4) then
  iout = 7
  write(*,30)iout
elseif(yoxs(1).lt.1.D-4) then
  iout = 8
  write(*,30)iout
elseif(Tap(1).lt.1.D-4) then
  iout = 10
  write(*,30)iout
elseif(Tas(1).lt.1.D-4) then
  iout = 11
  write(*,30)iout
elseif(Tcb(1).lt.1.D-4) then
  iout = 12
  write(*,30)iout
else
  iout = 0 ! saída desbloqueada
endif
umid(1) = umidade/(1.-umidade)
enddo
DMap = -FM(10,1)*Mcb(1)/yoxp(1)
if (DMap.lt.Map(1)) then
  write(*,21)(Map(1)-DMap)
else
  write(*,22) Map(1)/DMap*100
endif
8 format(I2)
10 format(7x,'taxa de alimentacao de solido (atual:',F5.3,')')
11 format(7x,'vazao massica de combustivel (atual:',F5.3,')')
12 format(7x,'vazao massica de ar primario (atual:',F5.3,')')
13 format(7x,'vazao massica de ar secundario (atual:',F5.3,')')
14 format(7x,'fracao massica de umidade no residuo(atual:',F5.3,')')
15 format(7x,'teor de cinzas (residuo) (atual:',F5.3,')')
16 format(7x,'frac. mas. oxigenio no ar primario (atual:',F5.3,')')
17 format(7x,'frac. mas.oxigenio no ar secundario (atual:',F5.3,')')
18 format(7x,'temperatura do ar primario (atual:',F5.1,')')
19 format(7x,'temperatura do ar secundario (atual:',F5.1,')')
20 format(7x,'temperatura do combustivel (atual:',F5.1,')')
21 format(7x,'poder calorifico do combustivel (atual:',F9.1,')')
22 format(7x,'ar primario excede a demanda na chama em ',F5.3, '%')
23 format(7x,'ar primario alimentado/demanda na chama: ',F5.1, '%')
30 format(7x,'valor invalido ou nulo para a variavel opcao: ',I2,')
# 7x,'entre com um novo valor para a variavel')
33 format(F10.5)
return
end

ALTERAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DE VAZÕES
(CÂMARA SECUNDÁRIA)

SUBROUTINE ALTREFS
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsnp
parameter (nt=25)

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/yy/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tri
common/FLAM/PClC,PClR(2),HL,Lej,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/contr/ihp,ihc,igh,icp,isol,isol,ns,ns,inp,imp

print*, ' c. camara de combustao SECUNDARIA: vazoes massicas,temp
#atura, oxigenio'
print*, ' 1 - alterar      0 - usar valores de referencia'
read(*,8)ix
iout = 13*ix ! para imprimir uma unica vez a tabela de opções
iout = 0 ! saída bloqueada inicialmente
do while (iout.ne.0)
  if (iout.eq.13) then
    print*, ' 0 - usar valores de referencia para demais v
#ariaveis'
    print*, ' 1 - vazao massica de residuo liq. (0.400)'
    print*, ' 2 - vazao massica de combustivel (0.032)'
    print*, ' 3 - vazao massica de ar primario (0.300)'
    print*, ' 4 - vazao massica de ar secundario (5.300)'
    print*, ' 5 - fracao mas. agua no res. liq. (0.500)'
    print*, ' 6 - teor de cinzas no residuo liq. (0.010)'
    print*, ' 7 - fr. mas. de oxigenio no ar pri.(0.233)'
    print*, ' 8 - fr. mas. de oxigenio no ar sec.(0.233)'
    print*, ' 9 - pre-estabelecer oxig. na saída'
    print*, ' 10 - temperatura do ar primario (333.0)'
    print*, ' 11 - temperatura do ar secundario (333.0)'
    print*, ' 12 - temperatura do combustivel (393.0)'
    print*, ' 13 - PARA APARECER NOVAMENTE ESTA TABELA'
  endif
  if (iout.eq.0) then
    print*, ' entre com a opcao de 0 a 12, ou 13 para tab
#ela de opcoes'
    read(*,8)iout ! identifica opção
  endif ! se iout=1, saída bloqueada, opção automática
  if (iout.eq.1) then
    write(*,10) Mliq
    read(*,33) Mliq
  elseif (iout.eq.2) then
    write(*,11) Msv(1)
    read(*,33) Msv(1)
  elseif (iout.eq.3) then
    write(*,12) Map(1)
    read(*,33) Map(1)
  elseif (iout.eq.4) then
    write(*,13) Mcb(1)
    read(*,33) Mcb(1)
  elseif (iout.eq.5) then
    write(*,14) umid(1)
    read(*,33) umid(1)
  elseif (iout.eq.6) then
    write(*,15) tcin(1)
    read(*,33) tcin(1)
  elseif (iout.eq.7) then
    write(*,16) yoxp(1)
    read(*,33) yoxp(1)
  elseif (iout.eq.8) then
    write(*,17) yoxs(1)
    read(*,33) yoxs(1)
  elseif (iout.eq.9) then
    call fixao2p
  elseif (iout.eq.10) then
    write(*,18) Tap(1)
    read(*,33) Tap(1)
  elseif (iout.eq.11) then
    write(*,19) Tas(1)
    read(*,33) Tas(1)
  elseif (iout.eq.12) then
    write(*,20) Tcb(1)
    read(*,33) Tcb(1)
  elseif (iout.eq.13) then
    write(*,41) PClR(1)
    read(*,33) PClR(1)
  endif
  if (iout.eq.0) then
    print*, ' entre com a opcao de 0 a 12, ou 13 para tab
#ela de opcoes'
    read(*,8)iout ! identifica opção
  endif ! se iout=1, saída bloqueada, opção automática
  if (iout.eq.1) then
    write(*,10) Mliq
    read(*,33) Mliq
  elseif (iout.eq.2) then
    write(*,11) Msv(1)
    read(*,33) Msv(1)
  elseif (iout.eq.3) then
    write(*,12) Map(1)
    read(*,33) Map(1)
  elseif (iout.eq.4) then
    write(*,13) Mcb(1)
    read(*,33) Mcb(1)
  elseif (iout.eq.5) then
    write(*,14) umid(1)
    read(*,33) umid(1)
  elseif (iout.eq.6) then
    write(*,15) tcin(1)
    read(*,33) tcin(1)
  elseif (iout.eq.7) then
    write(*,16) yoxp(1)
    read(*,33) yoxp(1)
  elseif (iout.eq.8) then
    write(*,17) yoxs(1)
    read(*,33) yoxs(1)
  elseif (iout.eq.9) then
    call fixao2p
  elseif (iout.eq.10) then
    write(*,18) Tap(1)
    read(*,33) Tap(1)
  elseif (iout.eq.11) then
    write(*,19) Tas(1)
    read(*,33) Tas(1)
  elseif (iout.eq.12) then
    write(*,20) Tcb(1)
    read(*,33) Tcb(1)
  elseif (iout.eq.13) then
    write(*,41) PClR(1)
    read(*,33) PClR(1)
  endif
  if (Mcb(1).lt.1.D-4) then ! 1.D-4: caso o input seja inteiro
    iout=2
    write(*,30)iout
  elseif (Map(1).lt.1.D-4) then
    iout = 3
    write(*,30)iout
  elseif (Mg(1).lt.1.D-4) then
    iout = 4
    write(*,30)iout
  elseif (yoxp(1).lt.1.D-4) then
    iout = 7
    write(*,30)iout
  elseif (yoxs(1).lt.1.D-4) then
    iout = 8
    write(*,30)iout
  elseif (Tap(1).lt.1.D-4) then
    iout = 10
    write(*,30)iout
  elseif (Tas(1).lt.1.D-4) then
    iout = 11
    write(*,30)iout
  elseif (Tcb(1).lt.1.D-4) then
    iout = 12
    write(*,30)iout
  else
    iout = 0 ! saída desbloqueada
  endif
  umid(1) = umidade/(1.-umidade)
enddo
DMap = -FM(10,1)*Mcb(1)/yoxp(1)
if (DMap.lt.Map(1)) then
  write(*,21)(Map(1)-DMap)
else
  write(*,22) Map(1)/DMap*100
endif
8 format(I2)
10 format(7x,'taxa de alimentacao de solido (atual:',F5.3,')')
11 format(7x,'vazao massica de combustivel (atual:',F5.3,')')
12 format(7x,'vazao massica de ar primario (atual:',F5.3,')')
13 format(7x,'vazao massica de ar secundario (atual:',F5.3,')')
14 format(7x,'fracao massica de umidade no residuo(atual:',F5.3,')')
15 format(7x,'teor de cinzas (residuo) (atual:',F5.3,')')
16 format(7x,'frac. mas. oxigenio no ar primario (atual:',F5.3,')')
17 format(7x,'frac. mas.oxigenio no ar secundario (atual:',F5.3,')')
18 format(7x,'temperatura do ar primario (atual:',F5.1,')')
19 format(7x,'temperatura do ar secundario (atual:',F5.1,')')
20 format(7x,'temperatura do combustivel (atual:',F5.1,')')
21 format(7x,'poder calorifico do combustivel (atual:',F9.1,')')
22 format(7x,'ar primario excede a demanda na chama em ',F5.3, '%')
23 format(7x,'ar primario alimentado/demanda na chama: ',F5.1, '%')
30 format(7x,'valor invalido ou nulo para a variavel opcao: ',I2,')
# 7x,'entre com um novo valor para a variavel')
33 format(F10.5)
return
end

```

```

read(*,33) Mliq
elseif(ialt.eq.2) then
  write(*,11) Fcb(2)
  READ(*,33) Fcb(2)
elseif(ialt.eq.3) then
  DMap = -FM(10,2)*Fcb(2)/yoxp(2)
  write(*,12) Map(2),DMap
  READ(*,33) Map(2)
elseif(ialt.eq.4) then
  write(*,13) Mas(2)
  READ(*,33) Mas(2)
elseif(ialt.eq.5) then
  write(*,14) umid(2)
  read(*,33) umid(2)
elseif(ialt.eq.6) then
  write(*,15) tcin(2)
  read(*,33) tcin(2)
elseif(ialt.eq.7) then
  write(*,16) yoxp(2)
  read(*,33) yoxp(2)
elseif(ialt.eq.8) then
  write(*,17) yoxs(2)
  read(*,33) yoxs(2)
elseif(ialt.eq.9) then
  call fixao2s
  elseif(ialt.eq.10) then
    write(*,18) Tap(2)
    read(*,33) Tap(2)
  elseif(ialt.eq.11) then
    write(*,19) Tas(2)
    read(*,33) Tas(2)
  elseif(ialt.eq.12) then
    write(*,20) Tcb(2)
    read(*,33) Tcb(2)
endif

iout = 1 ! saída bloqueada
if(Fcb(2).lt.1.D-4) then
  ialt=2
  write(*,30)ialt
elseif(Map(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 3
  write(*,30)ialt
elseif(Mas(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 4
  write(*,30)ialt
elseif(yoxp(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 7
  write(*,30)ialt
elseif(yoxs(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 8
  write(*,30)ialt
elseif(Tap(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 10
  write(*,30)ialt
elseif(Tas(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 11
  write(*,30)ialt
elseif(Tcb(2).lt.1.D-4) then
  ialt = 12
  write(*,30)ialt
else
  iout = 0 ! saída desbloqueada
endif

enddo
DMap = -FM(10,2)*Fcb(2)/yoxp(2)
if (DMap.lt.Map(2)) then
  write(*,21)(Map(2)-DMap)
else
  write(*,22) Map(2)/DMap*100
endif

8 format(i2)
10 format(7x,'taxa de alimentacao de residuo liq. (atual:',F5.3,')')
11 format(7x,'vazao massica de combustivel (atual:',F5.3,')')
12 format(7x,'vazao massica de ar primario (atual:',F5.3,')')
# 1,7x,'demanda de ar primario na chama (atual:',F5.3,')')
13 format(7x,'vazao massica de ar secundario (atual:',F5.3,')')
14 format(7x,'fracao massica de umidade no res.liq(atual:',F5.3,')')
15 format(7x,'teor de cinzas no residuo liquido (atual:',F5.3,')')
16 format(7x,'frac. mas. oxigenio no ar primario (atual:',F5.3,')')
17 format(7x,'frac. mas.oxigenio no ar secundario (atual:',F5.3,')')
18 format(7x,'temperatura do ar primario (atual:',F5.1,')')
19 format(7x,'temperatura do ar secundario (atual:',F5.1,')')
20 format(7x,'temperatura do combustivel (atual:',F5.1,')')
21 format(7x,'ar primario excede a demanda na chama em ',F5.3,'kg/s')
22 format(7x,'ar primario alimentado/demanda na chama: ',F5.1,'%')
30 format(7x,'valor invalido ou nulo para a variavel opcao: ',i2,
# 7x,'entre com um novo valor para a variavel')
33 format(F10.5)
return
end

```

DADOS BÁSICOS

SUBROUTINE DADOS
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp

parameter(nt=25,pi=3.14159265359)
REAL*8 Jp,Js,Jpe,Jq,jqe

common/FF/Fpj(nt),Fjp(nt),Fjg(nt),Fjs(nt),Fps(nt),Fsp(nt)
common/FF/Fpp(nt),Fppj(nt),Fppp(nt),Fspj(nt),Fspj(nt)
common/FF/Fsp(nt),Fspj(nt),Fppj(nt),Fppp(nt),Fspj(nt),Fspj(nt)
common/FF/Fpja,Fjpa,Fjsa,Fjsa,Fpsa,Fpsa,Fppa,Fppa,Fppc,Fppc,Fppc
common/RR/Rp,Rs,Rq,Rqe,Rps,Rpe,Rpqa,Rpqa,Rpq(2),Rsq(2),Rppc,Rspc
common/RR/Rjp,Rjs,Rjq(2),Rjpc,Rcps,Rcpg,Rcsg,Rcppe,Rcpqa,Rcqqa
common/RR/Rppj(nt),Rppj(nt),Rppj(nt),Rppj(nt),Rppj(nt)
common/RR/Rppj(nt),Rppj(nt),Rppj(nt),Rppj(nt),Rppj(nt)
common/EE/Ep(nt),Es(nt),Epe(nt),Eg(nt),Ej(nt),Ea,Epc,Eq,Eqe
common/ji/Jp(nt),Js(nt),Jpe(nt),Jq,jqe
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Trl
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Ms(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/DM/DMag(nt),DMss(nt),DMen(nt),DMcb(nt)
common/FISA/cps, cpa, cpg(nt), cpj(nt),DHva,Cpri,Cpsv
common/FISB/conds,condg(nt),condq,condp(nt),difs,epsip,epsis,
epsipe,epsij(nt),taig,epscha,epsrch
common/FISC/mig(nt),Pr
common/FISDIros
common/yyl/yg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/GEOA/rin(3),rext(3),rj(nt),beta,Ap(nt),Asp,As(nt),Ape,
Aq,Aj(nt)
common/GEOL/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah
common/FLAM/PClc,PClr(2),HL,Laj,cc(11,3),FM(11,3),OC
common/XMM/XMg(nt),XMj(nt),XMs(nt),XMag(nt)
common/XTT/XTs(nt),XTg(nt),XTj(nt)
common/Xyy/Xyg(nt,11),Xyj(nt,11)
common/QQ/qg(nt),qj(nt),qg(nt)
common/RAIO/reap,riap,ref,rf
common/HH/Hss(nt),Hag(nt),Hva(nt),Hsv(nt),Hj(nt),Hen(nt),
Qger(nt),Hg(nt),DHrp(nt)
common/CTC/hgs(nt),hps(nt),hexl(nt),hgp(nt)
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/contrlhp,ihs,igh,icp,isol,ns,nsp,inj,imp
common/separ/csp(25)

C-2: PROPRIEDADES FÍSICAS: CONDUTIVIDADES E DIFUSIVIDADES TÉRMICAS

- c a. Condutividade termica da parede do queimador (W/m/K) :
condq= 20.0000D0
c b. Condutividade termica do solido (W/m/K) :
conds= 0.6100D0*csp(2) ! sensibilidade parametrica
c c. Condutividade termica do refratario (W/m/K) :
condp(1)= 1.2D0 *csp(1) ! sensibilidade parametrica
condp(2)= 1.67D0*csp(1) ! sensibilidade parametrica
condp(3)= 1.95D0*csp(1) ! sensibilidade parametrica
condp(4)= 2.55D0*csp(1) ! sensibilidade parametrica
do j=5,25
condp(j)= 2.85D0*csp(1) ! sensibilidade parametrica
enddo
c d. Difusividade Termica (m²/2/s):
difs= 0.2700E+07

C-3: PROPRIEDADES FÍSICAS: EMISSIVIDADES E TRANSMISSIVIDADES

- c a. Emissividade do solido :
epsis=0.80D0*csp(8) ! sensibilidade parametrica
c b. Emissividade da parede externa :
epsipe=0.80D0*csp(9) ! sensibilidade parametrica
c c. Emissividade da parede interna :
epsip=0.75D0*csp(10) ! sensibilidade parametrica
c d. Transmissividade do gas :
taig=0.90D0*csp(11) ! sensibilidade parametrica

C-4: PROPRIEDADES FÍSICAS: RESÍDUO SÓLIDO

- c a. Calor especifico do solido seco (J/kg/K):
cpss= 840.0000D0*csp(6) ! sensibilidade parametrica
c b. Poder calorifico inferior do residuo (J/kg):
PClr(1)=0.5D+7
c c. Massa especifica do solido seco (kg/m³):
ros=1490.0000D0
c d. Composição do residuo sólido (kg/kg, base seca):
c -carbono:
cc(1,2)=0.6D0
c -hidrogenio:
cc(2,2)=0.2D0
c -enxofre:
cc(3,2)=0.05D0
c -nitrogenio:
cc(4,2)=0.05D0 ! residuo sólido
c -fosforo:
cc(5,2)=0.01D0 ! valores de referência
c -cloro:
cc(6,2)=0.01D0
c -flúor:
cc(7,2)=0.01D0
c -bromo:
cc(8,2)=0.01D0
c -iodo:
cc(9,2)=0.01D0

```

c -oxigênio:
cc(10,2)=0.05D0
c -teor de unidade(razão entre a umidade e o sólido seco)
umid(1) = 0.2d0
c -teor de cinzas ( valor de referência )
tcin(1) = 0.4d0

c e.Composição do resíduo líquido ( kg/kg):
c -carbono:
cc(1,3)=0.6D0
c -hidrogênio:
cc(2,3)=0.2D0
c -enxofre:
cc(3,3)=0.05D0
c -nitrogênio:
cc(4,3)=0.05D0
c -fósforo:
cc(5,3)=0.01D0 ! resíduo líquido
c -cloro:
cc(6,3)=0.01D0 ! valores de referência
c -flúor:
cc(7,3)=0.01D0
c -bromo:
cc(8,3)=0.01D0
c -iôdo:
cc(9,3)=0.01D0
c -oxigênio:
cc(10,3)=0.05D0
c -teor de unidade ( valor de referência )
umid(2) = 0.50
c -teor de cinzas ( valor de referência )
tcin(2) = 0.01d0
c f.Capacidade calorífica do resíduo líquido (j/kg/K):
cpri = 2100.*csp(19)
c g.Capacidade calorífica das substâncias volatilizadas do resíduo (j/kg/K):
cpsv = 3000.D0*csp(20) ! J/kg/K capac. calor. das substâncias voláteis
c h.Capacidade calorífica da água (j/kg/K) :
cpa = 4190.D0 ! J/kg/K conferido 01/06/97 ( 1 cal/g/°C)
c i.entalpia de vaporização da água (j/kg):
DHva=0.2257E+7 ! J/kg conferido 01/06/97

C-5: DIMENSÕES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA:
c a.Raio externo da câmara de combustão primária (m):
rext(1) = 1.400D0
c b.Raio interno da câmara de combustão primária (m):
rin(1) = 1.250D0
c c.Angulo de inclinação da câmara de combustão primária (graus):
alfa = 2.000D0*2*pi/360
c d.Comprimento total da câmara de combustão primária(m):
L(1)= 12.000D0
c e.Espessura da parede do queimador da cam. comb. primária (m):
hq=0.150D0
c f.Velocidade rotacional (revoluções/s):
rot= 0.0330D0

C-6: DIMENSÕES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO SECUNDÁRIA:
c a.Raio externo da câmara de combustão secundária (m):
rext(2)= 1.20D0
c b.Raio interno da câmara de combustão secundária (m):
rin(2)= 1.050D0
c c.Comprimento total da câmara de combustão secundária(m):
L(2)= 8.0D0

C-7: DIMENSÕES DA CÂMARA DE INTERLIGAÇÃO ENTRE AS CÂMARA DE COMBUSTÃO:
c a.Raio externo equivalente ao cilindro com a mesma área superficial (m):
rext(3)= 1.3D0
c b.Raio interno equivalente ao cilindro com a mesma área superficial (m):
rin(3)= 1.15D0
c c.Comprimento total da câmara de interligação (m):
L(3)= 1.5D0

C-6: PROPRIEDADES CHAMA E DO QUEIMADOR COAXIAL:
c a.raio interno do anulo de entrada de combustível (m):
ri=63.5D-3
c b.raio externo do anulo de entrada de combustível (m):
ref=72.2D-3
c c.raio interno do anulo de entrada de ar primário (m):
riap=101.6D-3
c d.raio externo do anulo de entrada de ar primário (m):
reap=304.8D-3

C-7: VARIÁVEIS DE PROCESSO: VAZÕES MÁSSICAS DA CÂMARA DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA
c a.Vazão massica de solido seco na entrada (kg/s):
Mss(1) = 0.20
c b.Vazão massica de combustível (kg/s):
Fcb(1) = 0.10D0
Mcb(1) = Fcb(1)
c c.Vazão massica de ar primário (kg/s):
Map(1) = 0.85D0
c d.Vazão massica de gas na primeira zona (kg/s):

```

```

Mg(1) = 2.65D0
c h.vazão de sólidos voláteis:
Msv(1) = 0.d0

C-8: VARIÁVEIS DE PROCESSO: VAZÕES MÁSSICAS DA CÂMARA DE COMBUSTÃO SECUNDÁRIA
c a.Vazão massica de combustível (kg/s):
Fcb(2) = 0.032
c b.Vazão massica de ar primário (kg/s):
Map(2) = 0.300
c c.Vazão massica de ar secundário (kg/s):
Mas(2) = 5.300
c d.Vazão mássica de alimentação do resíduo líquido ( kg/s):
Mliq = 0.4d0

C-9: VARIÁVEIS DE PROCESSO: TEMPERATURAS
c a.Temperatura ambiente (K):
Ta= 303.0D0
c b.Temperatura de referência (K):
Tref=298.0D0
c e.Temperatura do sólido na entrada do forno(K):
Ts(1) = Ta
c f.Temperaturas do ar primário na câmara primária e secundária (K):
Tap(1) = Ta + 30.
Tap(2) = Ta + 30.
c g.Temperaturas do ar secundário na câmara primária e secundária (K):
Tas(1) = Ta + 30.
Tas(2) = Ta + 30.
c h.Temperatura do combustível na câmara primária e secundária (K):
Tcb(1) = Ta + 90.
Tcb(2) = Ta + 90.
c i.Temperatura do resíduo líquido (K):
Tri = Ta

C-10:PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL:
c a.Poder calorífico do combustível (j/kg):
PClc= 4.179E+7 ! fonte : petrobras ( Chan )
c b.Massa especifica do combustível (kg/m^3):
rocb=1030.D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c c.Teor de carbono no combustível (kg/kg):
cc(1,1)=0.872D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c d.Teor de hidrogênio no combustível (kg/kg):
cc(2,1)=0.095D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c e.Teor de enxofre no combustível (kg/kg):
cc(3,1)=0.028D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c f.Teor de nitrogênio no combustível (kg/kg):
cc(4,1)=0.005D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c g.Teor de oxigênio no combustível ( kg/kg ) :
cc(10,1)=0.D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c h.virtuamente isento dos demais componentes:
do j=5,9
cc(j,1)=0.D0
end do
c i.Porcentagem de perda de hidrogênio do combustível (%):
HL=0.052D0 ! fonte : petrobras ( Chan )
c j.Peso molecular médio do combustível:
PMcb=160.D0
c k.Capacidade calorífica do combustível (j/kg/K):
Cpcb = 3000.d0*csp(18)

C-11:ESTIMATIVAS INICIAIS:
c a.Temperatura da parede cilíndrica externa (K):
Tpe(1)= 400.000D0
c b.Temperatura da parede cilíndrica interna (K):
Tp(1)= 600.000D0
c c.Temperatura da parede externa do queimador (K):
Tqe=400.000D0
c d.Temperatura da parede interna do queimador (K):
Tq= 600.000D0

C-12:AR DE COMBUSTÃO:
C a.câmara de combustão primária:
c fração mássica de oxigênio no ar primário:
yoxp(1) = 0.233
c fração mássica de oxigênio no ar secundário:
yoxs(1) = 0.233
c b.câmara de combustão secundária:
c fração mássica de oxigênio no ar primário:
yoxp(2) = 0.233
c fração mássica de oxigênio no ar secundário:
yoxs(2) = 0.233

RETURN
END

DADOS INICIAIS E DEFINIÇÕES DE PROCEDIMENTOS
SUBROUTINE INICIO
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp,nzp,ntzs
parameter(nt=25)

common/GEOB/L(3),rot,hq,DZ(3),H,Ah

```

```
SUBROUTINE SOLIDO
implicit double precision (a-h,i-z)
integer nt,nsp,ns
parameter(nt=25)
```

common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgc(nt,11),Mjc(nt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/par/alfa,rocb,umid(2),cpcb
common/contr/ihp,ihp,igh,icp,isol,isoj,nsp,inp,imp

```

c. a fração que representa o sólido em relação à vazão mássica total
print* *****VAZAO MASSICA DE SOLIDO: DEFINICAO DE PROCED
#IMENTO*****

rel = ((Mss(1)*(1+umid(1)))/(Mss(1)*(1+umid(1))+Mg(1)+Mcb(1))+Map(1)
#)*100.
if (rel.lt.2.) then
    isoi = 0
    isoi = 0
    if (Mss(1).ne.0.) then
        print *, 'vazao de solido muito baixa - a temperatur
#ra do solido sera estimada'
        print **, 'pela media entre as temperaturas da parede
#e do gas'
    else
        print *, 'operacao sem alimentacao de solido'
    endif
else
    print*, 'sólido considerado no circuito desde o ini
#cio'
    isoi = 1

```

```

        isol = 1
    endif
    WRITE(*,31)re1
31    FORMAT('7X,relaçao entre as vazoes massicas de solido e a total.')
    #F4.1,'%')
    RETURN
END

```

SUBROUTINE ENTRADA

```
implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter(ni=25)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/pc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Tri
common/MMA/Mg(nt),Mj(nt),Mgo(cnt,11),Mjc(cnt,11)
common/MMB/Mss(nt),Mag(nt),Msv(nt),TRMss,tcin(2)
common/MMC/Mcb(nt),Map(2),Mas(2),Fcb(2),Mliq
common/FISA/cpss, cpa, cpg(nt), cpj(nt),DHva,Cpri,Cpss
common/GEB/L(3),rot,hg,DZ(3),H,Ah
common/yy/fg(nt,11),yj(nt,11),yoxp(2),yoxs(2)
common/contr/fnp, fhs, igh, icp, isol,isol,ns,nsp,inp,imp
common/part/a1a,rocb,umid(2),cpcb
common/separ/csp(25)
dimension v(1,11)
```

```

c. a. Vazão massica de umidade na primeira zona (kg/s):
  Map(1)=Mss(1)*umid(1)
c. b. Vazão mássica do jato na primeira zona (kg/s):
  Mj(1)= Mcb(1)+Map(1)
c. c. Composições das correntes de entrada na câmara primária:
c. c. ... gás anular
  do j=1,11                                     ! para i=1 (entrada)
    yg(1,j)=0.D0                                ! demais componentes ausentes
    yi(1,j)=0.D0
  end do
  yg(1,4)= 1.-yoxs(1)                            ! nitrogênio no gás anular
  yg(1,10)= yoxs(1)                              ! oxigênio no gás anular
  Mgc(1,10)= yoxs(1)*Mg(1)                       ! oxigênio no gás anular
  Mgc(1,4)= (1.-yoxs(1))*Mg(1)                   ! nitrogênio no gás anular
c. c. ... jato
  Mjc(1,10)= yoxp(1)*Map(1)                      ! oxigênio no jato
  Mjc(1,4)= (1.-yoxp(1))*Map(1)                  ! nitrogênio no jato
  yi(1,4)= (1.-yoxp(1))*Map(1)/(Map(1)+Mcb(1)) ! nitrogênio no jato
  yi(1,10)= yoxp(1)*Map(1)/(Map(1)+Mcb(1))      ! oxigênio no jato
  yi(1,11)= Mcb(1)/(Map(1)+Mcb(1))               ! combustível no jato
c. d. Cálculos das temperaturas do jato e do gás anular:
c. c. ... cálculo do Cp do ar primário:
  y(1,10)= yoxp(2)                                ! duas dimensões para compatibilizar sub
  y(1,4)= 1.-yoxp(2)
  call rocp(1,yg,Tap(2),ro,cpap)
c. ... cálculo da temperatura do jato na entrada do forno:
  cpj(1)= 1100,                                     ! estimativa inicial
  xTj = (Tap(1)+Tcb(1))/2,                          ! estimativa inicial
  Tj(1)= xTj                                         ! estimativa inicial
  erro = 1.                                          ! para entrar no loop
  do while(erro.gt.1.D-8)
    call rocp(1,yj,Tj(1),ro,cpj(1))
    cpj(1)=cpj(1)*csp(5)                          ! sensibilidade paramétrica
    Tj(1)=(Mcb(1)*Cpcb*(Tcb(1)-Tref)+
#      Map(1)*Cpap*(Tap(1)-tref))/(Mj(1)*cpj(1)) + Tref
    erro = abs(xTj-Tj(1))
    Tj(1) = (Tj(1)+xTj)/2.
    xTj = Tj(1)
  enddo
c. c. ... cálculo da temperatura do gás na entrada do forno:
  Tg(1)= Tas(1)
RETURN
END

```

SUBROUTINE REGIST(r)

```

implicit double precision (a-h,i-z)
integer ns,nt,nsp
parameter (nt=25)
common/TT/Ts(nt),Tg(nt),Tj(nt),Tp(nt),Tpe(nt),Tq,Tqe,Ta,Tref
common/TT/Tpc,Tap(2),Tas(2),Tcb(2),Trl
common/TTT/TTs(nt,120),TTg(nt,120),TTj(nt,120),TTP(nt,120),
#TTpe(nt,120)
common/contr/ihp,ihs,igh,icp,isol,jsol,ns,nsp,inj,imp

do i=1, ns
  TTs(i,jr) = Ts(i)-273.
  TTj(i,jr) = Tj(i)-273.
  TTg(i,jr) = Tg(i)-273.
  TTP(i,jr) = Tp(i)-273.
  TTpe(i,jr) = Tpe(i)-273.
ddo
return
end

```

BIBLIOGRAFIA

1. C.R. Dempsey; E.T. Oppelt, "Incineration of hazardous waste: A critical review update", *Journal of the Air Pollution Control Association*, **43**:25-73, (1993)
2. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação", (1987)
3. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 10007 - Amostras de Resíduos - Procedimentos", (1987)
4. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 10006 - Solubilização de Resíduos - Procedimentos", (1987)
5. K.K. Kuo, "Principles of Combustion", John Wiley & Sons, New York, 1986
6. G.D. Silcox, D.W. Pershing, "The effects of rotary kiln operating conditions and design on burden heating rates as determined by a mathematical model of rotary kiln heat transfer", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **40**:337-344 (1990)
7. Termoquip Energia Alternativa Ltda, "Processo Autotérmico de Incineração por Gaseificação e Combustão Combinadas", Patente nº 9103997, Brasil, 1991
8. J.C. Moura; S.G. d'Ávila, "Gaseificação de resíduos de tinta em leito de carvão incandescente: um método barato e eficiente de disposição final", Anais do 5º Congresso Internacional de Tintas, Ass. Bras. Fabricantes de Tintas, São Paulo, p. 619, 1997
9. F. Kreith, "Princípios de Transmissão de Calor", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977
10. E.M. Sparrow; R.D. Cess, "Radiation Heat Transfer", Brooks/Cole Publ. Co., 1970.
11. B.C. Jenkins, F.D. Moles, "Modeling of heat transfer from a large enclosed flames in a rotary kiln", *Trans IChemE* **59**:17 (1981)
12. H.C. Hottel, A.F. Sarofim, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1967.
13. J.P. Gorog, J.K. Brimacombe, T.N. Adams. "Radiative heat transfer in rotary kiln", *Metallurgical Transactions B* **12B**:55 (1981)
14. J.P. Gorog, J.K. Brimacombe, T.N. Adams. "Regenerative heat transfer in rotary kiln", *Metallurgical Transactions B* **13B**:153 (1982)
15. J.P. Gorog, J.K. Brimacombe, T.N. Adams. "Heat transfer from flames in a rotary kiln", *Metallurgical Transactions B* **14B**:411 (1983)
16. T.J. Fudihara, "Modelagem E Simulação De Um Forno Rotativo Em Regime Permanente", Tese de Mestrado, Unicamp, Campinas, 1995
17. T.M. Beér, M.A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Applied Science Publishers, London, 1972
18. S.H. Tscheng; A.P. Watkinson, "Convective heat transfer in a rotary kiln", *Can. Journal of Chemical Engineering*, **57**:433 (1979)
19. F.P. Incropera; D.P. Dewit, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1985.
20. A.K. Oppenheim, "Radiation Analysis by the Network Method", *Trans. ASME*, **78**, 725-35 (1956)
21. R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.C. Poling, "The Properties of Gases and Liquids", McGraw Hill Book Company, New York, 1987.
22. S. LaKaç, "Boilers, evaporators and condensers", John Wiley & Sons, 1991
23. R.H. Perry, C.H. Chilton, "Manual de Engenharia Química", 5ª edição, Guanabara Dois, 1980.
24. W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolski, W.T. Vetterling, "Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing", Cambridge University Press, Cambridge, 1988

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)}{\frac{2\pi k_p \Delta z}{\sigma(T_p^2 + T_{pe}^2)(T_p + T_{pe})}} \quad (C.8)$$

Por analogia à equação C.7, define-se como *coeficiente de transferência de calor condutivo análogo*, como sendo:

$$k_p^* = \frac{k_p}{\sigma(T_p^2 + T_{pe}^2)(T_p + T_{pe})} \quad (C.9)$$

ABSTRACT

Rotary kilns have been important applications for several processes, especially cement production and solid hazardous waste incineration. The rotary kiln is the more used type of hazardous waste incinerator because is able to treat solid material with a wide range of particle size and provide a good mixing of the solid bed.

Several works have been published on heat transfer models to the rotary kilns with application in the metallurgical engineering and cement production. The more important works were developed by Jenkin and Moles¹¹, Gorog *et al*^{13,14,15} and Silcox and Pershing⁶. The last one, developed the more realistic model and became the start point of this work.

In this work, a mathematical model is developed to predict the temperature and concentration axial profile into the rotary kiln and pos-combustor chambers, for steady and unsteady state, for a incineration of the hazardous waste with any characteristic, not only to contaminated soil. The approach developed in this work is different from the previous one especially because it is allowed the possibility of the solid bed volume reduction due to the thermal degradation of the waste, as well as gas phase combustion of the volatile compounds generated. Also, the liquid waste injection is allowed in secondary chamber.

The model is based on one-dimensional approach which considers the radiation exchange between immediately adjacent zones. The jet or flame, annular gas and solid flowing streams approach is adopted here. The kiln is splitted of axially into equal width zones, where each stream is considered well stirred and characterized by a single temperature, composition and mass flow rate.

The gas phase combustion of the volatiles is considered instantaneous. The waste burning rate is controlled by the mass transfer of volatiles from solid bed, expressed as mass loss rate.

Within a given zone, the jet or flame is represented as a cylinder of constant diameter and specified for each zone. The jet is divided into three regions: jet development zone, flame and combusted jet. In the jet development zone do not occur combustion or gas entrainment from surrounding gas. In the combusted jet region there is no auxiliary fuel to combustion, but volatile compounds transferred from solid bed may burned here. In the flame, there is gas entrainment from annular gases and the rates is specified for each zone.

The temperature of the kiln-afterburner interface is calculated and not specified as done in previous works. The heat capacities, thermal conductivities and viscosities are calculated taking into account the dependence on temperature and compositions.

An iterative solution procedure is adopted to solve energy balance equations and a FORTRAN code is developed to the numeric simulation.

Parametric sensitivity were also performed to 21 parameters and the effect on temperature profile was analyzed, to 10% negative and positive parameter variations. The heat capacities of the jet and gas are the most important parameter that results in the larger effects.

Due the enormous variability of industrial wastes, it is analyzed the influence of several solid mass loss rates sets on axial temperature profile calculations. Also, the work includes, the analysis of the effects of the gas entrainment rate and flame geometry approximation for each zone on temperature profiles, as well as, a brief study on reduction of the fuel consumption by two ways: the pre-heating of air combustion and oxygen enrichment.